

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

UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE en vue de l'obtention du diplôme de
Master

Option : Géo-matériaux et Structure

Thème

Etude Théorique de Phénomène de Gonflement et
Leur Stabilisation Application à la Région d'In
Amenas

Soutenu le :

Présenté par :

- KANDLI Ramdane
- TADMAITI Ahmed

Encadré par :

-H.MOULAY OMAR

Membres de jury :

Président :

- GUENFOUD Mohamed

Examineurs

- AKACEM Mustapha
- YAKHLEF Boualame

RESUME

Il existe plusieurs phénomènes physiques non encore maîtrisés dans le domaine de la géotechnique est celui du changement de volume d'un corps ou milieux soumis à des conditions particulières, Parmi ces phénomènes le gonflement des argiles compactées. Ce phénomène est spécifique à certains sols argileux. Les grands changements des caractéristiques de ces sols sont liés principalement aux variations de leur teneur en eau. Lorsque celle-ci augmente on assistera à un phénomène de gonflement du sol, et lorsqu'elle diminue on observe par contre un phénomène de retrait-tassement se traduisant par des dommages souvent importants sur les ouvrages de génie civil.

Mais selon la nature minéralogique de l'argile, le gonflement diffère par son amplitude et par les mécanismes de son développement.

D'autre part il existe des différentes techniques de stabilisation appliquées à ces sols par additifs; on cite parmi ces techniques de la stabilisation par apport de chaux, ciment, selles, sable cendres volcaniques...etc. Quelques résultats obtenues par plusieurs chercheurs montrer que l'apport d'un matériau non gonflant à aspect inerte tel que le sable réduisait le potentiel et la pression de gonflement d'une manière remarquable.

Dans ce mémoire nous procédons à l'étude théorique des échantillons prélevées de site d'In Amenas, ainsi que ces techniques de stabilisations les plus courantes dans le monde.

Mots clés : Sols Argileux, Argile, Potentiel, Gonflement, Pression, Stabilisation, Chaux, Ciment

ملخص

تعتبر ظاهرة انتفاخ التربة من الظواهر التي لم يتم التحكم فيها بعد، حيث يتغير حجمها بالزيادة أو النقصان في

حالة وصول الماء إليها أو الجفاف ، ومعظم أنواع التربة الطينية قابلة للانتفاخ أو الانكماش عند تغير درجة الرطوبة ، وتعتمد كمية الانتفاخ على عوامل عديدة منها التكوينات المعدنية للتربة والكثافة ودرجة الرطوبة الطبيعية وحالة الضغط ، وتكون التربة أكثر قابلية للانتفاخ في المناطق الحارة والجافة، وعند وصول الماء إليها يزداد حجمها ، ونتيجة لهذه الزيادة تتأثر المباني والطرق المقامة عليها.

بالمقابل هناك العديد من التقنيات التي تعمل على التقليل من انتفاخ التربة من بينها:

- تحسين خواص التربة بإضافة مواد كيميائية مثل الجير والأسمنت لتقوية ترابط جزيئاتها وزيادة قوتها، كذلك إضافة الأملاح، والرمال.

- إزالة طبقة التربة الانتفاخية واستبدالها بتربة جيدة...الخ.

في هذه المذكرة نتطرق إلى دراسة نظرية إلى عينات من التربة الطينية مأخوذة من موقع إن أمناس، كما نتطرق أيضا إلى الطرق الأكثر إستعمالا في التقليل من إنتفاخ هذا النوع من التربة.

كلمات المفتاح: التربة الطينية، الطين، الإنتفاخ، الضغط، الجير، الإسمنت.

Liste des Figures

Figure I.1	Couches tétraédriques	05
Figure I.2	Couches octaédriques	06
Figure I.3	Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile	06
Figure I.4	Assemblage d'une couche octaédrique et d'une couche tétraédrique pour une argile TO (1:1)	07
Figure I.5	Représentation schématique de quelques groupes de minéraux argileux TO (1:1) et TOT (2:1)	10
Figure I.6	Structure de la particule d'illite $(K, H_2O)_2 Si_8 (Al, Fe, Mg)_{4,6} O_{20} (OH)_4$	12
Figure I.7	Structure des smectites $(OH)_4 Si_8 (Al_{10/3} Mg_{2/3}) O_{20}, n H_2O$	13
Figure I.8	Structure d'une chlorite $(OH)_4 (Si Al)_8 (Mg, Fe)_6 O_{20}$	13
Figure I.9	Structure de la particule de kaolinite $(Si_4 O_{10}) Al_4 (OH)_8$	14
Figure I.10	Photographie au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell, 1976)	14
Figure I.11	Description des différents niveaux de porosité dans les argiles (d'après Griffith et Jos, 1991)	16
Figure I.12	Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation D'après Popescu(1986)	23
Figure I.13	Courbe du gonflement en fonction du temps (Selon Chen, 1988, [4])	24
Figure II.1	Vue générale du site d'intervention	28
Figure II.2	Plans de situation de terrain du projet	28
Figure II.3	Plans de situation d'in amenas	29
Figure II.4	Courbe de rétention d'eau des argiles d'In-Amenas (Etablie par Lamara et al. 2005)	30
Figure II.5	caisses d'échantillons.	33
Figure II.6	Essai de Granulométrie	35
Figure II.7	Essai de Sédimentation	36
Figure II.8	Courbe Granulométrique	38
Figure II.9	LES LIMITES D'ATTERBERG	38
Figure II.10	Préparation de L'échantillonF	39
Figure II.11	Appareil de Casagrande (cas a, b)	39

Figure II.12	Limite de Liquidité	39
Figure II.13	Limite de Plasticité	40
(Figure II.14	DIAGRAMME DE CASAGRANDE.	41
Figure II.15	Dosage de l'essai de bleu selon (NFP 94- 068)	43
Figure II.16	Essai au Bleu de Méthylène	43
Figure II.17	Photo Microscopique de l'argile d'in Amenas)	45
Figure II.18	Appareil de Cisaillement	46
Figure II.19	CELLULE OEDOMETRIQUE	47
Figure II.20	principe de l'essai DOWN HOLE	50
Figure II.21	La Courbe de L'ESSAI DOWN HOLE SC N°05	53
Figure II.22	Diagramme de la répartition minéralogique de Casagrande (1948), et Holtz et Kovac (1981).	57
Figure II.23	Carte de répartition du coefficient D'extensibilité linéaire (COLE), situation des argiles	57
Figure II.24	Classification du potentiel de gonflement des argiles d'In Amenas	58
Figure II.25	Gonflement des argiles d'In-Amenas	59
Figure III-1	Variation d'indice de plasticité en ajout de la chaux	64
Figure III.2	Influence de traitement à la chaux sur les caractéristiques d'un sol	65
Figure.III.3	La pression de gonflement en fonction % de sulfate de calcium	66
Figure.III.4	limites consistance du pour deux types de du sol en en fonction % de sulfate de calcium	67
Figure III.5	Technique de traitement de sol par malaxage en couche étalier	67
Figure III.6	Traitement des sols par la chaux en malaxage dans l'installation	68
Figure III-7	Technique par injection	68
Figure.III.8	Microstructure de texture d'argile comme affectée par la composition en solution (électrolyte) (Tessier, 1990)	78
Figure III.9	Semelle Superficielle Sur sol reconstitué (Mouroux 1988)	78
Figure III-10	Technique de Reconstitution DTR SONATRACH IN AMENAS	78
Figure III.11	L'organigramme pour choisir la stabilisation chimique appropriée pour un projet	80

Liste des Tableaux

Tableau I.1	Classification des phyllosilicates (d'après Caillère et Hénin, 1959, complété par Mitchell, 1993.	08
Tableau I-2	Caractéristiques des différentes familles d'argile.	08
Tableau I-3	Schéma simplifié montrant la classification des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs espèces (Jasmund et Lagaly, 1992).	11
Tableau II.1	Composition chimique des minéraux.	32
Tableau II.2	Coordonnées GPS des sondages.	34
Tableau II.3	Résultat des Analyses Granulométrique de Sol Support.	37
Tableau. II.4	Classification de l'argile d'un sol selon l'indice de plasticité IP	40
Tableau II.5	Potentiel de gonflement d'après Holtz, Dakshanamurthy et Raman (1973)	41
Tableau II.6	le potentiel de gonflement en fonction de l'IP	42
Tableau II.7	Sensibilité d'une argile au retrait -gonflement d'après Prian et al. (2000)	42
Tableau .II.8	Sensibilité d'une argile au retrait-gonflement d'après Chassagneux et al. (1996)	45
Tableau II.9	Résultats des analyses chimiques	45
Tableau II.10	Résultats de l'essai de compressibilité à l'oedomètre	
Tableau II.11	RESULTATS DE L'ESSAI SC-05	52
Tableau II.12	Activité des argiles (Chelghoum (2006)).	54
Tableau II.13	Potentiel de gonflement fonction de l'activité (Skempton 1953).	55
Tableau II.14	L'indice de changement du volume γ_0	56
Tableau II.15	Résultats de mesure de changement de volume par les pesées hydrostatiques	58
Tableau II.16	Caractéristiques des argiles d'In-Aménas et gonflements observés en laboratoire	60
Tableau III.1	Caractéristiques des chaux aériennes calciques utilisées pour le traitement des sols selon la NF P 98 101	63
Tableau.III.2	Mécanismes de la stabilisation par ciment des sols argileux	70
Tableau III.3	Activité et gonflement pour des solutions salines de normalité	77
Tableau III.-4	Avantages et Inconvénients des Techniques de Stabilisation Couramment Utilisées (Babouri 2008).	81

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE	01
CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I-INTRODUCTION.....	04
I.1- Argiles et minéraux argileux	04
I.1.1 Les argiles	04
I.1.2-Structure des minéraux argileux.....	05
I.1.2.1-Structure de base.....	05
I.1.2.2 Les différentes familles des minéraux argileux	07
I.1.2.3 -Classification des argiles	09
I.1.2.4 -Organisation des argiles.....	16
I.2 -L'interaction eau- argile	17
I.3 -Propriétés macroscopiques.....	18
I.3.1 -Argiles tendres et argiles raides	18
I.3.2 -Propriétés mécaniques et caractéristiques des argiles.....	18
I.4 Phénomène de Gonflement.....	19
I.4.1-Pourquoi les sols gonflent-ils et se rétractent-ils	19
I.4.2-Pourquoi spécifiquement les sols argileux.....	20
I.5- Description du phénomène de gonflement.....	21
I.6- Facteurs intervenant dans le phénomène de gonflement des argiles	24
I.6.1-Composantes mécaniques du gonflement	25
I.6.2-Composantes physico-chimiques du gonflement	25
I.7- Conclusion.....	25
CHAPITRE II : INTERVENTION SUR SITE	
II- Intervention sur site	27
II.1-Introduction	27
II.2- Situation du site d'intervention	27
II.3- Caractéristiques De La Région D'In-Amenas.....	28
II.3.1-Situation	28
II.3.2-Contexte Géo-environnementale	29
II.3.2.1- Géologie	29
II.3.2.2. Stratigraphie.....	30

II.3.2.3 - Contexte Hydro-Climatique.....	31
II.4- Sols d'In-Amenas	32
II.4.1- Minéralogie	32
II.4.2-Composition Chimique des Minéraux.....	32
II.4.3.Description Lithologique du Sol de Fondation	32
II.4.4-Essais Physico-Chimiques.....	34
II.4.4.1- ANALYSES GRANULOMETRIQUES	34
a) Analyse granulométrique par tamisage.....	34
b) Analyse granulométrique par sédimentation	35
II.4.4.2-LIMITES D'ATTERBERG.....	38
a) Objectif	38
b) Principe de l'essai	38
c) Indice de plasticité IP	38
II.4.4.3-Densité apparente	42
II.4.4.4- Essai bleu de méthylène.....	42
a) Principe de l'essai	42
b) Préparation de l'échantillon.....	42
c) Classification des sols après essai.....	44
d) Calcul et résultat	44
II.4.4.5-Analyses Chimiques	45
II.4.5-ESSAIS MECANIQUES	46
II.4.5.1-ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT	46
a) Matériel utilisé	46
b) Résistance au cisaillement.....	46
c) Calcul et résultat	47
II.4.5.2-ESSAIS OEDOMETRIQUES	47
d) Définition	47
e) BUT.....	48
f) Réalisation de l'essai	48
g) Calcul et Résultat.....	48
II.4.5-ESSAIS GEOPHYSIQUES	49
II.4.5.1-ESSAIS DOWN HOLE.....	49
a) METHODOLOGIE.....	49

1/ CONDITION DE L'ESSAI.....	49
2/ Réalisations des Mesures de L'essai DwonHole	49
3/ Résultats des Mesures.....	50
b) RAPPEL THEORIQUE	50
c) COMPARAISON DES VALEURS DES MODULES DYNAMIQUES ET STATIQUES	50
d) ANISOTROPIE	51
e) ORDRE DE GRANDEUR.....	51
f) REALISATION DE L'ESSAI ET INTERPRETATION DES RESULTATS	51
1/EQUIPEMENT MIS EN ŒUVRE.....	51
2/ MOYENS HUMAINS	52
3/ STATISTIQUE.....	52
4/ INTERPRETATION DES RESULTATS.....	52
5/ MESURE DE RESISTIVITE	54
II.5- Activité des argiles	54
II.6- Prévision du gonflement des argiles d'In-Amenas	55
II.6.1- Estimation du gonflement des argiles d'In-Amenas	55
II.6.1.1- Méthode de Covar et Lytton.....	55
a) Présentation de la méthode	55
b) Procédés de contrôle de la succion et de mesure du changement du volume	56
II.6.1.2- Méthode de l'A S T M.....	59
II.7- Conclusion	60
Chapitre III:LES TECHNIQUES DE STABILISATION	
III -Traitements Des Sols Argileux	62
III.1-Introduction	62
III.2 But de la Stabilisation.....	62
III.3 STABILISATION PAR AJOUT DE LA CHAUX.....	62
III.3.1 Chaux.....	62
III.3.2Différents types de chaux.....	62
III.3.2.1- La Chaux Vive	63
III.3.2.2-La Chaux Eteinte	63
a) Action à court terme	63

b) Action à long terme	65
III.3.3-Méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol	67
III.3.3.1- malaxage sur place.....	67
III.3.3.2-Technique d'injection	68
III.4-STABILISATION PAR AJOUT DU CIMENT	68
III.4.1-Ciment	68
III.5-STABILISATION PAR AJOUT DES CENDRES VOLANTES	70
III.6-STABILISATION PAR AJOUT DES MELANGES	71
III.7-STABILISATION PAR AJOUT DE SABLE	71
III.8-STABILISATION PAR SOLUTIONS SALINES	74
III.9-SUBSTITUTION	77
III.10- AUTRES TECHNIQUES DE STABILISATION	78
III.10.1-DRAINAGE	78
III.10.2-APPLICATION DE FORTES PRESSIONS.....	78
III.10.3-COMPACTAGE	79
III.10.4-PREHUMIDICATION	79
III.10.5-TRAITEMENT THERMIQUE	79
III.10.6-UTILISATION DE FONDATIONS ET D'EDIFICES SPECIAUX.....	79
III.11-Avantages de stabilisation	79
III.11.1-Avantages techniques.....	80
III.11.2-Avantages économiques.....	80
III.11.3-Avantages écologiques et environnementaux	80
III.12-CONCLUSION	81
Référence Bibliographique	85

Notations

Al^{3+} : Ion d'aluminium ;

Si^{4+} : Ion de silicium ;

Fe^{3+} : Ion de fer ;

Mg^{2+} : Ion de magnésium ;

K^{+} : Ion de potassium ;

Na^{+} : Ion de sodium ;

O^{-2} : Ion d'oxygène ;

SiO_2 : Oxyde de silicone ;

Ni^{2+} : Ion de nickel ;

Cu^{2+} : Ion de Cuivre ;

Zn^{2+} : Ion de Zinc

Cr^{3+} : Ion de Chrome

NH_4^{+} : Ion de Ammonium

Al_2O_3 : Oxyde d'aluminium ;

G : Potentiel de gonflement ;

H_2O : Eau ;

w_0 : Teneur en eau initiale ;

w_n : Teneur en eau naturelle ;

w_L : limite de liquidité ;

w_P : limite de plasticité ;

w_R : limite de retrait ;

w : Teneur en eau (%) ;

w_L : Limite de liquidité (%) ;

w_P : Limite de plasticité (%) ;

σ : Contrainte normale (bar) ;

φ : Angle de frottement ;

C: Coefficient de cohésion ;

γ_s : Poids spécifique du solide (Kg/m^3) ;

γ_w : Poids spécifique d'eau (Kg/m³) ;

η : Viscosité (poiseuilles) ;

d_d : Densité sèche ;

d_h : Densité humide ;

h_i, h_f : Succion matricielle initiale et finale ;

σ_i, σ_f : contraintes principales initiale et finales ;

π_i, π_f : succion osmotique initiale et finale ;

γ_h, γ_σ et γ_π : Indices de compression dus respectivement, à la succion matricielle, à la contrainte principale et à la succion osmotique ;

Z : *profondeur de prélèvement* ;

C_2 : *Teneur en argile* ;

ρ_d : *masse volumique du sol sec* ;

Z_{equ} : *profondeur équivalent au chargement appliqué à l'éprouvette pendant le gonflement* ;

ξ_{Gonf} : *pourcentage de gonflement* ;

ABREVIATIONS

T-O : Tétraédrique- octaédrique ;

T-O-T : Tétraédrique- octaédrique- Tétraédrique ;

T-O-T-O : Tétraédrique- octaédrique- Tétraédrique- octaédrique ;

A: Activité des argiles ;

C.E.C : Capacité d'échange cationique (meq/100g) ;

meq : Millier équivalent ;

Ip: Indice de plasticité ;

Sst : Surface spécifique totale (m²/g) ;

t: Temps (s) ;

VBs: Valeur du bleu de sol ;

E : Le module de Young ;

C_T : Coefficient de Tassement ;

C_G : Coefficient de Gonflement ;

H : Hauteur ;

INTRODUCTION GENERALE

En Génie Civil, le phénomène de retrait-gonflement de certains sols argileux et des formations géologiques argileuses induisent des tassements différentiels qui se manifestent par des désordres affectant principalement les structures construites en surface (bâtiment, fondation superficielle, ouvrage de soutènement, remblais,...) et les ouvrages enterrés (tunnels, pieux, canalisation, fondation profondes,...). Les exemples de désordres liés à la présence des argiles gonflantes sont nombreux et variés (Chen 1965, Mouroux *et al.* 1988, Philipponat 1991, Fleureau&Hachichi 1999, Bigot & Zerhouni 2000, Djedid&Bekkouche 2001, ...*etc*).

En Algérie 90% du territoire est à climat aride, recense beaucoup de pathologies liées au phénomène du gonflement/retrait des sols. Ce phénomène est très influencé par les actions de l'évapotranspiration et des vents desséchants qui sévissent dans les régions du Sud.

Le cas le plus frappant de la manifestation de ce phénomène en Algérie est celui de la raffinerie d'In Amenas (Wilaya d'Illizi), qui non finit pas de susciter des investigations et des thèmes de recherche variés.

Malgré ces inconvénients, les propriétés des argiles : faible perméabilité, potentiel important de rétention et bonne capacité d'autocicatrisation en font des matériaux très intéressants dans de nombreuses applications, en particulier, en Géotechnique de l'Environnement pour la construction de barrières ouvragées destinées à confiner des colis de déchets nucléaires stockés en profondeur, pour l'élaboration de noyau de barrages en terre. Cependant, ces matériaux peuvent être soumis à des variations de température et de contrainte mécanique et hydraulique importantes qui peuvent mettre en cause leur bon fonctionnement.

Les argiles gonflantes sont donc présentes dans de nombreux contextes, leurs propriétés pouvant être à la fois profitables et/ou dommageables. Il est donc important d'appréhender le comportement hydromécanique de ces matériaux afin de mieux maîtriser leur utilisation.

Dans la présente thèse nous avons procédé à la résolution de ce problème du gonflement. Ce phénomène est posé des problèmes complexes et variés à nombre de chercheurs spécialistes en géotechnique et en génie civil. Ce travail s'inscrit dans le

cadre de l'étude théorique de gonflement de sols expansifs de la région d'in amenas, ainsi que les différentes techniques et solutions possibles pour leur stabilisation.

Le premier chapitre constitue une étude bibliographique qui permet de synthétiser les informations concernant la structure microscopique des argiles ainsi que sur les mécanismes microscopiques qui gouvernent leur comportement macroscopique. On passe par les problèmes de gonflement, puis une analyse détaillée de la structure des argiles depuis le feuillet élémentaire jusqu'à l'échantillon. Nous insistons sur le rôle très important du milieu dipolaire (eau) dans le comportement de ces matériaux par l'étude des interactions physico-chimiques. En fin nous citons différentes descriptions de mécanisme de gonflement des argiles et les différents facteurs qui peuvent influencer le gonflement.

Ensuit dans le chapitre II un regroupement de l'ensemble des essais expérimentaux réalisé sur plusieurs échantillons prélevés de site étudier dans le cadre des études de sols, et des recherches réalisé dans cette région. Ont représenté un détaille de chaque essai et les résultats obtenus avec l'interprétation, le programme d'essai se déroule sur les essais physico-chimiques, mécaniques et géophysiques.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de stabilisation des sols expansifs par les différentes techniques. En citons quelques résultats bibliographiques sur la stabilisation de ces types des argiles.

Chapitre I: Etude bibliographique

I-Introduction :

En général, le gonflement des sols se caractérise par des mouvements de terrains différentiels de petite amplitude, provoqués par des variations de volume de certains sols argileux lorsque leur teneur en eau se augmente.

Ce phénomène ne concerne que certains sols argileux particulièrement en présence de minéraux gonflants. Ce phénomène est à l'origine des dégâts importants (figure I.1) aux bâtis au cours des périodes de sécheresse prolongée. En climat tempéré, les argiles sont souvent proches de leur état de saturation, si bien que leur potentiel de gonflement est relativement limité, elles sont donc éloignées de leur limite de retrait, ce qui explique que les mouvements les plus importants sont observés en période sèche.



Figure I.1. Désordres provoqués par le gonflement à In-Amenas

I.1- Argiles et minéraux argileux :

I.1.1 Les argiles :

Les argiles constituent la partie altérée des roches qui affleurent à la surface de l'écorce terrestre. Elles se forment le plus souvent par l'altération des minéraux de roches sous l'action des eaux, soit de surface, soit hydrothermales. Dans les deux cas, il y a un lien étroit entre la présence de l'argile et de l'eau. Les modes de formation des argiles sont souvent complexes et perturbés dans les phénomènes géologiques naturels; elles sont en conséquence toujours accompagnées d'impuretés. L'argile, en tant que roche, est constituée par des substances diverses sous formes de particules de très petite taille telles que : les carbonates, la silice, l'alumine, les sulfures, l'oxyde et l'hydroxyde de fer, l'oxyde de manganèse, la matière organique,... En procédant à la séparation par lévigation des constituants des argiles en fonction de leurs tailles, on s'est rendu compte que leurs

propriétés de plasticité et d'adsorption sont imputables à la présence de particules fines de taille inférieure à 2 μm . Ainsi, on a défini la fraction argileuse fine comme étant la fraction formée de minéraux argileux de différentes natures et dont la taille des particules est inférieure à 2 μm . L'isolation de cette fraction de minéraux argileux nécessite la conjugaison de différentes attaques chimiques, permettant la purification de l'argile en procédant à l'élimination des phases associées susmentionnées [13].

I.1.2-Structure des minéraux argileux :

I.1.2.1-Structure de base :

Les minéraux argileux sont des aluminosilicates présentant une structure en feuillets, d'où leur appellation de phyllosilicates (terme formé d'un morphème "phullon" issu du grec signifiant: qui a l'aspect de feuille). Ces feuillets sont bidimensionnels et constitués de deux types de couches:

a) **La couche tétraédrique (Figure I-1[7])** : dont chaque tétraèdre TO_4 est composé d'un atome central T coordonné à quatre atomes d'oxygène (trois dans le plan appelés basal (O_b) et un au sommet appelé apical). Chaque groupement TO_4 est lié aux tétraèdres voisins en partageant trois angles (les atomes d'oxygène O_b) pour former le long des directions cristallographiques (a,b) une figure hexagonale bidimensionnelle infinie. L'association de six tétraèdres engendre une lacune hexagonale. L'épaisseur de la couche tétraédrique est considérée être environ 3,4 Å.

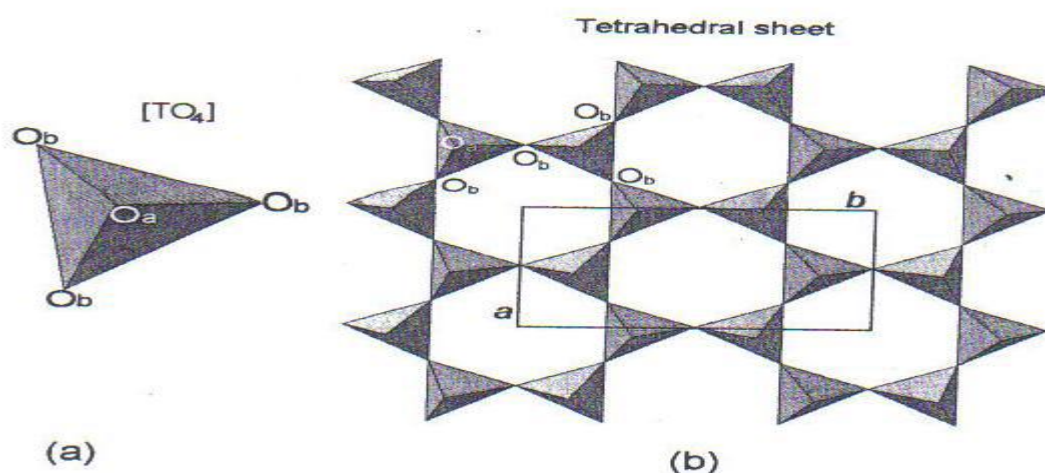


Figure I-1: Couches tétraédriques [7].

b) **La couche octaédrique (Figure I-2)** : dont chaque octaèdre est constitué au centre d'un cation M entouré de six ligands (O, OH). Les octaèdres sont connectés entre eux en partageant des côtés pour former dans le plan (a,b) une couche de symétrie hexagonale

ou pseudo-hexagonale . La couche octaédrique est considérée être moins épaisse que la couche tétraédrique.

Les cations communs susceptibles d'occuper les centres des tétraèdres sont: Si^{4+} , Al^{3+} et Fe^{3+} . Les cations octaédriques sont souvent Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} et Fe^{2+} , mais d'autres cations, tels que Li^+ , Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , V^{3+} , Cr^{3+} et Ti^{4+} sont aussi identifiés. Les octaèdres révèlent deux types différents de topologies selon la position du ligand OH: dans l'orientation cis, les ligands OH sont contigus tandis qu'ils sont opposés dans la conformation trans.

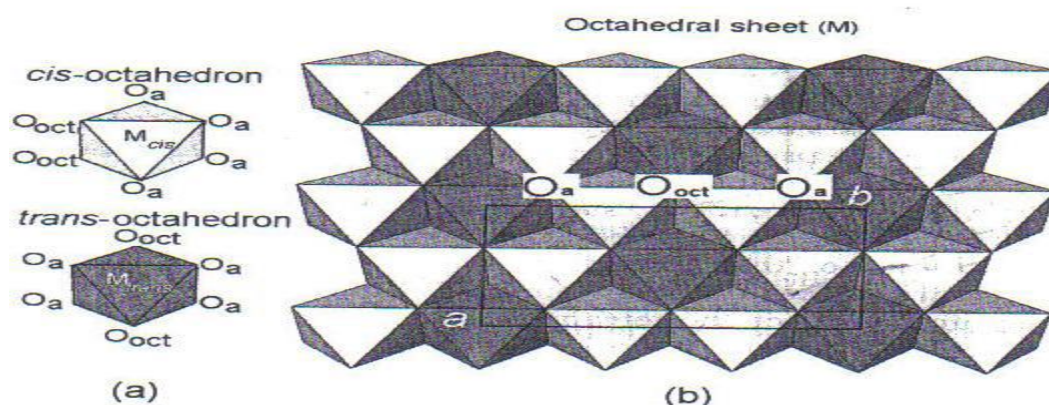


Figure I-2: Couches octaédriques [7],

La représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile est donnée par l'organigramme suivant (Figure I-3) :

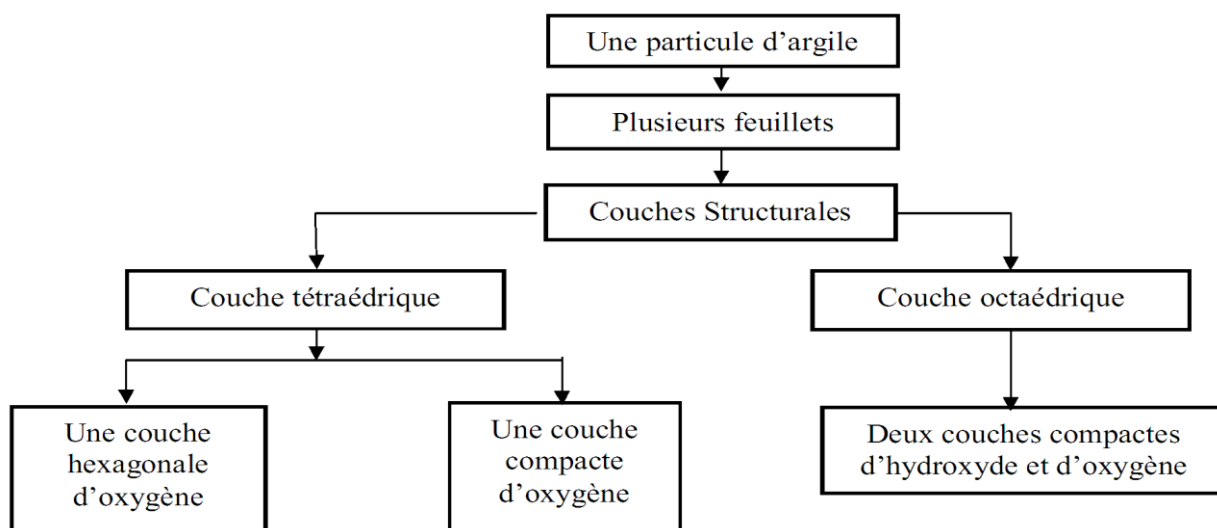


Figure I-3: Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile [4].

-Les minéraux argileux appartiennent à la famille des phyllosilicates. Leur structure est un empilement de couches tétraédriques et octaédriques qui forme les feuillets. Les tétraèdres sont liés les uns aux autres par des atomes d'oxygène. Ils forment ainsi un

réseau planaire d'hexagones d'atomes d'oxygène. Les octaèdres sont liés par un côté. L'agencement des couches permet de distinguer trois principaux types de minéraux :

- **Type 1** :1 ou T –O (1 couche octaédrique et 1 couche tétraédrique) (Figure I-4) : équidistance voisine de 7 Å

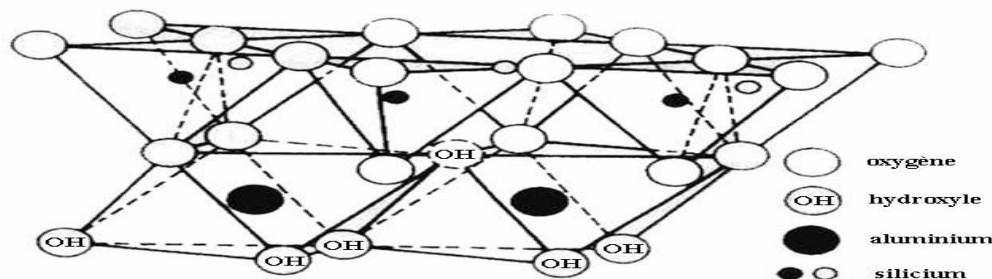


Figure I-4: Assemblage d'une couche octaédrique et d'une couche tétraédrique pour une argile TO (1:1) [4].

- **Type 2** :1 ou T -O- T (1 couche octaédrique entre 2 couches tétraédriques) équidistance variable entre 9 et 15 Å, suivant le remplissage ou non de l'espace interfoliaire ;

- **Type 2** :1 :1 ou T –O-T –O est similaire au type précédent mais l'espace interfoliaire est occupé par une couche d'octaèdres. L'équidistance caractéristique est alors de 14 Å environ.

Chimiquement, les tétraèdres sont constitués de quatre oxygènes (trois planaires et un apical) encadrant généralement un atome de Si^{4+} ou Al^{3+} , et plus occasionnellement Fe^{3+} et Cr^{3+} . Idéalement, une demi-maille élémentaire est définie par trois octaèdres. Quoi qu'il en soit, l'électroneutralité de la maille est réalisée avec 6 charges positives obtenues par le remplissage cationique de deux ou trois cavités octaédriques. On peut ainsi distinguer deux grands groupes parmi les familles de minéraux argileux : les minéraux dioctaédriques (deux cavités sur trois sont remplies par des cations trivalents) et les minéraux trioctaédriques (les trois cavités sont remplies par des cations divalents).

Les différentes substitutions possibles dans le tétraèdre ou dans l'octaèdre créent un déficit de charge cationique dans la structure. Ce déficit, s'il existe, est compensé au plus près par la charge du remplissage interfoliaire, soit par des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+), soit par une couche octaédrique (cas des chlorites), qui agit également sur la distance entre les feuillets

I.1.2.2 Les différentes familles des minéraux argileux :

En se basant sur la combinaison des couches d'octaèdres (O) et de tétraèdres (T) dans un feuillet élémentaire, la charge de la couche et la nature du matériel dans l'espace interfoliaire, on peut distinguer différentes familles de minéraux argileux disposant de

caractéristiques structurales, morphologiques et microscopiques spécifiques (Brindley, 1951; Caillère et Hénin, 1959). Selon la force des liens unissant les feuillets d'argiles, ceux-ci autorisent ou non l'arrivée d'eau dans l'espace interfoliaire. Pour certaines argiles (kaolinites), l'eau ne peut s'infiltrer entre les feuillets. Ces argiles sont dites faiblement « gonflantes » (Caillère et Hénin, 1959). En revanche, dans les smectites, la faible liaison entre les feuillets permet à chaque espace interfeuille de s'hydrater ; les smectites font partie des argiles dites « gonflantes ». L'amplitude du phénomène dépend de l'état initial et des contraintes appliquées. En fonction du climat et des roches mères, d'autres minéraux intermédiaires peuvent se former comme les illites et les interstratifiés (Tableau.I.1):

Tableau I.1: Classification des phyllosilicates (d'après Caillère et Hénin, 1959, complété par Mitchell, 1993 [13]).

Nature du feuille	Nature des cations interfoliaires	Groupe	Nature de la couche Octaédrique	Exemples
1/1	Pas de cations ou seulement de l'eau	<i>Kaolinite</i>	Diocatédrigue	Kaolinite, halloysite, nacrite, dickite
2/1	Pas de cations	<i>Pyrophyllites</i>	Diocatédrigue	Talc
	Cations hydratés et échangeables	<i>Smectites</i>	Diocatédrigue	Montmorillonite, nontronite, beidellite,
		<i>Vermiculites</i>	Diocatédrigue	Vermiculite dioctatédrigue à trioctatédrigue
	Cations monovalents non hydratés	<i>Micas</i>	Diocatédrigue	Muscovite, Illite, Paragonite, biotite
	Cations divalents non-hydratés	<i>Micas durs</i>	Diocatédrigue	Margarite, clintonite
	Hydroxyles	<i>Chlorites</i>	Diocatédrigue	Donbassite, sudoite, Clinochore
2/1 Fibreux	/	<i>Palygorskites, Sépiolites</i>	Diocatédrigue	Sépiolite, Palygorskite

Les caractéristiques de ces argiles sont résumées dans le tableau I.2 :

Tableau I-2[11]: Caractéristiques des différentes familles d'argile.

Nom	Type	Diamètre d'une particule (µm)	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface spécifique en m ² / g	C.E.C en meq/ 100g
Kaolinite	1:1	0.1 – 4	0	10 – 30	10 – 30	5 - 15
Illite	2:1	0.1 – 1	20 – 55	80 – 120	100 – 175	10 - 40
Montmorillonite (Smectite)	2:1	0.1	600 – 700	80	700 – 840	80 - 150
Chlorite	2:1:1	0.1	-	100 – 175	100 – 175	10 – 40
Vermiculite	2 :1	0.1	700	40 – 70	760	100 – 150

I.1.2.3 -Classification des argiles:

Au sein même d'une couche où entre deux couches successives d'un même feuillet, les liaisons inter atomiques sont des liaisons de valence primaire très fortes entre deux feuillets successifs, ces liaisons sont en général 10 à 100 fois moins fortes que les précédentes en raison des cations adsorbés, il s'agit des liaisons hydrogène et de forces d'attraction électrostatiques et de Van der Waals.

À cause de la dissymétrie de la molécule d'eau, ce dernier utilisé comme un dipôle électrique : le centre de gravité des charges négatives est différent de celui des charges positives. Les cations en solution sont entourés de molécules d'eau « captives » avec lesquels ils ont des liaisons ion-dipôle : on parle de sphère d'hydratation ou de solvation. Les cations adsorbés à la surface des feuillets peuvent être au moins trois façons différentes (Charlet et Schlegel 1999). Lors des substitutions au sein d'un feuillet, la charge est délocalisée au niveau d'atomes superficiels, créant de véritables sites d'attraction des cations à la surface, sous forme de cavités. Un grand nombre de cations, entourés de leurs sphères d'hydratation, sont attirés par la surface chargée négativement, en raison des seules forces électrostatiques, et restent à proximité de cette surface.

On parle alors de couche diffuse, lorsqu'un cation s'approche de la surface, il peut aussi être littéralement capté par ces sites de surface. Dans certains cas, le cation reste entouré de molécules d'eau d'hydratation et vient s'accoler à la surface, par des liaisons hydrogènes et, essentiellement, électrostatiques ; on dit qu'il forme un complexe de sphère externe, ou complexe hors sphère (CHS). Les forces d'attraction mises en jeu diminuent rapidement avec la distance, donc un assemblage est d'autant plus stable (donc d'autant mieux lié) que la distance entre charge positive et négative est faible. Ainsi, lorsque le cation compensateur a des dimensions proches de celles des cavités de surface, l'excès de charge négative de la surface provoque la déshydratation du cation compensateur qui vient ensuite s'enchaîner à l'interface entre les feuillets, formant ce qu'on appelle un complexe de sphère interne (CSI). Un CSI est évidemment plus stable qu'un CHS, lui même plus stable qu'une liaison purement électrostatique de couche diffuse [3].

Du type de feuillets et de la nature de ces liaisons va dépendre les propriétés et la classification des argiles. (Figure I-5) donne une description schématique des différents minéraux argileux. A la lumière des informations précédentes, nous allons expliquer brièvement la composition et la structure des principaux minéraux.

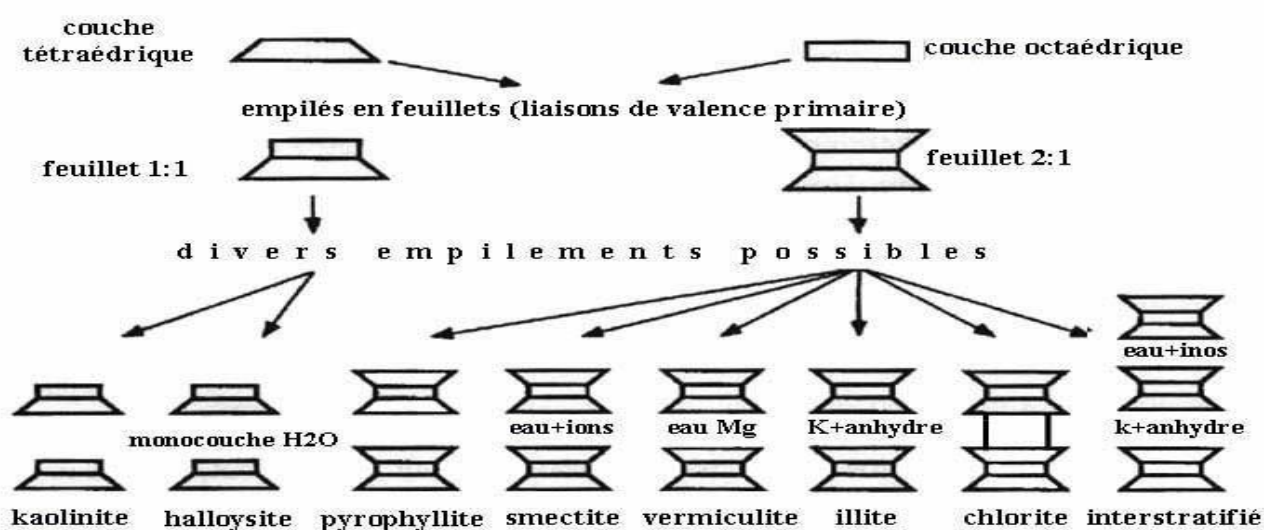


Figure I-5: Représentation schématique de quelques groupes de minéraux argileux TO (1:1) et TOT (2:1) [3].

Dans la famille des argiles 1:1, on distingue le groupe des kaolinites et celui des serpentinites (beaucoup plus rares, et dont nous ne parlerons pas). Chez les kaolinites, il y a en fait très peu de substitutions isomorphes, et la liaison face-à-face entre feuillets est assurée par des liaisons H entre les atomes d'oxygène de la base de la couche T et les atomes d'hydrogène du groupement hydroxyle de la couche O du feuillet suivant, et bien sûr à des liaisons de Van der Waals. Ces liaisons sont suffisamment fortes pour empêcher l'adsorption d'eau interfoliaire.

Les argiles 2:1 comportent de nombreux groupes, en raison des différentes liaisons possibles entre deux feuillets successifs (liaisons assurées par les cations compensateurs) :

- Dans le cas des illites, le cation compensateur est, nous l'avons dit, l'ion potassium K^+ qui forme un CSI avec les deux feuillets entre lesquels il se trouve ; cette liaison des feuillets par le potassium anhydre est si forte que les molécules d'eau ne parviennent pas à s'engager entre les feuillets.
- Lorsque le cation compensateur est majoritairement le magnésium Mg^{2+} , les hydroxyles interfeuillets arrivent à se réunir latéralement pour former avec cet ion une couche octaédrique supplémentaire, donnant naissant à un assemblage de type TOT-O très stable qui caractérise le groupe des chlorites. Ce type est parfois désigné 2:2.
- Les cations compensateurs des smectites sont le sodium Na^+ , le calcium Ca^+ et en plus petite quantité potassium K^+ et magnésium Mg^{2+} . Na et Ca forment des CHS, assurant

une liaison interfeuillets plus faible, ce qui autorise l'adsorption de cations hydratés supplémentaires, et notamment de molécules d'eau (qui doivent être perçues ici comme des protons hydratés), par attraction électrostatique. Plusieurs couches d'eau peuvent ainsi être adsorbées entre les feuillets. Les argiles smectiques présentent une triple instabilité (Foucault & Raoult 1992) : *dégradation* (désorganisation des feuillets) par hydrolyse, ou au contraire *aggradation* au contact d'eaux interstitielles chargées d'un cation de potassium (fixation d'ions par CSI et transformation en illite : illitisation) ou de magnésium (réorganisation des feuillets et chloritisation), enfin par *éshydratation*.

- Les interstratifiés sont formés par l'alternance plus ou moins régulière de feuillets de natures différentes (par exemple illite- sectite, illite-chlorite, ...).

Tableau I-3: Schéma simplifié montrant la classification des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs espèces (Jasmund et Lagaly, 1992) [11].

Groupe de Minéraux Argileux	Espèce Minérale	Structure T = couche de tétraèdres O = couche d'octaèdres
Kaolinites	Kaolinite Halloysite Dickite	Minéraux à 2 couches T-O T-O
Smectites	Montmorillonite Saponite Beidellite Nontronite	Minéraux à 3 couches T-O-T T-O-T
Illites Vermiculites Micas	Illite Vermiculite Muscovite Biotite	H ₂ O, cations
Chlorites	Chlorite	Minéraux à 4 couches T-O-T-O T-O-T-O
Sepiolites Palygorskites	Sepiolite (écume de mer) Attapulgate	Minéraux en lattes <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">T-O-T</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">T-O-T</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 2px;">T-O-T</div> </div>

a) Classification des minéraux argileux les plus fréquents dans les sols:

- L'illite (K, H₂O) 2 Si₈ (Al, Fe, Mg) 4.6 O₂₀ (OH) 4

Leur structure (type 2:1) est proche de celle des smectites mais elles possèdent un déficit de charge plus élevée dû aux substitutions ioniques par des cations interfoliaires de potassium K⁺ (Figure.I.6). Les cations K⁺ ont la particularité de posséder exactement la

même dimension que les cavités de surface où ils sont piégés. Cette liaison des feuillets par les ions potassium anhydre est très forte et empêche que les molécules d'eau ne parviennent à entrer entre les feuillets, rendant ces ions non échangeables et hydratables. Les illites ont des feuillets d'équidistance fixe à 9,6 Å. Ce caractère leur confère un plus faible potentiel de gonflement que celui des smectites et la constitution de particules de grandes tailles. Les particules sont généralement composées d'un empilement de 5 à 20 feuillets (Bolt, 1956) et le pouvoir de fixation des cations d'illite est compris entre 10 et 40 méq/100g.

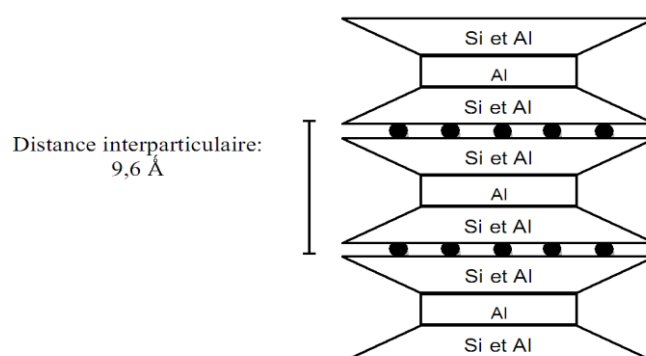


Figure .I.6: Structure de la particule d'illite $(K, H_2O)_2 Si_8 (Al, Fe, Mg)_4,6O_{20} (OH)_4$ [14].

• **Les smectites $(OH)_4 Si_8 (Al_{10/3}, Mg_{2/3}) O_{20}, nH_2O$**

Le feuillet élémentaire (type 2:1 ou T-O-T) est constitué de deux couches tétraédriques de silice encadrant une couche octaédrique d'alumine. L'empilement des feuillets est désordonné : chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent et a une extension latérale extrêmement importante par rapport à son épaisseur qui est d'environ 9,6 Å (Figure.I.7). Ce désordre de feuillets et la constitution des faces inférieures/supérieures de ces argiles ne permettent pas le développement d'une liaison hydrogène entre les feuillets, ce qui facilite leur écartement et l'adsorption des molécules variées (cations, eau, molécules organiques) au niveau de l'espace interfoliaire qui s'écarte. Par conséquent, les smectites sont très sensibles à l'eau et un important gonflement de la particule peut se produire par adsorption de molécules d'eau entre les feuillets. L'épaisseur du feuillet peut alors varier de 9,6 Å à 15 Å voire plus selon la nature du cation compensateur et l'hydratation de l'espace interfoliaire. Les smectites, ou montmorillonites, sont généralement calciques, plus rarement sodiques suivant la nature du cation prédominant (calcium, sodium). Il est connu que le sodium confère des propriétés de gonflement supérieures à celles permises par la présence de calcium comme cation échangeable dans une argile (Saiyouri, 1996).

Les smectites comportent un empilement de feuillets variant entre 1 à 10 unités, voire plus pour une montmorillonite sodique. Les substitutions d'atomes sont importantes, la capacité d'échange cationique de ces argiles est comprise entre 80 et 150 méq/100g. Les feuillets de smectites peuvent s'organiser régulièrement ou irrégulièrement avec d'autres feuillets argileux, souvent illitiques. L'ensemble forme alors des interstratifiés.

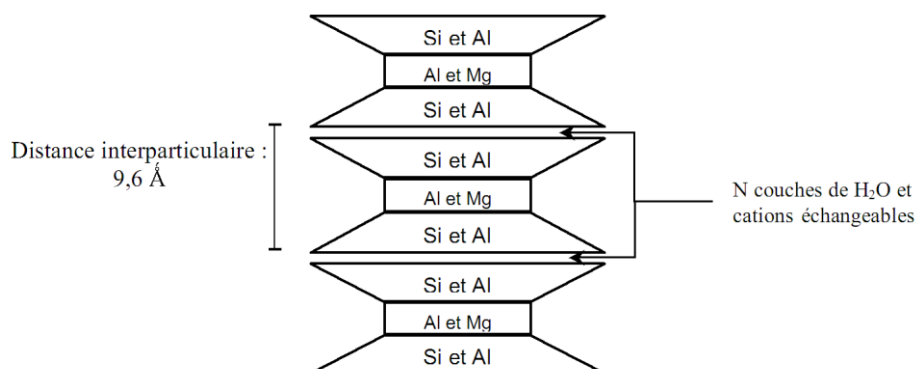


Figure.I.7 : Structure des smectites $(OH)_4 Si_8 (Al_{10/3} Mg_{2/3}) O_{20}, nH_2O$ [14].

• **Les vermiculites $(Mg, Ca)_{0,7}(Mg, Fe, Al)_6(Al, Si)_8 O_{22} (OH)_4 .8H_2O$**

Les vermiculites appartiennent à la famille des phyllosilicates 2 :1. Elles constituent une famille proche de celle des smectites, mais elles sont caractérisées par un déficit de charge plus important.

Elles sont majoritairement trioctaédriques. Le déficit de charge est essentiellement dû aux substitutions tétraédriques et la compensation est assurée dans l'espace interfoliaire par des cations (Mg^{2+} principalement) et des couches d'eau.

• **Les chlorites $(OH)_4 (Si Al)_8 (Mg, Fe)_6 O_{20}$:**

Initialement, il s'agit d'une structure type 2:1 ou T-O-T dont l'espace interfoliaire est totalement occupé par des Mg^{2+} . Les ions hydroxyles interfeuillets des feuillets élémentaires T-O-T arrivent à se regrouper pour former une couche octaédrique supplémentaire donnant naissance à un assemblage de type TOT-O très stable, d'une épaisseur de 14 Å (Figure.I.8).

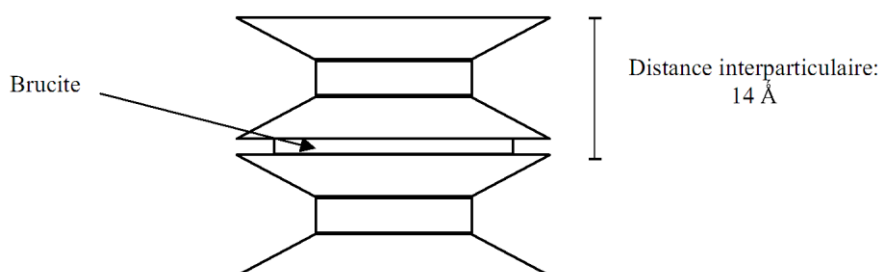


Figure .I.8: Structure d'une chlorite $(OH)_4 (Si Al)_8 (Mg, Fe)_6 O_{20}$ [14].

• La kaolinite (Si_4O_{10}) $\text{Al}_4(\text{OH})_8$

Les kaolinites sont des argiles dioctaédriques de type 1:1 (ou T-O) avec une épaisseur du feuillet de l'ordre de 7,2 Å (Figure 1.9). Quand deux feuillets de kaolinite sont superposés, les O- présents sur la surface supérieure et les H+ de la surface inférieure développent entre eux une liaison hydrogène O-H forte, assurant avec les liaisons de Van der Waals une grande stabilité à un empilement de feuillets vis-à-vis des actions de l'eau. Par conséquent, les particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par l'eau. Les cristallites (association de plusieurs feuillets ; Tessier, 1984) qui résultent de cet empilement, sont des plaquettes rigides dont l'extension latérale est de quelques centaines de nm et qui ne permettent pas la pénétration de l'eau au sein de l'espace interfoliaire et la substitution entre les feuillets. La liaison hydrogène forte entre les feuillets explique l'importance du nombre feuillets par particule de kaolinite (de quelques dizaines à quelques centaines de feuillets solidement liés l'un à l'autre) et la faible valeur de la surface spécifique qui ne dépasse pas généralement 45 m²/g. Les substitutions isomorphes sont peu fréquentes dans ce type d'argiles grâce à la stabilité physique de sa structure, et le pouvoir de fixation des cations ne dépasse pas 15 méq/100g. La kaolinite se forme dans les sols bien drainés, par pH acide surtout en climat subtropical et tropical. Suite à l'addition d'eau entre les feuillets, l'espace interfeuillet augmente à 10 Å et un minéral d'halloysite se forme par altération de la Kaolinite.

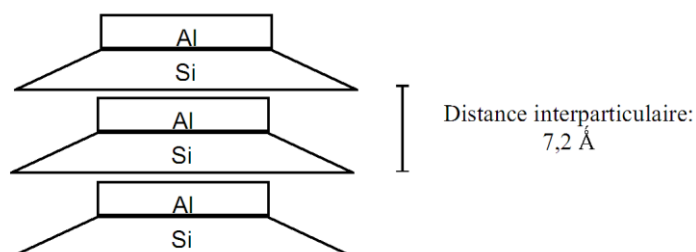


Figure 1.9 : Structure de la particule de kaolinite (Si_4O_{10}) $\text{Al}_4(\text{OH})_8$ [14].

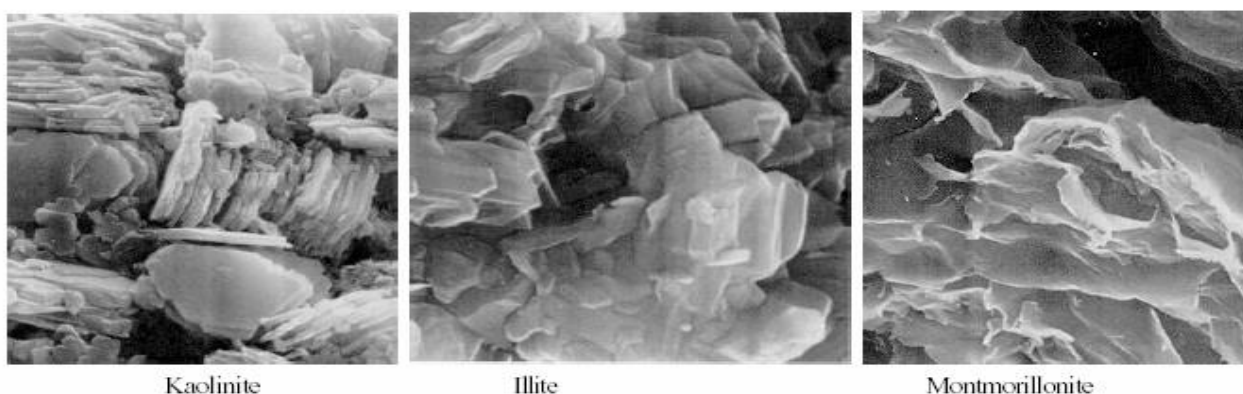


Figure 1.10 : Photographie au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell, 1976) [11].

b).Les Principales Caractéristiques des Minéraux Argileux :

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

b.1/ La Densité De Charge Spécifique : σ est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse [11].

$$\sigma \text{ meq}/m_2 = \text{CEC}/s$$

Deux types de charge existent dans les milieux argileux :

Une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques (Al^{3+} pour Si^{4+} dans la couche tétraédrique ; Mg^{2+} ou Fe^{2+} pour Al^{3+} dans la couche octaédrique), une charge de surface variable selon le pH du milieu liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux.

La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux.

L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraîne l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation du double couche, donc une diminution de son épaisseur.

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

b.2/ La capacité d'échange cationique (CEC) :

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

I.1.2.4 -Organisation des argiles :

Les cristallites élémentaires peuvent, comme nous venons de le voir, s'assembler les uns avec les autres. On dit alors qu'il y a coagulation des cristallites, ou floculation. Les assemblages précédents, qui ont donnés lieu à la classification des argiles, sont des assemblages face-à-face (face to face, FF) des cristallites. Le terme utilisé pour désigner ce type de coagulation est « agrégation », aboutissant à des particules selon notre terminologie. Mais il y a deux autres modes d'association des cristallites :

Côté à face (edge to face, EF) et côté à côté (edge to edge, EE), conduisant à des agglomérats (souvent appelés agrégats par les mécaniciens des sols, terme employé à

juste titre car il y a bien en réalité mélange non homogène de minéraux divers, mais que nous préférons éviter ici puisque l'agrégation conduit à un empilement ordonné). Les agglomérats sont eux-mêmes organisés en assemblages.

A ces différents niveaux d'organisation correspondent quatre types de porosité différents (Figure I-11) : porosité intra- particule (entre deux cristallites FF), porosité inter- particule (ou intraagglomérat), porosité intra- assemblage, et porosité inter- assemblage [3].

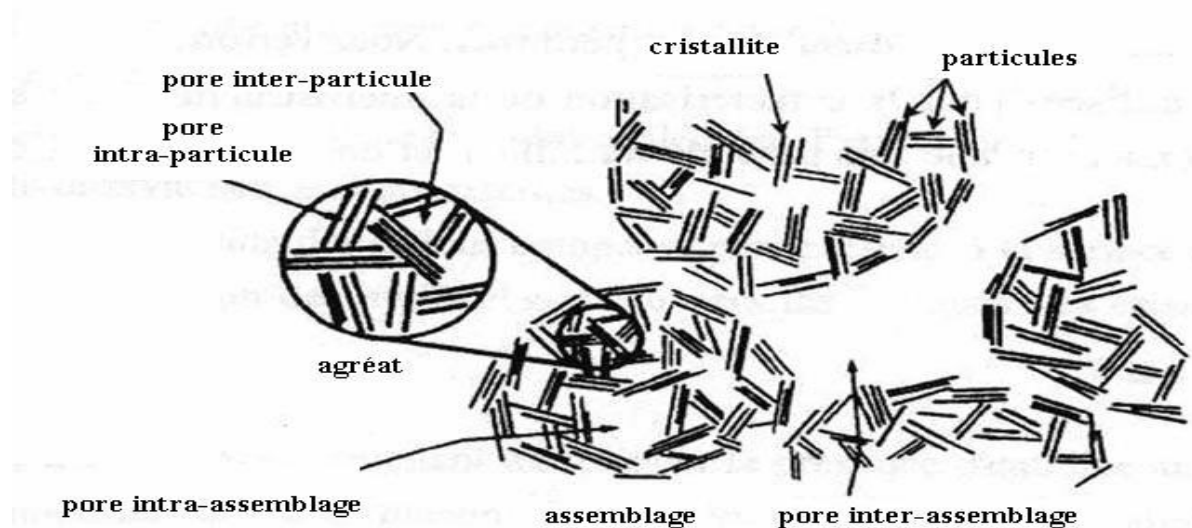


Figure I.11 : Description des différents niveaux de porosité dans les argiles (d'après Griffith et Jos, 1991) [3]

Les deux types de coagulation sont des phénomènes complexes dépendant de la minéralogie et de la forme des cristallites en présence, mais aussi beaucoup du pH de la solution interstitielle (dont va dépendre la charge des cotés), de sa composition et des concentrations des différents ions métalliques.

I.2 -L'interaction eau- argile :

Selon la force des liens unissant les feuillets d'argiles, ceux-ci autorisent ou non l'arrivée d'eau dans l'espace interfoliaire. Nous avons vu, avec la classification des argiles, que chez certaines argiles (kaolinites, illites), l'eau ne peut s'engager entre les feuillets. Ces argiles sont faiblement gonflantes.

En revanche, dans les smectites, la faible liaison entre feuillets fait que chaque espace interfeuillelet peut s'hydrater ; les smectites font partie des argiles dites « gonflantes ». L'amplitude du gonflement dépend de l'état initial, bien sûr, et des contraintes appliquées, néanmoins la prise d'eau peut être telle que le matériau voit son volume multiplié par vingt.

Ainsi, dans certaines argiles, l'eau peut littéralement s'engouffrer dans l'espace interfeuillelet. Les feuillets s'écartent, et la liaison entre deux feuillets parallèles doit alors

être assurée différemment, par exemple grâce à des liens transverses (associations EF ou EE). Il en résulte une réorganisation complète de la matrice solide (Tessier, 1978). Cette réorganisation est sans doute, le premier des deux points essentiels permettant de distinguer le gonflement des argiles gonflantes du gonflement d'un autre matériau poreux. Le deuxième fait essentiel du gonflement est que l'interaction eau-argile est liée aux ions présents dans l'eau. Les cations présents en solution sont attirés vers les surfaces des feuillets d'argiles chargées négativement ; ils sont par ailleurs repoussés de ces surfaces par la force osmotique qui tend à uniformiser la concentration en cations dans la solution. Il résulte de ces deux effets opposés une certaine distribution des cations au voisinage des feuillets. De même, les anions, qui sont repoussés électrostatiquement par les feuillets, mais repoussés vers ceux-ci par osmose, ont une distribution spatiale particulière au voisinage des feuillets. Il en résulte que la distribution des ions dans l'espace interfoliaire est en général différente de celle dans les gros pores, ce qui se traduit par une différence entre les pressions osmotiques « internes » et « externes » aux particules, et donc par des forces exercées sur les feuillets et qui tendent à les écarter. Nous verrons plus loin les modèles utilisés pour estimer ces pressions osmotiques. Néanmoins, cela permet de comprendre l'origine du gonflement des argiles.

La différence entre les pressions osmotiques « internes » et « externes » aux particules est souvent appelée « pression de gonflement microscopique ». Nous l'étudierons dans le cas simple de feuillets parallèles. Nous verrons qu'elle est liée, entre autre, à l'écartement entre les feuillets et à la concentration de la solution [3].

I.3 -Propriétés macroscopiques :

I.3.1 -Argiles tendres et argiles raides

Du point de vue du comportement et des propriétés mécaniques, les roches argileuses se situent entre les sols et les roches. Certaines roches argileuses sont «tendres » et très déformables ; on parle alors d'argiles « plastiques ». D'autres sont peu déformables, et présentent un comportement plus fragile que ductile au delà de la limite d'élasticité : ces argiles sont dites raides.

De manière générale, les argiles dites plastiques présentent une teneur en argile et en eau importante, tandis que les argiles « raides » sont marquées par la présence de carbonates et de quartz qui leur confèrent ce type de comportement. Mais cette tendance n'est pas toujours confirmée : le caractère déformable ou non des roches argileuses est lié à la minéralogie mais aussi à l'état de compaction du matériau. A grande profondeur (quelques centaines de mètres), les argiles sont souvent très compactes. Leur porosité et

leur teneur en eau sont alors faibles, tandis qu'elles sont peu déformables et que leur résistance mécanique est élevée.

Ainsi, minéralogie, teneur en eau et profondeur du dépôt sont des indicateurs forts pour le classement des roches argileuses parmi les argiles plastiques ou raides. Il est toutefois difficile de fixer précisément ces critères. Rousset (1988) et Ghoreychi (1997) ont néanmoins tenté une analyse des corrélations entre le comportement mécanique et les caractéristiques de la roche. Il ressort de leurs analyses que :

- La transition entre le matériau tendre et le matériau induré peut être caractérisée par le module d'Young, la résistance mécanique et le caractère ductile ou fragile.
- Le module d'Young est bien corrélé avec la teneur en eau et donc la porosité [3].

I.3.2 -Propriétés mécaniques et caractéristiques des argiles :

Les roches argileuses présentent toujours, à des degrés divers, les comportements suivants : plasticité, viscoplasticité, endommagement. Du moins les essais mettent-ils en évidence des déformations irréversibles et, par suite, des comportements que l'on peut décrire par ces termes.

Du point de vue du comportement à court terme, il est souvent difficile de juger s'il s'agit de plasticité ou d'endommagement. Les deux théories permettent en général de décrire les phénomènes observés, et le choix de l'une ou de l'autre dépend souvent de l'emploi qu'on veut faire des lois ainsi mises en place. Ainsi, bien souvent, c'est la plasticité qui prime dans les lois utilisées au niveau des calculs d'ouvrages.

Pour les argiles raides, on peut penser qu'il s'agit plutôt d'endommagement dans la mesure où :

- Les essais rapides de laboratoire mettent généralement en évidence une augmentation de volume irréversible, signe pour les roches de l'apparition d'un endommagement diffus ;
- Les déformations irréversibles s'accompagnent souvent d'une perte de résistance et des propriétés élastiques (mais tel n'est pas toujours le cas pour les argiles raides) ;
- Des chargements plus marqués conduisent à la rupture, qu'on peut évidemment plus facilement qualifier d'endommagement que de plasticité.

En fait, les mécanismes microscopiques qui se traduisent par les déformations irréversibles ne sont pas toujours bien compris pour les roches, et le choix de la bonne théorie à appliquer est délicat. Il est en général difficile de juger, entre plasticité et endommagement, quel phénomène est effectivement le bon. Ces phénomènes sont parfois couplés dans les modèles rhéologiques. Parfois aussi, l'endommagement est décrit en utilisant le formalisme de la plasticité.

Par ailleurs, pratiquement toutes les roches argileuses présentent un comportement différé irréversible (Rousset, 1988). Ce comportement est très marqué pour des argiles plastiques, nettement moins pour des argiles raides. Du fait de l'existence de déformations résiduelles après décharge, il ne s'agit pas (du moins pas seulement) de viscoélasticité, mais plutôt de viscoplasticité. Cette viscoplasticité ne doit pas non plus être confondue avec la consolidation ou le comportement différé lié à la dissipation de la pression de pores.

I.4 Phénomène de Gonflement :

I.4.1-Pourquoi les sols gonflent-ils et se rétractent-ils? [14] :

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

Les phénomènes de **Capillarité**, et surtout de **succion**, sont à l'origine de ce comportement.

Les variations de volume des sols argileux répondent donc à des variations de teneur en Eau (on notera que des variations de contraintes extérieures – telles que les surcharges - peuvent, par ailleurs, également générer des variations de volume). Tous les sols présentent la particularité de contenir de l'eau en quantité plus ou moins importante:

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

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

I.4.2-Pourquoi spécifiquement les sols argileux:

Les caractéristiques de la structure interne des minéraux argileux expliquent leur comportement face aux variations de teneur en eau :

- Ils présentent en effet une structure minéralogique « en feuillets », à la surface desquels les molécules d'eau peuvent s'adsorber sous l'effet de différents phénomènes physico-chimiques, et ce de façons d'autant plus marquées que les grains du sol, fines et aplaties, ont des surfaces développées très grandes. Il en résulte un gonflement, plus ou moins réversible, du matériau. L'eau adsorbée assure les liaisons entre les grains et permet les modifications de structure du sol lors des variations de teneur en eau ;
- Certains grains argileux peuvent eux-mêmes voir un changement de volume par variation de la distance entre les feuillets argileux élémentaires, du fait d'échanges d'ions entre l'eau interstitielle et l'eau adsorbée ;
- Les pores du sol sont très fins et accentuent les phénomènes de capillarité.

Toutes les familles de minéraux argileux ne présentent pas la même prédisposition au phénomène de retrait-gonflement. L'analyse de leur structure minéralogique permet d'identifier les plus sensibles. Le groupe des smectites et, dans une moindre mesure, le groupe des interstratifiées (alternance plus ou moins régulière de feuillets de nature différente) font partie des plus sujets au phénomène (on parle d'argiles gonflantes).

Cette sensibilité est liée :

- A des liaisons particulièrement lâches entre les feuillets constitutifs, ce qui facilite l'acquisition ou le départ d'eau. Cette particularité permet à l'eau de pénétrer dans l'espace situé entre les feuillets, autorisant ainsi de fortes variations de volume (on parle de gonflement interfoliaire ou intercrystallin) ;
- Au fait que ces argiles possèdent une surface spécifique particulièrement importante (800 m² / g pour la montmorillonite qui appartient aux smectites, 20 m²/g pour la kaolinite), et que la quantité d'eau adsorbée que peut renfermer un sol est directement fonction de ce paramètre.

Les argiles non gonflantes sont ainsi caractérisées par des liaisons particulièrement lâches et par une surface spécifique de leurs grains peu développée.

Pour une variation de teneur en eau identique, l'importance des variations de volume d'un sol argileux « gonflant » dépend aussi :

- Des caractéristiques « initiales » du sol, notamment la densité, la teneur en eau et le degré de saturation avant le début de l'épisode climatique (sécheresse ou période de pluviométrie excédentaire). Ainsi, l'amplitude des variations de volume sera d'autant plus

grande que la variation de teneur en eau sera marquée. À ce titre, la succession d'une période fortement arrosée et d'une période de déficit pluviométrique constitue un facteur aggravant prépondérant ;

• De l' « histoire » du sol, en particulier de l'existence éventuelle d'épisodes antérieurs de chargement ou de dessiccation. Par exemple, un sol argileux « gonflant » mais de compacité élevée (sur-consolidation naturelle, chargement artificiel, etc.) ne sera que peu influencé par une période de sécheresse. À contrario, un remaniement des terrains argileux (à l'occasion par exemple de travaux de terrassement) pourrait favoriser l'apparition des désordres ou être de nature à les amplifier.

I.5- Description du phénomène de gonflement :

Plusieurs auteurs ont expliqué le phénomène du gonflement de diverses manières :

- **Selon Norrish (1954)** : le gonflement se développe selon deux processus distincts, le gonflement cristallin dans le premier stade et le gonflement osmotique dans le deuxième stade
 - Le gonflement cristallin dépend de l'énergie d'hydratation des cations intercouches. La distance entre les feuillets atteint à ce stade 30Å , à ce niveau la double couche n'est pas encore complètement formée.
 - Au deuxième stade, le gonflement osmotique est normal au plan des particules, selon les mesures, le gonflement est proportionnel à la distance entre particules, cette dernière passe de 30Å à 130Å et même plus, suite au gonflement.
- **Seed et al (1961)** : travaillant sur les argiles reconstituées, ont attribué le gonflement à deux phases, une phase mécanique et une phase physico-chimique. Ces auteurs ont observé que les échantillons d'argile reconstituée à la même densité par le compactage statique ont donné un gonflement approximativement le double de celui donné par les échantillons reconstitués par malaxage. Donc les différences dans le mode de préparation des échantillons résultent en des structures différentes (contribution des effets mécaniques).
- **Van Olphen (1963)** : a expliqué le processus de gonflement par deux étapes :
 - La première étape serait due à la capacité d'absorptions monocouche successives d'eau à la surface des particules.
 - La seconde étape serait quant à elle due aux forces de répulsion qui sont dominants dans ce stade.
- **Chang et Warkentin (1966)** : ont divisé le gonflement en deux composantes
 - Un gonflement structural, les pores ne sont pas totalement remplis d'eau.

- Un gonflement normal, l'échantillon est totalement saturé (lorsque l'affinité à l'eau de la double couche est satisfaite, cette couche est dite normale).
- **Wong et Yong (1973)** : ont montré expérimentalement que l'évolution de la pression de gonflement est rapide au début de l'essai et s'atténue avec le temps.
L'accroissement rapide est dû à l'hydratation des feuillets d'argiles et des cations échangeables (cas du gonflement cristallin de Norrish) et à la tendance des feuillets d'argiles à se redresser (gonflement mécanique de Terzaghi). Après obturation des pores capillaires, l'accroissement devient graduel, lequel est attribué au gonflement osmotique.
- **Popescu (1986)** : a suggéré deux types de gonflement, un gonflement intercrystallin (interparticule) et un gonflement intracrystallin.
 - Le gonflement intercrystallin peut affecter tous les types de minéraux argileux, ce gonflement est engendré par relâchement des tensions capillaires, après mouillage d'un sol non saturé.
 - Le gonflement intracrystallin est une caractéristique des minéraux de type montmorillonite, dans ce cas de gonflement, l'eau pénètre non seulement entre les cristaux mais aussi entre les couches individuelles qui forment le cristal.
- **Mouroux et al (1988)** : ont distingué deux gonflements, un gonflement intraparticulaire (interfoliaire) et un gonflement interparticulaire (figure I.12.).
 - Le gonflement interfoliaire résulte de la cassure des faibles liaisons entre les feuillets des particules d'argile, et permettant ainsi l'acquisition d'eau au sein de la structure des particules, quoique ce gonflement est assez rapide, dont l'amplitude est en revanche très notable.
 - Le gonflement interparticulaire résulte de l'apport d'eau supplémentaire en écartant les plaquettes (assemblage de feuillets) les unes des autres. Sa réaction est lente (peut durer des années, même lorsque la succion devient nulle). Contrairement au gonflement interfoliaire, le gonflement interparticulaire a une ampleur assez limitée et affecte toutes les argiles [7].



Figure.I.12 : Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation D'après Popescu (1986) [1],

○ **Alonso et al (1989) :** Gens et al; ont subdivisé le gonflement en deux phases qui peuvent exister simultanément et agir l'une sur l'autre, le gonflement primaire et le gonflement secondaire.

➤ Le gonflement primaire est relativement rapide et commence immédiatement au contact du sol avec l'eau, ce gonflement est dit macroscopique et est contrôlé par la perméabilité, il est lié au degré de saturation (S_r). Ce premier processus est associé avec l'écoulement de l'eau au sens de la loi de Darcy.

➤ La seconde phase du gonflement dite microscopique, résultant de l'hydratation progressive des minéraux actifs, est lente. Ce gonflement est affectée par le type des minéraux présents dans le fluide interstitiel, et il est influencé par la pression de confinement.

○ **Fleureau et al (1990) :** ont noté que l'existence simultanée de ces deux mécanismes qui interagissent l'un sur l'autre rend l'étude de la cinétique du phénomène de gonflement très complexe.

Au vu de ces considérations, l'examen des différentes approches initiées plus haut indique l'existence de deux types de gonflement, le gonflement mécanique et le gonflement physicochimique, bien que ces deux gonflements agissent simultanément, le gonflement mécanique (cristallin, structural, macroscopique, interfoliaire) semble être dominant dans le premier stade tandis que le gonflement physico-chimique (osmotique, interparticule, microscopique, normal) l'est dans le deuxième stade.

Arbitrairement, le gonflement est divisé en un gonflement primaire et un gonflement secondaire (Holtz et Gibbs, 1956 ; Chen, 1988). La courbe de la (figure I.13), représente la

variation relative de la hauteur en fonction du logarithme du temps, dans laquelle on distingue les deux phases de gonflement :

- Gonflement primaire : Qui prend place très tôt, sa fin est caractérisée par un point d'inflexion permettant le changement de l'allure de la courbe.
- Gonflement secondaire : Qui est caractérisé par la portion linéaire de la courbe ($\Delta h / h_0 \text{ Log } (t)$).

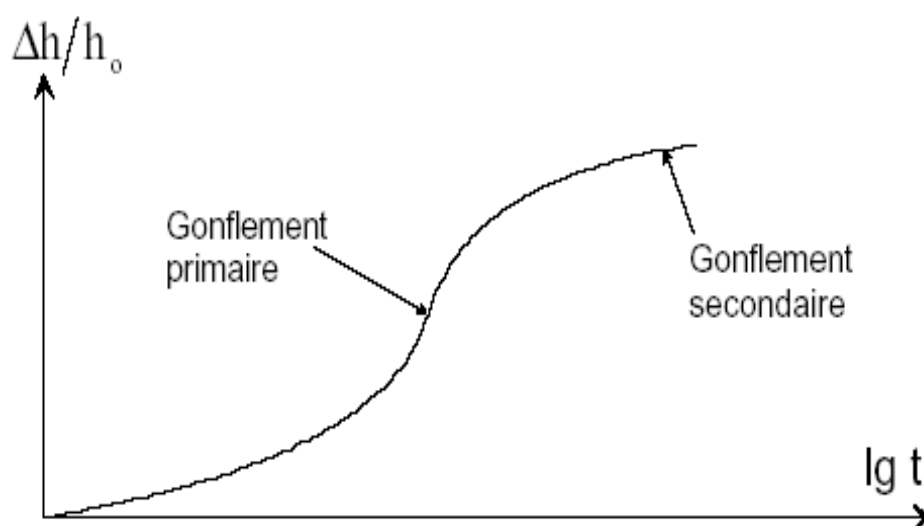


Figure I.13: Courbe du gonflement en fonction du temps (Selon Chen, 1988, [4])

I.6- Facteurs intervenant dans le phénomène de gonflement des argiles:

Les principaux facteurs régissant le gonflement des argiles peuvent être classés en deux catégories, les facteurs mécaniques et les facteurs physico-chimiques (Seed et al 1961; Mitchell, 1973).

I.6.1- Composantes mécaniques du gonflement

Dans la masse du sol gonflant, sous l'action d'un chargement, certaines particules se trouvent déformées selon deux chemins de déformations :

- ✚ La compression volumétrique des particules solides, souvent négligeables.
- ✚ la courbure des particules a un effet sur le changement de volume souvent appréciable.

L'approche mécanique du gonflement est analogue à l'extension mécanique et est reliée à l'énergie emmagasinée dans la structure solide (Terzaghi, 1941), dans cette approche l'imbibition par l'eau est attribuée à un gradient hydrostatique induisant un écoulement de l'eau à travers l'échantillon, ce qui provoque une diminution de la succion matricielle et par conséquent un déchargement de la masse du sol

I.6.2-Composantes physico-chimiques du gonflement :

L'approche physico-chimique est basée sur la théorie de la double couche de Gouy-Chapman 1910, cette approche tient compte des forces interparticulaires qui sont fonction:

- ✚ Des forces électriques
- ✚ De la texture de la surface des particules.
- ✚ De la composition du fluide interstitiel.

Les effets physico-chimiques sont fonctions des propriétés d'hydratation et de l'absorption des cations. En effet, les particules d'argiles ont une texture de surface qui permet une forte liaison à l'eau. Cette affinité à l'eau est responsable du gonflement du sol.

De plus, la surface des particules argileuses possède une charge négative non compensée afin d'assurer une neutralité électrique des charges, les cations sont attirés vers la surface de ces particules, ce qui va conduire à une concentration en cation dans la couche adsorbée (au voisinage des particules) qui est supérieure à celle de l'eau libre du sol. Cette différence dans la concentration ionique conduit à l'apparition d'une succion osmotique, engendrant un écoulement de l'eau de la zone de faible concentration vers la zone à forte concentration. Les cations et les molécules d'eau prennent place entre les particules d'argiles et provoquent l'expansion de la masse du sol.

I.7- Conclusion :

Cette partie a été consacrée à la description de phénomène de gonflement des argiles (sols gonflants), nous avons utilisé pour cela différentes échelles d'étude. Nous avons abordé ensuite la complexité du système "eau-argile", comme nous avons vu les diverses descriptions du phénomène de gonflement. Donc à partir de cette étude on peut conclure que, les argiles sont des matériaux qui diffèrent nettement des matériaux granulaires (sables, graviers...) à cause des interactions entre les éléments qui les constituent à diverses échelles de comportement et en raison de la présence de la couche adsorbée dont les caractéristiques physiques et mécaniques sont particulièrement différentes de celles d'une eau ordinaire.

CHAPITRE II: INTERVENTION SUR SITE

II- Intervention sur site :

II.1-Introduction :

Nous avons vu dans le chapitre précédent la définition des argiles et les différentes descriptions de phénomène de gonflement, dans ce chapitre nous procédons à étudier des échantillons d'un sol argileux prélevé de la ville d'In Amenas dans le cadre de l'étude géotechnique pour le projet de réalisation d'une Centrale électrique en turbines à gaz 6x5 MW,

Aussi, nous utilisons comme base de comparaison les résultats des deux méthodes appliqués aux sols d'in amenas afin de comparer les résultats de trois études appliquées et réalisées dans cette région.

II.2- Situation du site d'intervention :

Le terrain d'assiette pour le futur projet « Centrale électrique en turbines à gaz 6x5 MW » Figure II.1, se trouve à la sortie de la ville d'In Amenas, au bord de la route nationale N°3 allons vers ILLIZI et à proximité de la raffinerie de SONATRACH le plan de situation ci-dessous Figure.II.1.

Le terrain est limité :

Au Nord : par la route nationale n° 3.

Au Sud : par un terrain vague et RN°3.

À l'Est : par un terrain vague et la base DP SONATRACH.

À l'Ouest : par la route et l'entreprise GTP [8].





Figure II.1 : vue générale de terrain du projet [8].



Figure II.2 : Plans de situation de terrain du projet [8].

II.3- Caractéristiques De La Région D'In-Amenas :

II.3.1.-Situation :

La région d'**In-Amenas** est située à 1600 km au sud-Est de la capitale Alger, elle est repérée par les attitudes 28-05 Nord et longitudes 09-63 Est. La région se trouve à une altitude de 561 mètres et se caractérise par une morphologie plutôt aplatie avec absence quasi-totale de drainages naturels superficiels Figure II.3.



Figure II.3- Plan situation d'In Amenas

La région est à climat aride, où la saison estivale est longue, sèche et chaude tandis que l'hiver est y doux et plus ou moins pluvieux. La pluviométrie est très faible inférieur à 30 mm/an, de répartition instable à longueur d'année. Les températures moyennes sont comprises entre 10 et 32 (Derriche, Iguechtal et Tas, 1997), avec une grande différence de la moyenne des températures d'été et celles d'hiver, ce qui montre l'importance de la chaleur en été. Telles toutes les régions du Sahara, la région d'In-Amenas subit le dessèchement que produit le vent sec et chaud (sirocco) en été ainsi que le désagrément du vent d'hiver qui est lui, sec et froid. Le sirocco sévit en moyenne de 15 jours par année, accélérant la baisse du degré hygrométrique (qui peut atteindre 20%) [5].

II.3.2-Contexte Géo-environnementale :

II.3.2.1- Géologie

Les formations géologiques principales rencontrées dans cette région appartiennent à la série des Argiles de **ZARZAÏTINE**, rattachée à la période triasique ; il s'agit donc de terrains sédimentaires très anciens; région qui renferme les plus importants gisements pétroliers du pays. Des sondages pétroliers ont montré que cette formation d'argile a une puissance supérieure à 180 m et surmonte la formation carbonifère.

Les multiples études de sols réalisées dans la région ont révélé la présence d'un sol composé essentiellement d'argile rouge bariolée (mauve, jaune, vert et bleu), très compacte, couverte en surface par une couche altère. Cette couche d'altération est le produit de l'action conjuguée du soleil, de la pluie et des vents de sable.

Ces phénomènes thermo clastiques sont à la base des fractures subverticales repliés de sable existant dans le sous-sol. Le vent apporte du sable qui est entraîné par les faibles pluies dans les fissures qu'il colmate.

Etant donné que les teneurs en eau sont très réduites, variant entre 2% et 14% et d'une moyenne de 8% (Romero, Derriche, Lamara2005), ces argiles présentent un degré de succion très élevé. Pour représenter les caractéristiques de rétention de ces argiles, nous avons emprunté la courbe de rétention d'eau (figure II.4) établie par Lamara& al.2005,

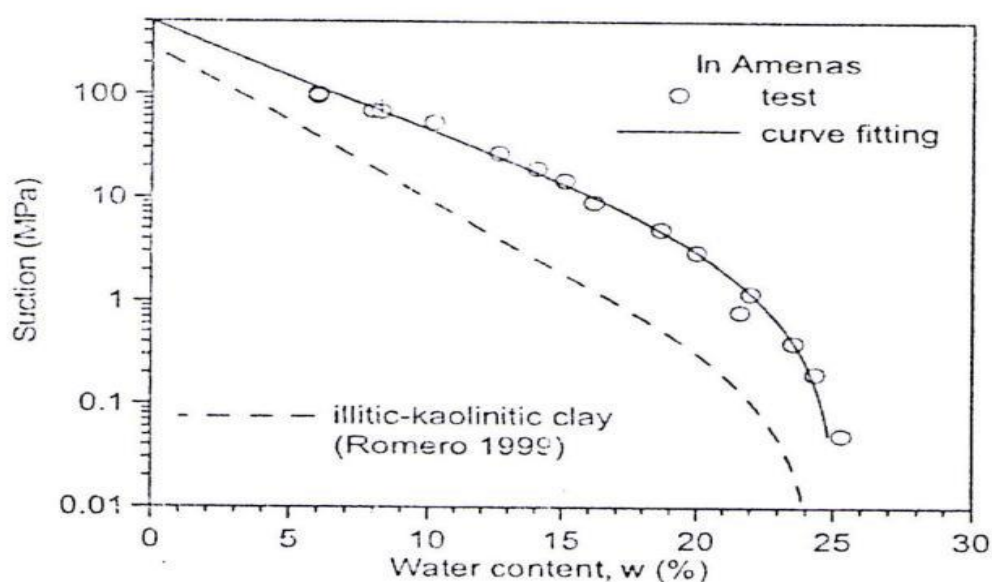


Figure II.4 : Courbe de rétention d'eau des argiles d'In-Amenas (Etablie par Lamara et al. 2005) [6]

II.3.2.2- Stratigraphie :

De nombreuses études de sol ont été effectuées sur les sols d'In-Aménas pour le compte de compagnies nationales implantées dans la région. Ces études ont été réalisées par des laboratoires nationaux et étrangers dans le cadre de conception d'ouvrages ou dans le cadre d'expertises. La synthèse de ces études montre que les argiles de la région se présentent suivant une stratigraphie assez régulière et globalement homogène selon à de 5 couches :

- Une couverture sableuse ou couche d'altération de quelques centimètres à quelques décimètres par endroits.

- Un horizon supérieur constitué de matériau limono- argileux de couleur rougeâtre (ARG.2.) Cet horizon épais de 1.5 m en moyenne contient des mud-cracks. Par endroits ce matériau présente une couleur violette (ARG.3). L'homogénéité de cet horizon en plan est interrompue seulement par de légères variations latérales. Il se présente par endroits plus riches en altérations jaunâtres et en argile.
- Un horizon argileux compact presque dépourvu de fractions sableuses. Cet horizon de couleur rougeâtre est légèrement plus sombre que la couche supérieure. Dans les tranchées, ce matériau se présente en petits blocs compacts séparés les uns des autres par de nombreuses fractures dans les faces.
- Sont ondulées et polies, ce qui témoigne de la grande sur consolidation de cette argile (ARG1). On trouve dans cet horizon de la litho types bariolés de vert clair parfois argileux parfois sableux se présentant sous forme de lentilles éparpillées ou en noyaux concentrés ou en étages discontinus.
- Un étage argileux verdâtre relativement mince qui apparaît dans les tranchées à une profondeur de 3 à 4 mètres pas toujours bien délimité aux bords (ARG.4.).
- Un horizon inférieur constitué d'argile limono- sableuse rougeâtre identique à l'horizon argileux compact mais visiblement moins compact et plus fracturé.

II.3.2.3 - Contexte Hydro-Climatique :

La région de In amenas est caractérisée par un climat de type saharien hyper-aride, chaud en été, froid et faiblement humide en hiver. Les températures dépassent les 35°C en moyenne et peuvent atteindre 48°C pendant la période de Juillet et Août.

Les pluies sont rares mais tombent souvent sous forme d'averses. La pluviométrie est inférieure à 35 mm/an, ce qui conduit à des eaux de surface négligeables.

Les écarts thermiques entre le jour et la nuit et entre les différentes saisons sont très contrastés ce qui soumet le sol à des chocs thermiques importants.

II.4- Sols d'In-Amenas [5] :

II.4.1- Minéralogie

Les analyses par diffraction aux rayons X de 3 échantillons ont révélé que ces argiles sont à prédominance de kaolinite avec présence, en moindre importance d'interstratifiés "illite-vermiculite" et de silice cristallisée en minéraux associés. **(Derriche Z et al. 2002).**

II.4.2-Composition Chimique des Minéraux

Plusieurs échantillons d'argile font l'objet d'une analyse chimique. Les résultats de ces analyses (Tableau II.1) font ressortir la forte proportion de silice (>50%) comparée à celle de l'alumine (<20%). Ces proportions donnent aux échantillons de testé des rapports

silice alumine (Al_2O_3) et silice-sesquioxydes comparables à ceux des sméctites (**Caillère et al, 1988**). Ce résultat semble indiquer la présence, en proportion non négligeable, des minérales argiles d'In-Amenas. On peut grossièrement estimer la proportion illite présente dans les sols d'In-Amenas du 10% à 40 %. Cela en considérant qu'une illite pure pourrait contenir de 9 % à 10 % de potasse.

D'autre part la forte proportion enregistrée pour la silice souligne, comme il a été noté lors des analyses minéralogiques, la présence de silice en minéraux associés [5].

Tableau II.1 : Composition chimique des minéraux [5].

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	H ₂ O	SO ₃	SiO ₂ /ALO ₂
ARG1	69	12.69	-	0.57	5.69	-	0.67	1.8	-	-	6.81	-	9.21
ARG2	56.3	15.12	-	1.54	8.32	-	0.66	2.8	-	-	9.88	-	6.81
ARG3	58.7	19.32	-	1.23	7.0	-	0.65	1.3	-	-	9.5	-	5.15
ARG4	56.2	20.44	-	1.53	4.81	-	0.67	2.4	-	-	10.8	-	4.66

II.4.3.DESCRPTION LITHOLOGIQUE (Géologique) DU SOL DE FONDATION [8]:

Le site réservé au projet est situé dans un contexte de FORMATIONS SEDIMENTAIRES TRES ANCIENNES ; il s'agit de la formation de Zarzaitine rattachée à la période triassique.

Durant l'exécution des six (06) sondages arrêtés à 10 et 20m de profondeur, les deux formations principales rencontrées sont généralement les sables et les argiles sous des aspects et des couleurs variés.

Une stratigraphie générale du terrain de l'étude peut être présentée selon la succession de haut vers le bas suivant :

- Argile sableuse peu plastique rouge ocre de 0.00 jusqu'à un maximum de 6.5 m de profondeur ;
- Sable limono-argileux de 05 jusqu' à 10 m ;
- Argile verte –violette débitant en grave rencontrée dans le sondage N°1 entre 7.5 et 8.00 m et dans le sondage N° 6 à partir de 14 m jusqu'à 20 m ;

Des échantillons prélevés (Figure II.5) de site d'étude à une profondeur sont comprise entre 1m à 09m à partir de 06 sondages réalisés par N. MOUDJAHID Ingénieur au laboratoire des travaux publics de sud LTPS à l'intérêt de SONALGAZ, ces échantillons prélevés sont soumis à un programme d'essais au laboratoire dont le but est de définir les caractéristiques géotechniques des échantillons de sol prélevés à savoir :

- Analyses Granulométriques par Tamisage et par Sédimentation,
- Détermination des Limites d'Atterberg ou de Consistance,
- Analyses Chimiques Sommaires,
- Mesures de Densités Absolues et Apparentes,
- Essais de Cisaillement Direct,
- Essais de Compressibilité,
- Essais Géophysiques,



Figure II.5 : Caissez D'échantillons [8].

Les coordonnées des sondages sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.2 [8] : Coordonnées GPS des Sondages.

N° SOND.	X	Y
SC-01	N=28°02'43.5''	E=09°32' 17.2'
SC-02	N=28°02'43.4''	E=09°32' 16.3'
SC-03	N=28°02'40.7''	E=09°32' 14.6'
SC-04	N=28°02'46.6''	E=09°32' 17.3'
SC-05	N=28°02'44.5''	E=09°32' 15.4'
SC-06	N=28°02'45.1''	E=09°32' 14.1'

II.4.4-ESSAIS PHYSICO-CHIMIQUES ([5]-[8]-[41][42][43]) :

II.4.4.1- ANALYSES GRANULOMETRIQUES :

a) Analyse granulométrique par tamisage :

Elle se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments supérieurs à 80 μm (NF P94-056) et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à 80 μm (NF P94-057).

L'analyse granulométrique de sol se fait en utilisant une série de tamis (NF P94-056).

- Conduite de l'essai :

Les opérations préalables à effectuer sont les suivantes :

1. détermination de la teneur en eau **W** sur fraction de l'échantillon. La teneur en eau est déterminée en pesant l'échantillon dans son état humide naturel (Mh) et après séchage à 105°C (Ms). Par convention, la teneur en eau est égale au quotient du poids d'eau contenu dans l'échantillon par le poids du sol sec.
2. lavage de l'échantillon humide sur un ou plusieurs tamis d'ouverture décroissante afin de protéger le tamis d'ouverture la plus faible (généralement le tamis de 0.08mm).
3. les eaux de lavage sont récupérées dans le cas où l'on souhaite effectuer des analyses complémentaires sur les éléments fins. Dans le cas contraire. Ces eaux sont éliminées.
4. les différents refus ainsi isolés sont regroupés et mis à sécher à l'étuve à 105°C (figure.II.6).



Figure II.6 : Essai de Granulométrie par tamisage [5].

La granulométrie est exprimée par une courbe granulométrique qui donne la dimension moyenne des grains exprimée sous forme pourcentage du poids total du matériau.

L'analyse granulométrique du sol pour les particules inférieures ou égales à 80 μm se fait par la sédimentation.

b) Analyse granulométrique par sédimentation (NF P94-057) :

La sédimentation c'est un essai complet l'analyse granulométrique par tamisage du sol (norme NFP 94- 056) ce qui peut être nécessaire à la description et la classification.

La méthode utilise le fait que dans le milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des particules fines est en fonction de leur dimension.

1) But : c'est la détermination de la distribution pondérale de la taille des particules de sols de dimension inférieure à 0.08mm.

2) Principe de l'essai de sédimentation :

-Tamiser l'échantillon de sol par lavage (passant au tamis 0.08mm), et récupérer le tamisât, sécher l'échantillon dans une étuve jusqu' au poids constant, prendre à 80g + 10g de tamisât sec. Imbiber la prise d'essai dans une éprouvette cylindrique en verre de 2litre contenant un mélange d'eau distillée ou déminéralisée et solution à 5% d'hexamétaphosphate de sodium ($\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6, 10 \text{H}_2\text{O}$);

- laisser imbiber pendant au moins 15 heures à température ambiante;

-agiter vigoureusement la suspension au moyen d'un agitateur manuel, retirer l'agitateur manuel et déclencher au même instant le chronomètre (début de l'essai), Plonger le thermomètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre; procéder à la prise des lectures du densimètre et de la température aux temps suivant(en minutes): 0.5 -1 -2 -5 – 10 -20 – 80 – 240- 1440) calculer le pourcentage des tamisas et complète la courbe granulométrique (Figure II.7).



Figure II.7: Essai de Sédimentation [5].

Les résultats de cet essai sont raccordés avec les résultats de l'essai de la granulométrie dans la courbe granulométrique si dessus.

3) Calcule résultat :**➤ Calcul du pourcentage des particules non décantées**

Le pourcentage des particules qui sont en suspension est donné par :

$$P = \frac{V_s}{m} \times \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \times \rho_w \left[\frac{\rho_t}{\rho_w} - 1 \right]$$

P : pourcentages des particules inférieure ou égale à D.

V_s : Volume de la suspension (1 litre)

m : Masse de la prise d'essai (20 grammes)

ρ_s: Masse volumique des grains solides

ρ_w: Masse volumique de l'eau.

ρ_t: Masse volumique de la suspension au temps t.

➤ **Diamètre équivalent D:**

Le diamètre des particules qui sont en suspension à l'instant t est donné par équation suivantes :

$$D = \left[\frac{1}{g} \times \frac{18n}{\rho_s - \rho_w} \times \frac{Ht}{t} \right]^{0.5}$$

D : Diamètre équivalent des particules.

g : l'accélérateur de la pesanteur.

n : la viscosité de dynamique de la solution.

ρ_s: Masse volumique des grains solides

ρ_w: Masse volumique de l'eau distillée à la température T :

$$\rho_w = 999 \text{ kg/m}^3 \text{ } 12^\circ\text{C} \leq T \leq 18^\circ\text{C};$$

$$\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3 \text{ } 18^\circ\text{C} < T < 24^\circ\text{C};$$

$$\rho_w = 997 \text{ kg/m}^3 \text{ } 24^\circ\text{C} \leq T \leq 30^\circ\text{C};$$

H_t: Profondeur effective de centre de poussée de densimètre à l'instance t.

t: le temps écoulé depuis le début de l'essai.

Les résultats des analyses granulométriques montrent qu'on est en présence de deux catégories de sol (**tableau II.3**) :

1. Une argile limoneuse située entre l'intervalle 1 et 5 mètres de profondeur avec un pourcentage d'éléments inférieurs à 1-mm variable entre 100 et 99%.

Le taux de fines varie entre 95 et 99% dénotant des sols fins. La fraction argileuse est comprise entre 53 et 57%.

2. Un sable limono-argileux situé entre l'intervalle 5 et 9 mètres de profondeur, les éléments fins présentent un taux variant entre 15 et 34% dénotant qu'on est en présence de sols grenus.

Tableau II.3: Résultat des Analyses Granulométrique de Sol Support [8].

Tamis (mm)		Tamisats (%)						
		S2 (2-4m)	S3 (2-3m)	S4 (2-4m)	S5 (2-4m)	S5 (5-6m)	S5 (7-9m)	S6 (1-5m)
ANALYSE GRANULOMETRIQUE	Inf. à 50 mm							
	Inf. à 31.5m							
	Inf. à 20mm							
	Inf. à 10mm							
	Inf. à 5mm						99	
	Inf. à 2mm				100		95	100
	Inf. à 1mm				99	100	92	99
	Inf. à 0.4	100	100	100	99	99	87	99
	Inf. à 0.2mm	99	99	99	98	92	75	99
	Inf. à 0.1mm	98	99	99	97	84	47	97
	Inf. à 0.08mm	96	98	99	96	78	34	95
	Inf. à 0.002mm	57	53	56	46	41	6	57

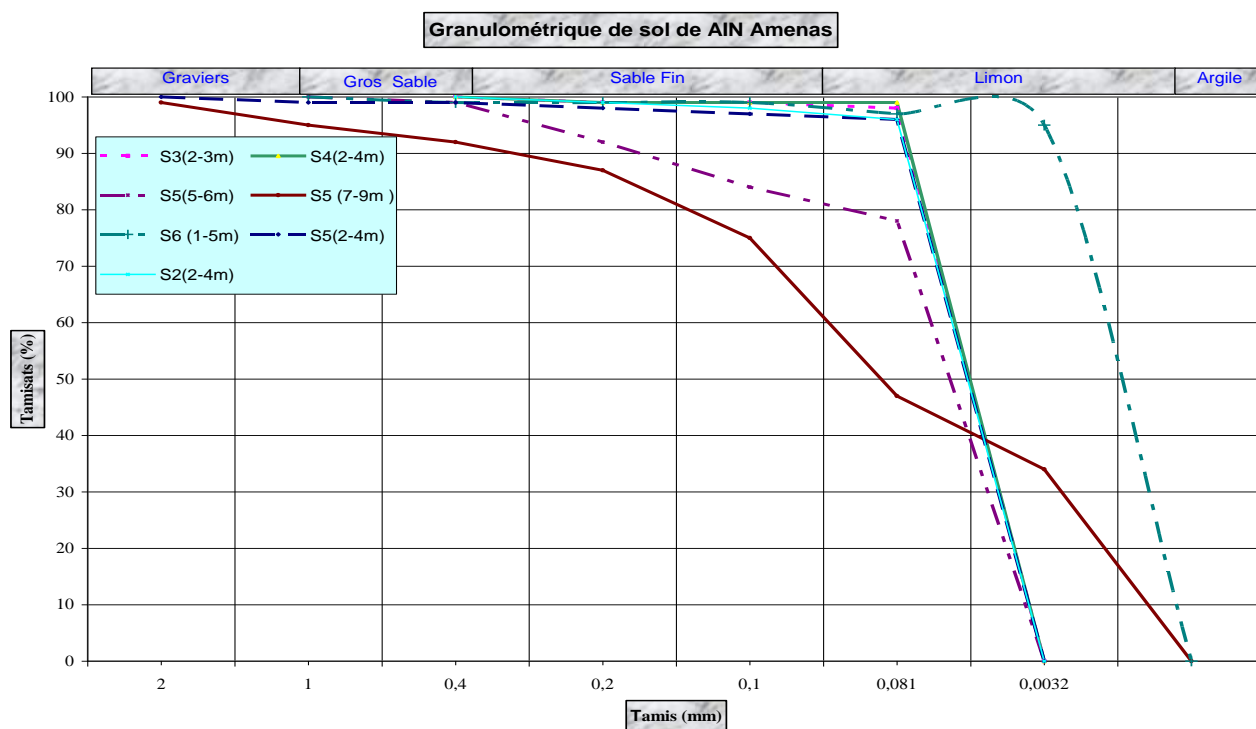


Figure II.8 : Les courbes Granulométrique de Sol Support.

II.4.4.2-LIMITES D'ATTERBERG NF P 94-051 :

a) Objectif : La limite d'Attreberg détermine l'état de consistance d'un sol et des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre les états d'un sol(FigureII.9).

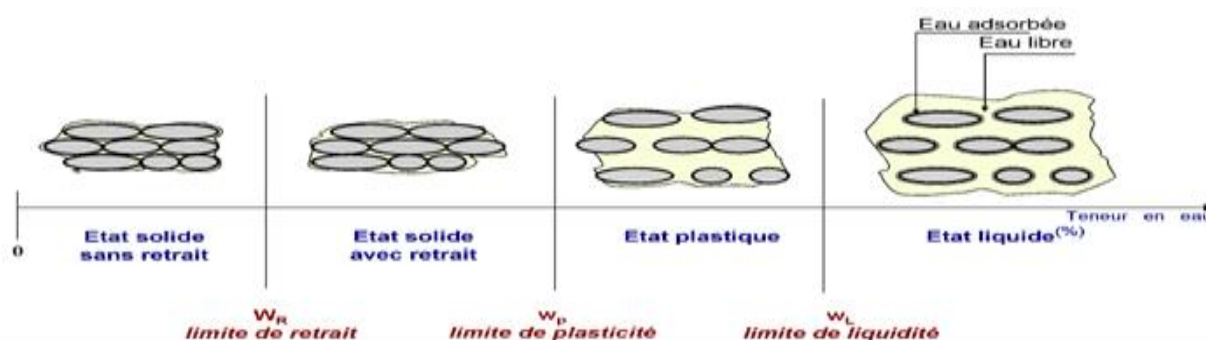


Figure II.9: LES LIMITES D'ATTERBERG [9].

b) Principe de l'essai :

1. Procéder à un quartage afin que l'échantillon soit représentatif.
2. Imbiber l'échantillon dans un récipient.
3. Tamiser l'échantillon dans un tamis 0.04mm et récupérer le tamisât.
4. Sécher le matériau dans une étuve réglée à 105°C pour les sols non gypseux à 55°C pour les sols gypseux.



Figure II.10: Préparation de L'échantillon [5].

5. Placer l'échantillon de sol dans la coupelle et tracer un sillon avec l'outil à rainurer, par convention, la limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond à la fermeture d'un cm (1cm) des lèvres de la rainure après 25chocs (Figure II.11):



Figure II.11: Appareil de Casagrande (cas a, b) [9].

6. Calcul la limite de liquidité W_L .

Prélever à l'aide d'une spatule deux échantillons des lèvres de la rainure dans des godets qu'on pèse puis les porter à l'étuve (Figure II.12. [5]).



Figure II.12 : Limite de Liquidité [5].

7. Limite de plasticité W_P .



Figure II.13 : Limite de Plasticité [5].

L'analyse microscopique a illustré un premier mécanisme physico-chimique d'interaction eau minérale argileuse qui est celui des molécules d'hydratation des cations échangeables, attirés électriquement par le déficit de charge des feuillets argileux

(lui-même dû, entre autres, à certaines substitutions isomorphes). Ce mécanisme met en évidence l'importance des sels dissous dans l'eau interstitielle.

Sur un plan macroscopique, ce phénomène est à rapprocher de la notion des limites d'Atterberg.

c) Indice de plasticité IP :

Indice de plasticité $I_P = W_P - W_L$ peut s'interpréter comme la quantité d'eau nécessaire pour faire passer un sol de l'état "solide" ($w_n < w_P$) à l'état "liquide" ($w_n > w_L$). Plus le sol possède de minéraux actifs dans leur interaction avec l'eau, plus il sera nécessaire d'ajouter de l'eau au sol pour qu'il devienne liquide ; sachant qu'une grande partie de cette eau sera adsorbée par les particules, il ne restera donc pas à l'état liquide et ne conférera pas au matériau un état liquide mais pâteux, correspondant à la phase plastique. Quand toute la capacité d'adsorption du sol sera saturée, alors l'eau en excès restera à l'état libre c'est-à-dire liquide.

Tableau II.4: Classification de l'argile d'un sol selon l'indice de plasticité IP.

Indice de plasticité I_P	Etat- du sol
0 – 5	Non plastique
5 – 15	Non plastique
15 – 40	Plastique
> 40	Plastique

Tableau II.5: Potentiel de gonflement d'après Holtz, Dakshanamurthy et Raman (1973) [15].

Potentiel de gonflement	I_p (%)	WR (%)	WL (%)
Faible	< 18	> 15	20 – 35
Moyen	15 – 25	10 – 15	35 – 50
Fort	25 – 41	7 – 12	50 – 70
Très fort	> 35	< 11	> 70

Les limites d'Atterberg effectuées sur les échantillons prélevés dans l'intervalle de profondeur situé entre 1 et 5 m, attestent qu'ils sont d'origine argileuse non organique à haute plasticité et peuvent être classés dans la zone 6 du diagramme de classification de Casagrande (voir figure. II.14 ci-dessous). L'indice de plasticité varie entre 29 et 32. Par ailleurs les limites mesurées sur l'intervalle 6 et 9 mètres mettent en évidence des limons non organique de moyenne plasticité L'indice de plasticité varie entre 13 et 30.

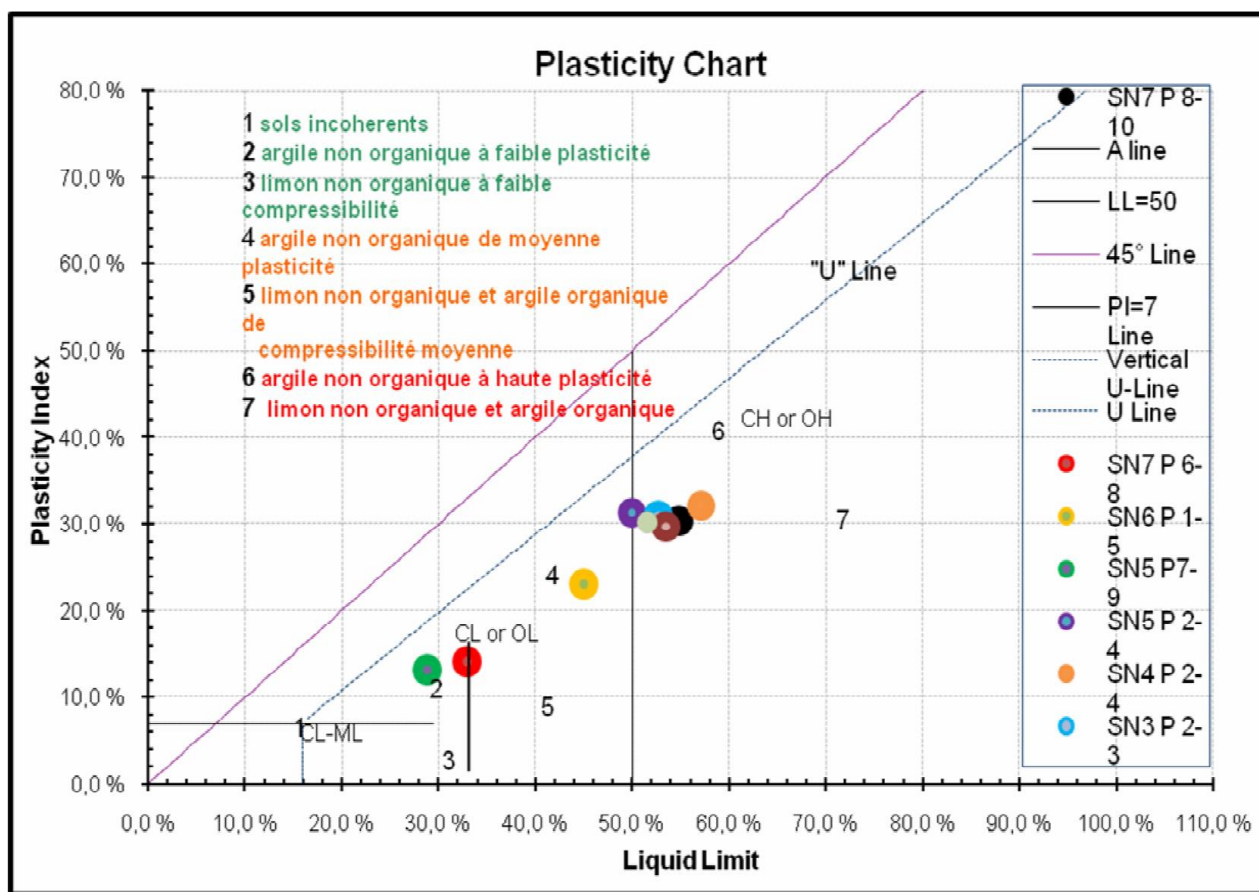


Figure II.14 : DIAGRAMME DE CASAGRANDE [8].

Tous les sols très gonflants ont un très grand indice de plasticité I_p , mais la réciproque n'est pas vraie. On peut évaluer le gonflement possible en fonction de I_p , de la manière suivante:

Tableau II.6: le potentiel de gonflement en fonction de l' I_p [13].

Potentiel de Gonflement	I_p
Faible	0-10
Moyen	10-25
Elevé	25-55
très élevé	> 55

Tableau II.7: Sensibilité d'une argile au retrait -gonflement d'après Prian et al. (2000) [13].

I_p (%)	Sensibilité
< 12	Faible
12 à 25	Moyenne
25 à 40	Forte
≥ 40	Très forte

II.4.4.3-DENSITE APPARENTE NF P 94-064:

Les valeurs des densités apparentes sèches obtenues sur les échantillons sélectionnés sont comprises entre 16,9 et 19 kN/m³ pour les couches d'argile limoneuse situées entre 0 et 5 m

II.4.4.4- Essai bleu de méthylène NF P 94-068 :

a) Principe de l'essai :

Les minéraux argileux présents dans les sols sont principalement issus de l'altération physico-chimique des roches. La structure cristalline feuilletée des argiles leur confère un ensemble de propriétés de comportement lie à leur affinité pour l'eau (appelée activité). Ce qui entraîne les phénomènes de gonflements, de plasticité et de cohésion constatés sur ces sols.

L'essai de bleu méthylène permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains argileux.

Pour ce faire, on fixe, sur les grains d'argile, des molécules de bleu de méthylène et par un test simple, on VBS, qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols concernés par les travaux de terrassements.

b) Préparation de l'échantillon :

L'essai est effectué sur la fraction granulométrique 0/5mm du matériau, car ce sont principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 2mm) qui contiennent la fraction argileuse. Celle-ci donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène et exprime donc de manière quantifiée la sensibilité du sol à l'eau.

On prépare 30g de fraction 0/5 mm sèche que l'on met à tremper dans 200 ml d'eau déminéralisée. Le tout est maintenu en agitation permanente au moyen de l'agitateur à ailettes.

Le dosage consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension de sol, jusqu' à atteindre la saturation des particules d'argile (figure II.15).

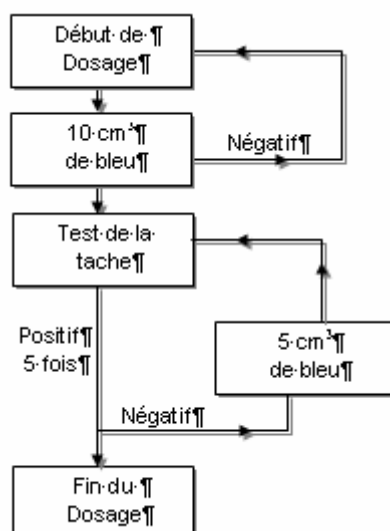


Figure II.15 Dosage de l'essai de bleu selon (NFP 94- 068) [11].

Le test de la tache permet de repérer l'instant de cette saturation.

On prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenant le sol imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre (diamètre du dépôt compris entre 8 et 12 mm).

Deux cas sont possibles :

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide incolore : le test est négatif,
- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide teintée de bleu; le test est positif (Figure .II.16).



Figure II.16: Essai au Bleu de Méthylène [5].

c) Classification des sols après essai :

VBS = 0.1 : sol insensible à l'eau.

VBS = 0.2 : apparition de la sensibilité à l'eau.

VBS = 1.5 : seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo- argileux.

VBS = 2.5 : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne.

VBS = 6: seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.

VBS = 8 : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

Surface de bleu de méthylène $21 \cdot VBS$.

$$VBS = v/m * c (1+w).$$

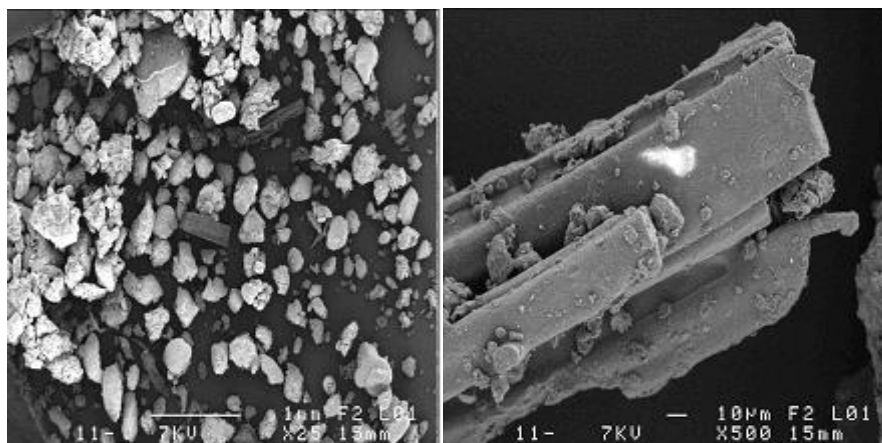
Tableau II.8: Sensibilité d'une argile au retrait-gonflement d'après Chassagneux et al. (1996) [13].

VBS	Sensibilité
< 2,5	Faible
2,5 à 6	Moyenne
6 à 8	Forte
> 8	Très forte

d) Calcul et résultat :

La valeur au bleu de méthylène constitue un paramètre d'identification permettant de mesurer la surface spécifique des particules solides contenues dans les sols fins et de déterminer l'activité de leur fraction argileuse ; la réalisation de l'essai sur un échantillon prélevé de site on donne les résultats suivant :

VB= (5.34m³/g) cette valeur signifie les sols fins et donne une surface spécifique de Sst=21 * VB=(112.14m²/g), alors cette argile rentre dans le périmètre argile de 150 m²/g de type de la famille de l'illite.



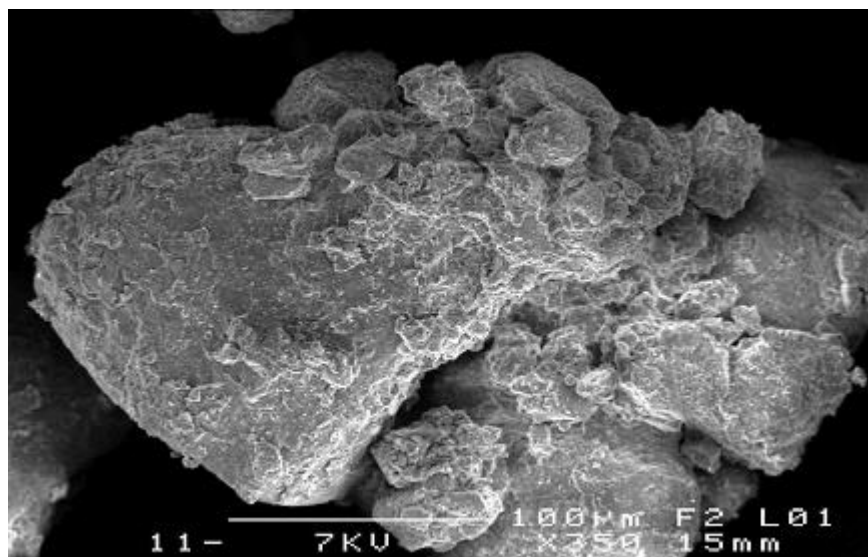


Figure II.17: Photo Microscopique de l'argile d'in Amenas) [5].

II.4.4.5-Analyses Chimiques :

L'analyse chimique sommaire consiste surtout à déterminer les trois éléments suivants :

Les insolubles, les carbonates et les sulfates **Tableau II.7;**

D'après les résultats obtenus sur les échantillons sélectionnés, la fraction des insolubles (argiles et sables) est la plus dominante, les valeurs sont comprises entre 87 et 95% dénotant ainsi une origine siliceuse des échantillons étudiés.

Les carbonates : il s'agit du carbonate de calcium exprimé sous la forme CaCO_3 . Il se présente en faible pourcentage variant entre 1.5 et 3.5% ;

Les sulfates : cette fraction présente un taux dépasse 3%, cette fraction est exprimée sous forme de gypse avec la formule chimique $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$.

Tableau II.9. Résultats des analyses chimiques [8].

ESSAIS		S2 (2-4m)	S3 (2-3m)	S4 (2-4m)	S5 (2-4m)	S5 (5-6m)	S5 (7-9m)	S6 (1-5m)
Analyses chimiques	Insolubles %	87	93	92	94	95	95	95
	Sulfates %	0.51	0.4	0.38	0.46	0.44	0.41	0.40
	Carbonates %	0	1.5	1.5	1.5	3	2.5	3

II.4.5-ESSAIS MECANQUES :

II.4.5.1-ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT (NF P 94-71-1):

Il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante.

L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son angle de frottement interne ϕ et sa cohésion C .

Ces valeurs servent entre à déterminer la contrainte admissible par le sol dans le cas de fondations superficielles et la poussée du sol sur un mur de soutènement.

a) Matériel utilisé :

L'échantillon de sol à étudier est entre demi-botte qui peut se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre.

Un piston permet d'exercer sur le sol une contrainte normale σ déterminée.

La demi-botte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement F est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-botte supérieure.

Un comparateur mesure la déformation verticale de l'échantillon.

L'échantillon subit donc un cisaillement direct et rectiligne suivant un plan imposé sur lequel on exerce une contrainte normale déterminée [8] (Figure .II.18).

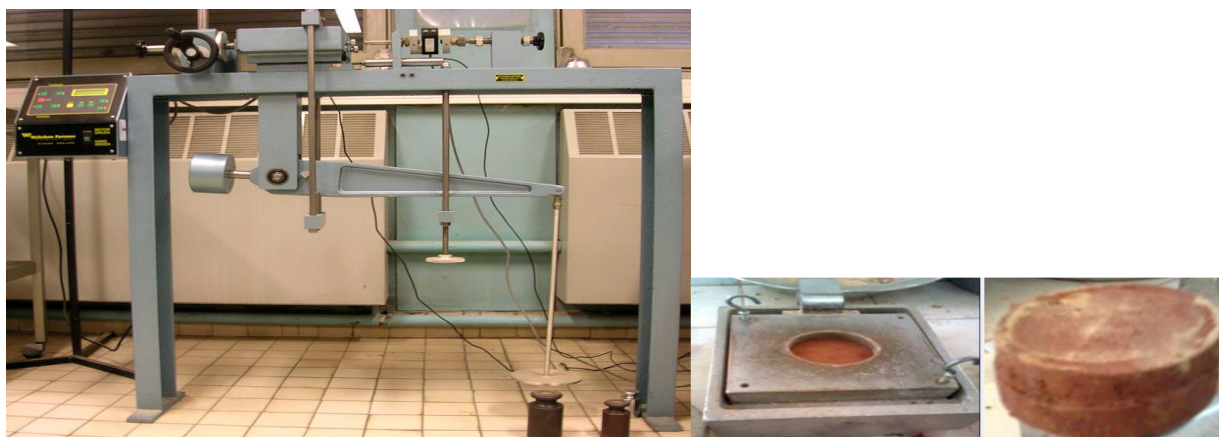


Figure II.18. Appareil de Cisaillement [5].

b) Résistance au cisaillement :

On détermine la contrainte de cisaillement :

On trace ensuite, pour chaque essai, les courbes de contraintes en fonction des déplacements et on détermine la valeur de contrainte de cisaillement maximale.

On reporte ensuite chaque point sur un graphique ayant pour abscisse la contrainte normale s et pour ordonnée la contrainte de cisaillement τ , tracer la courbe intrinsèque du sol étudié.

c) Calcul et résultat :

Les essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande effectués sur les échantillons sélectionnés auparavant sont de type UU (non consolidé non drainé).

Les résultats obtenus pour les paramètres de plasticité se présentent comme suit :

- Les angles de frottement mesurés s'échelonnent entre 37° et 39° ($37^\circ < \varphi < 39^\circ$) pour les couches situées entre 1 et 5 mètres.

- Les cohésions relevées se répartissent sur un intervalle compris entre 0.09 et 0.78 bars.

Les angles de frottements enregistrés sont relativement élevés pour un sol de type argilo-limoneux ceci peut être expliqué par l'état sec et induré du sol naturel ce qui favorise le frottement entre les grains. Les paramètres mécaniques intrinsèques du sol sont fortement influencés par la variation de la teneur en eau. Les résultats obtenus pour les paramètres de plasticité confèrent aux dépôts analysés une certaine homogénéité latérale pour l'état de compacité.

II.4.5.2) ESSAIS OEDOMETRIQUES NFP94-91 :

a) **Définition:** c'est un essai déformation à charge constante d'une éprouvette cylindrique avec déformation à latérale nul et drainage sur les deux faces (inf et sup) figure II.19.

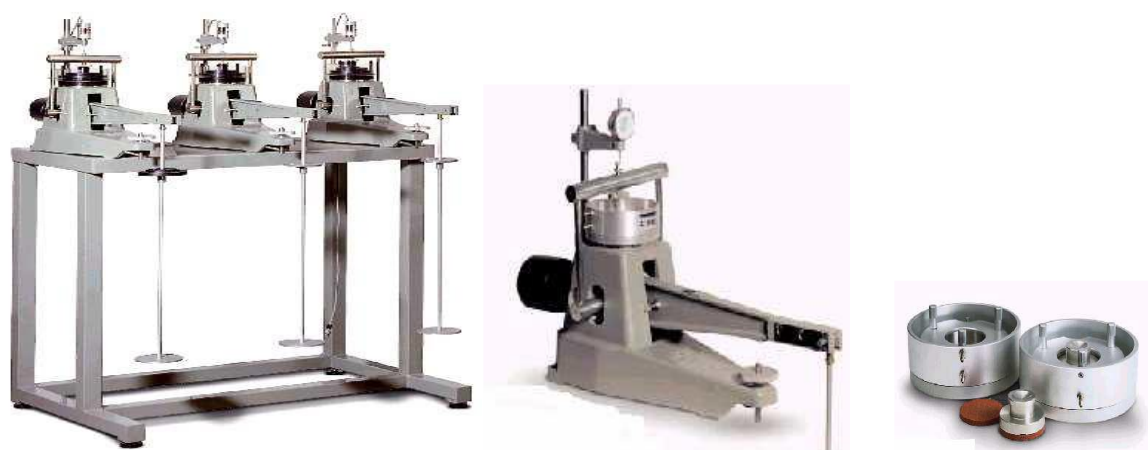


Figure II.19 : APPAREIL D'OEDOMETRIQUE [11].

b) BUT : La manipulation a pour but de déterminer des caractéristiques de compressibilité d'un sol qui permettent d'estimer le tassement et gonflement d'un massif de sol.

c) Réalisation de l'essai:

1. extraction de l'échantillon de son étui :
 - Repérer le haut et le bas de la carotte (avant extraction).
 - Exclure le bas et le haut systématiquement.
 - Découper un cylindre ayant 2 fois à 4 fois la hauteur de l'éprouvette et commencer la taille.
2. Forme de l'éprouvette.
 - Il s'agit d'obtenir une éprouvette non perturbée par le découpage.
 - Cylindrique aux dimensions du moule.
 - Les deux faces bien planes et parallèles.
3. Dimensions de l'éprouvette $D = 75\text{mm}$, $D = 50\text{mm}$ (selon le diamètre a la carotte).
 - Mise en place de l'éprouvette.
 - Saturation de l'éprouvette
 - Chargement et déchargement de l'éprouvette.
 - Calculs et résultats (graphique, détermination des paramètres).

d) Calcul et Résultat :

04 essais de compressibilité à l'oedomètre ont été effectués.

L'exploitation des résultats obtenus **Tableau.II.8** a permis de tirer les conclusions suivantes :

Les échantillons testés ayant un indice de plasticité situé entre 31 et 32% ont donné un coefficient de tassement C_t variant entre 27 et 32% indiquant qu'on est en présence de sol moyennement compressible, les indices de gonflement mesurés correspondants sont entre 6 et 9% ce qui permet de classer ces sols dans la famille des argiles moyennement gonflantes, ces résultats ont été mis en évidence dans les couches situées entre 2 et 4 m de profondeur au droit des sondages 4 et 5. Les pressions de consolidation sont de l'ordre de 2.4 et 3 bars ([44][45]).

Tableau .II.8. Résultats de l'essai de compressibilité à l'oedomètre [8]

ESSAIS		S2 (2-4m)	S4 (2-4m)	S5 (2-4m)	S5 (5-6m)
Essais -Oedo- mètre	PC en Bars	2.02	3.0	2.4	2.1
	C.T %	0.06	0.32	0.273	0.02
	C.G %	0.02	0.09	0.063	0.02

CT : Coefficient de Tassement ;

CG : Coefficient de Gonflement ;

II.4.6-ESSAIS GEOPHYSIQUES :

II.4.6.1-ESSAIS DOWN HOLE (NORME ASTM D-4428) :

g) METHODOLOGIE

1/ CONDITION DE L'ESSAI

La réalisation de mesures correctes dans les sondages doit satisfaire aux conditions suivantes :

- Le sondage doit être bien vertical et tubé en PVC et l'espace annulaire entre le tubage et le sondage correctement cimenté pour assurer un bon couplage sol-tubage.
- Le diamètre du sondage doit être suffisant pour permettre la descente et la remontée de la sonde, en général de $\varnothing=60$ mm (géophones tridimensionnels avec le packer gonflable).

Les diamètres généralement utilisés sont :

- Sondage carotté au diamètre 108 mm ;
- Tubage PVC diamètre intérieur 80-90 mm ;
- Cimentation parfaite de l'espace annulaire par un coulis ;
- Sondage propre (pas de boue à l'intérieur).

Dans le cas où un niveau piézométrique est relevé, la descente des tubages PVC, doit équilibrer la pression hydrostatique (poussée d'Archimède), pour cela il est nécessaire de descendre le tubage avec bouchon de fond tout en le remplissant d'eau

Le calcul de la vitesse de propagation étant basé sur la mesure d'un temps de parcours, il est nécessaire d'utiliser un sismographe de haute résolution.

2/ REALISATIONS DES MESURES DE L'ESSAI DWON HOLE :

La mesure de la vitesse de propagation est faite le long du sondage, l'émission du signal a lieu à la surface du sol à proximité du trou de sondage, et la réception se fait à l'aide de capteurs contenus dans un packer et placés dans le sondage.

Les mesures se font, en général en descendant le packer "3D" par palier à des côtes variant de un à deux mètres jusqu'à la côte de profondeur finale du sondage (figure. II.20). On détermine ainsi les modules E_{dyn} , G_{dyn} suivant une direction verticale de propagation des ondes [8].

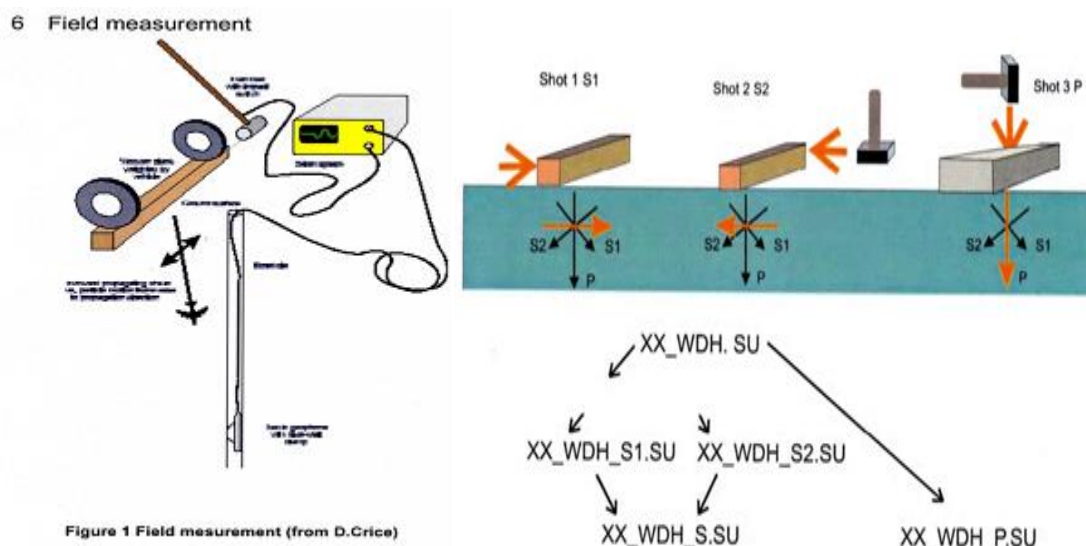


Figure II.20: principe de l'essai down hole [8].

3/RESULTATS DES MESURES :

En portant en fonction de la profondeur les temps d'arrivée des ondes primaires (P) et des ondes secondaires (Sx et Sy), on obtient les dromochroniques dont les pentes sont égales aux vitesses de propagation. Ces vitesses sont liées aux paramètres de la loi de comportement du milieu (constantes de Lamé).

Les valeurs obtenues dans un essai down-hole correspondent aux caractéristiques du terrain, au voisinage du sondage, pour une direction verticale de propagation des ondes. Cette direction de propagation est celle couramment retenue en génie parasismique.

h) RAPPEL THEORIQUE :

Sous l'effet d'un choc, plusieurs déformations des milieux peuvent se produire (théorie d'élasticité), dont les principales sont :

- _ Les déformations de compression ou de dilatation du milieu se propageant à la vitesse "Vp" correspondant aux ondes longitudinales.
- _ Les déformations de cisaillement et de torsion qui se propagent à la vitesse "Vs" correspondant aux ondes transversales.

Si les vitesses "Vp" permettent de mesurer les épaisseurs des couches et d'apprécier leur nature, les vitesses "Vs", plus sensibles à l'état d'altération et de fissuration des milieux permettent de quantifier les paramètres dynamiques.

i) COMPARAISON DES VALEURS DES MODULES DYNAMIQUES ET STATIQUES :

En théorie les valeurs E et μ déterminées dynamiquement sont égales aux valeurs déterminées statiquement mais il n'en est pas de même pour les milieux rocheux, ceux-ci s'écartent des hypothèses élastiques.

Les vitesses de déformations mises en jeu lors des essais sismiques sont de l'ordre du cm/s ou du mm/s, ce qui correspond à des déplacements de l'ordre du micromètre.

Il s'agit de déformations très faibles et non comparables à celles obtenues par des essais statiques (dilatomètres).

Les valeurs des modules dynamiques (Essais down-hole et cross-hole) et des modules statiques (essais au vérin) peuvent différer assez considérablement jusqu'à se situer dans un rapport de 10.

D'autre part les facteurs qui conditionnent en pratique le module de cisaillement G_{dyn} et ses variations en fonction de l'amplitude des déformations sont fonction de:

- La forme et dimension des grains ;
- L'indice des vides et la teneur en eau ;
- La pression effective moyenne ;

j) **ANISOTROPIE :**

On observe très couramment même dans un massif homogène des variations de vitesses suivant la direction de propagation des ondes sismiques.

Cette anisotropie peut être une anisotropie de texture (matériau lité) ou une anisotropie de fracturation, les vitesses dans deux directions peuvent varier de 10 à 20 %.

k) **ORDRE DE GRANDEUR :**

Pour donner un ordre de grandeur on peut admettre en première approximation:

✚ Les rapports V_P / V_S varient de 1.20 à 3.00

✚ Les modules de compression :

- Terrains cristallins fracturés: de 15 000 MPa à 30 000 MPa ;
- Terrains rocheux fracturés: 1000 MPa à 5000 MPa ;
- Sables et graviers: 500 MPa à 1500 MPa ;
- Argiles: 100 MPa à 500 MPa.

Le coefficient de poisson " ν " ou " μ " est de :

- 0.40 pour les terrains compressibles ;
- 0.15 à 0.20 pour les roches rigides ;

l) **REALISATION DE L'ESSAI ET INTERPRETATION DES RESULTATS :**

1/ EQUIPEMENT MIS EN ŒUVRE :

Le laboratoire LTPS a mis en œuvre un équipement à haute résolution composé de :

- Un sismographe " PASI " modèle 16S-12 ;
- Capteurs : Géophones tridimensionnels DHTG-100 ;
- Générateur de vibrations : placé à un mètre du sondage ;

- Un micro-portable pour le transfert des données et pour la vérification sur place des résultats de mesures.

2/ MOYENS HUMAINS :

- Expert géophysicien;
- Opérateurs.

3/ STATISTIQUE :

Les essais en diagraphie "down-hole" ont été réalisés le 09 avril 2008, sur le site du futur projet " Centrale turbines à gaz 6x5 MW ", répartis comme suit : Au total 09 mesures de vitesses sismiques (x, y, z) en down-hole ont été réalisées dans le sondage Sc-05 de profondeur 10.0 mètres;

4/ INTERPRETATION DES RESULTATS :

Les résultats obtenus sur les essais "down-hole" réalisés dans le sondage Sc-05, ont permis de tracer les diagrammes de variation de temps en fonction de la profondeur, pour chaque station de mesure (figure II.21).

Les résultats des enregistrements sismiques de sondage SC-05 figurent dans le tableau suivant :

Tableau II.9: RESULTATS DE L'ESSAI SC-05 [8].

Prof (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Pois	G _{dyn} (MPa)	E _{dyn} (MPa)	K _{Bulk} (MPa)
1.00	950	526	0.28	442.68	1132.34	853.76
2.00	950	526	0.28	442.68	1132.34	853.76
3.00	950	526	0.28	442.68	1132.34	853.76
4.00	1500	750	0.33	966.25	2550	2550
5.00	1500	750	0.33	956.25	2550	2550
6.00	1500	750	0.33	956.25	2550	2550
7.00	1500	750	0.33	956.25	2550	2550
8.00	1500	750	0.33	956.25	2550	2550
9.00	1500	750	0.33	956.25	2550	2550

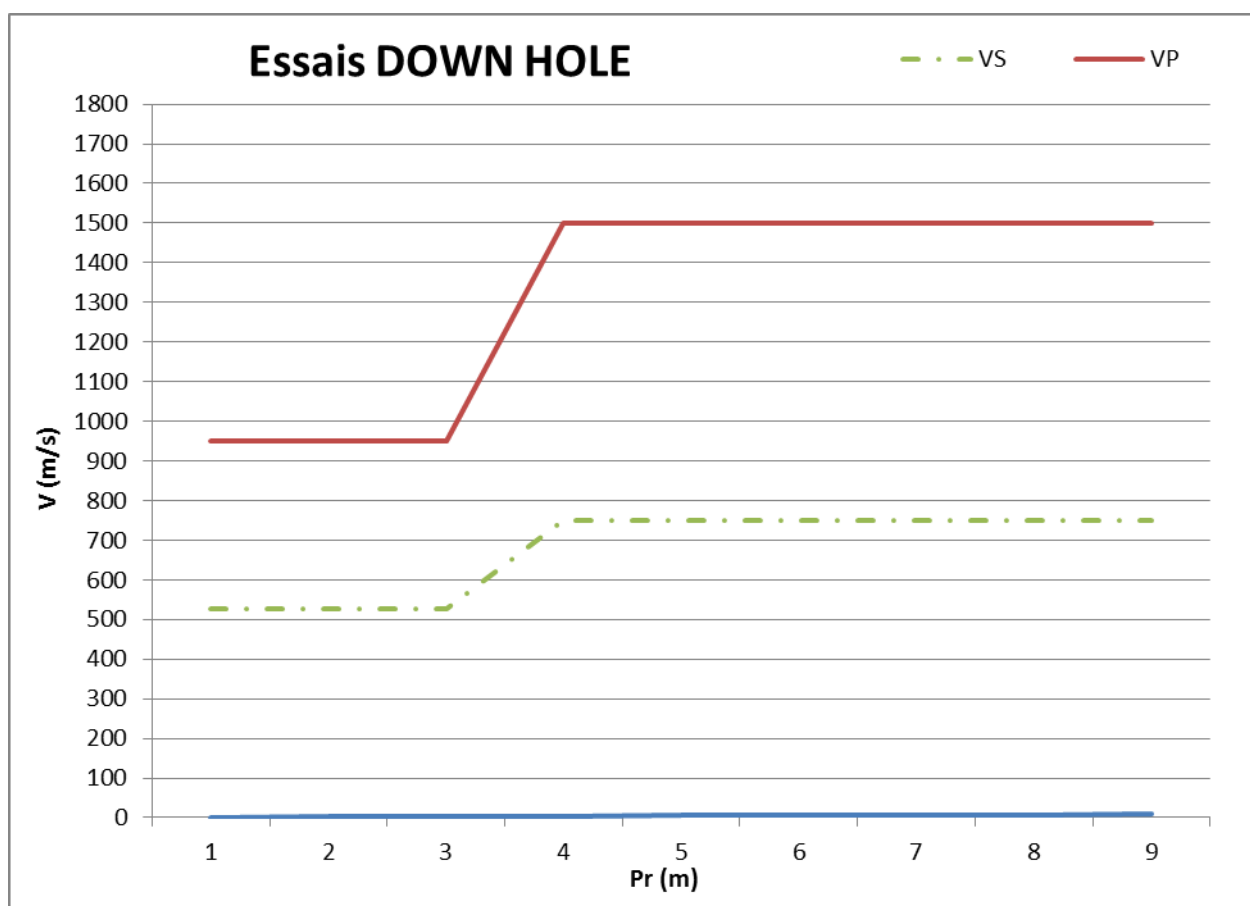


Figure II.21: La Courbe de L'ESSAI DOWN HOLE SC N°05[8].

La corrélation de ces résultats avec la coupe lithologique du sondage carotté Sc-05 a permis d'établir l'interprétation suivante :

• La couche superficielle : caractérisée par une épaisseur de 3.00 mètres, composée d'argiles sableuses altérées, présente des valeurs assez lentes dont les ondes de compression : $V_p = 950$ m/s, et pour les ondes de cisaillement : $V_s = 526$ m/s.

Les modules dynamiques exprimés en MPa sont représentés comme suit :

$E_{dyn} = 1132$ MPa

$G_{dyn} = 442$ Mpa

• Le second terrain : apparaît à partir de 3.00 mètres jusqu'à 9.00 mètres de profondeur, la vitesse enregistrée dans cette tranche de terrain est de l'ordre de 1500 m/s pour l'onde "P", et 750 m/s pour l'onde "S", représentant les faciès argileux compacts.

Les caractéristiques dynamiques du sol sont de l'ordre de 2550 MPa pour le module de Young, et oscillent autour de 956 MPa pour le module de cisaillement.

5/ MESURE DE RESISTIVITE :

Les mesures de résistivité réalisées dans 06 stations, et pour 3 profondeurs d'investigation : 3 mètre, 6 mètres et 9 mètres, ont confirmé la présence de terrains moyennement résistants, les valeurs des résistivités mesurées sont :

$58 \text{ Wm} < \rho < 141 \text{ Wm}$,

Cette valeur correspondant à des argiles sableuses.

II.5- Activité des argiles :

Les limites d'Atterberg sont fonctions des dimensions des grains et de la composition minéralogique du sol. Pour une argile contenant des particules solides assez grosses, **Skempton (1957)** a montré que l'indice de plasticité dépend de la quantité de grains solides de dimensions inférieures ou égales à 2mm :

AC= Indice de Plasticité / % des éléments inférieur à 2 μm

Ac: est défini comme étant l'activité colloïdale du sol. A titre indicatif le Tableau II.10 donne l'indice de plasticité, l'indice de liquidité et l'activité pour différents types d'argiles.

Tableau II.10. : Activité des argiles (Chelghoum (2006)).

Minéraux l'argileux	I_L	I_P	Activité
Kaolinite	40 – 60	10 – 25	0.4
Illite	80 – 120	50 – 70	0.9
Sodium montmorillonite	700	650	7
Autre montmorillonite	300 – 650	200 - 550	1.5
Sol granulaire	20 et <	0	-

Ont proposé une méthode d'estimation du taux de gonflement sur des sols compactés en se référant à la teneur en argile du sol et à l'activité du matériau AC :

Tableau II.11: Potentiel de gonflement fonction de l'activité (**Skempton 1953**).

Activité Ac (%)	Degré d'activité	Taux de gonflement
< 0.75	Inactif	Peu expansif
0.75 < Ac < 1.25	Moyennement actif	Moyennement expansif
> 1.25	Très actif	Très expansif

D'après les résultats obtenus, l'activité de l'argile d'in amenas étudié est donné 0.796 selon le tableau de **Skempton (1953)** $0.75 < AC < 1.25$ le degré d'activité est Moyennement actif et le taux de gonflement est Moyennement expansif.

II.6- Prévision du gonflement des argiles d'In-Amenas :

II.6.1- Estimation du gonflement des argiles d'In-Amenas :

Il existe plusieurs méthodes d'estimation de gonflement des argiles, (Méthode de MYSLIVEC, Méthode chinoise, Méthode de FU HUA CHEN, Méthode de HUDER et AMBERG, Méthode Covar Lytton, Méthode ASTM...ETC.

Dans ce mémoire nous avons cité les deux dernières méthodes (Covar&lytton, méthode ASTM)appliqué aux argiles d'in amenas pour objet de mesurer le potentiel de gonflement de ce type des argiles.

II.6.1.1- Méthode de Covar et Lytton :

a) Présentation de la méthode :

Cette méthode de mesure de gonflement, est le résultat de l'étude de plus de 25000 échantillons du sol, qui proviennent de 50 états des Etats-Unis d'Amérique. Les paramètres géotechniques exploités de la base de données ainsi confectionnée, sont surtout les paramètres de granulométrie et de plasticité.

La synthèse de longues études affirme que le changement de volume qui s'opère dans le sol est sensiblement fonction de la composition du sol en éléments fins, de son activité argileuse et de sa capacité d'échange de cations. Pour la prévision de la variation totale du volume que subit le sol, Lytton (2002), propose une relation (équation 1), composée de trois termes correspondants respectivement à l'apport de changement (entre l'état initial et l'état final) de l'humidité (état de la succion dans le sol), de l'état de contrainte et de la variation de la concentration des sels/ dans la phase liquide du sol [6]:

$$\frac{\Delta V}{V} = -\gamma_h \log_{10} \left(\frac{h_f}{h_i} \right) - \gamma_\sigma \log_{10} \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_i} \right) - \gamma_\pi \log_{10} \left(\frac{\pi_f}{\pi_i} \right)$$

En l'absence de variation de contraintes principales et en considérant une constance dans la pression osmotique, l'expression ci-dessus peut se simplifier en :

$$\frac{\Delta V}{V} = -\gamma_h \log_{10} \left(\frac{h_f}{h_i} \right)$$

h_i, h_f : Succion matricielle initiale et finale ;

σ_i, σ_f : contraintes principales initiale et finales ;

π_i, π_f : succion osmotique initiale et finale ;

γ_h, γ_σ et γ_π : Indices de compression dus respectivement, à la succion matricielle, à la contrainte principale et à la succion osmotique.

b) Procédés de contrôle de la succion et de mesure du changement du volume :

Le procédé expérimental conduit pour l'imposition de succions à des échantillons du sol par phase vapeur, est assuré par la méthode des solutions salines saturées. Pour le suivi de variation de volume de ces échantillons, on utilise un liquide non mouillant, le kérosène, dont la densité volumique ρ_k est de 0.75. Des échantillons de quelques grammes sont mis sur la plaque céramique d'un dessiccateur contenant une solution saturée en NaCl (imposant une succion de 37.8 MPa). Les échantillons sont pesés régulièrement tous les deux jours jusqu'à stabilisation du poids (une variation de poids ne dépassant pas 1 à 2‰). A la stabilisation, les échantillons sont également pesés dans du kérosène, ensuite mis à l'étuve pendant 24 heures pour être repesés à l'air libre et dans le liquide non mouillant. Par cette procédure, on déduit le volume des échantillons avant et après étuvage, ce qui nous permet de déduire la variation du volume entre l'état de succion de 37.8 et 1000Mpa (étuvage). Le même procédé est répété pour d'autres niveaux de succion par le biais d'autres solutions salines saturées.

Les échantillons prélevés sur le site d'In-Amenas, occupent la place des argiles minérales de haute plasticité sur l'abaque de Casagrande (1948) et Holtz et Kovac (1981), (figure. II.23). Ils se localisent sur les zones I, II et III, ceci montre que la constitution minéralogique principale (58.33%) sont des argiles mixtes (zone II), (25% en illite, 16.66% en montmorillonite). Résultats que confirment les analyses chimiques (Derriche, Iguechtal et Tas ; 1999).

Sur la carte de répartition du coefficient d'extensibilité linéaire (COLE) (Figure II.23. [6]), les argiles étudiées se situent globalement dans la zone 1, ceci exprime l'importance de leur coefficient d'extensibilité linéaire. Selon le Tableau. II.12 [6], la composition minéralogique, serait à plus de 80% en montmorillonite, ou ayant le comportement d'une montmorillonite. Ce constat contradictoire, soulevé par Romero (1999) (M. Lamara, Z. Derriche, E. Romero, 2005), montre l'importance de l'activité des argiles de cette région. Par conséquent leur grande susceptibilité à changer du volume. L'analyse des graphes de prédiction du gonflement du site étudié révèle un potentiel de gonflement majoritairement très élevé, ce qui confirme Le caractère gonflant des argiles d'In-Amenas.

Tableau II.12: L'indice de changement du volume γ_0 [6].

Région	Indice de changement de volume γ_0
I	0.220
II	0.163
IIIA	0.096
IIIB	0.096
IVA	0.061
IVB	0.061
VA	0.033
VB	0.033

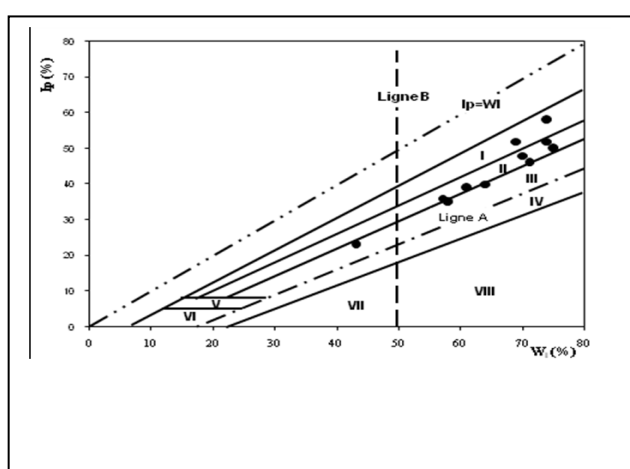


Figure II.22: Diagramme de la répartition minéralogique de Casagrande (1948), et Holtz et Kovac (1981) [6].

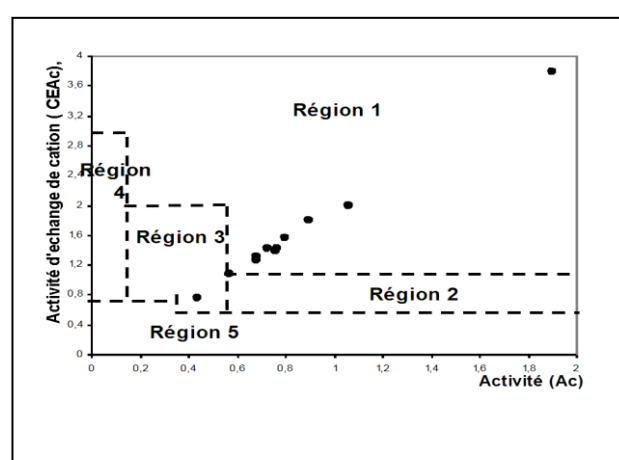


Figure II.23: Carte de répartition du coefficient d'extensibilité linéaire (COLE), situation des argiles [6].

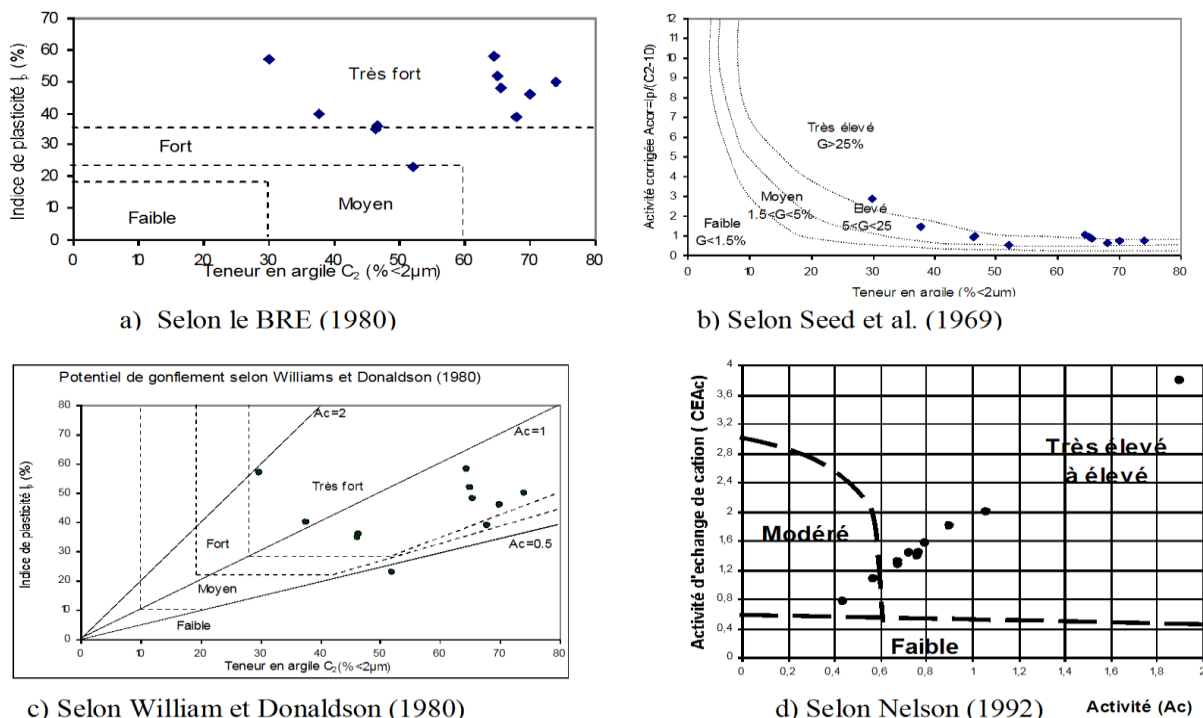


Figure II.24: Classification du potentiel de gonflement des argiles d'InAmenas.

Au cas des argiles de In Amenas, H.MOBAREK (2000), admet l'hypothèse d'une stabilité de la concentration des sels dans le sol (la succion osmotique reste constante entre l'état initial et l'état final) et les contraintes de chargements ne varient pas. Ceci nous conduit à l'application de l'expression simplifier.

En faisant la lecture des valeurs de l'indice de compression γ_0 sur les abaques (zone I, II et III), représentés à la figure II.23 (ou lues directement sur le tableau II.12), on procède au calcul de L'indice de compression dû au changement de succion matricielle γ_h par l'expression suivante.

$$\gamma_h = \gamma_0 \times \left[\frac{\% < 2\mu m}{\% < 75\mu m} \right]$$

Les succions initiales et finales considérées pour l'application de la nouvelle méthode sont celles obtenues pour les échantillons soumis par phase vapeur à certains niveaux de succions et pour lesquels la mesure du volume est assurée par des pesées hydrostatique dans du kérosène. Les variations de volume relatif (retrait) estimées par l'application de l'expression simplifier et celles mesurées par les pesées hydrostatiques des échantillons sont consignées au Tableau.II.13:

Tableau .II.13: Résultats de mesure de changement de volume par les pesées hydrostatiques [6].

Caractéristiques des échantillons			Succion initiale h_i (MPa)	Succion finale h_f (Mpa)	$\Delta v/v$ selon la Nelleméthode (%)	$\Delta v/v$ expérimentale
%<2 μ m	γ_0	Γ_h				
65	0.220	0.143	37.8	1000	-20.3	- 17.8
65	0.220	0.143	331.9	1000	-6.84	- 2.45
65	0.220	0.143	3.2	1000	-35.68	- 23.88

Les résultats obtenus par cette application sont représentés à la (figure II.25), où sont représentés également les résultats d'estimation du taux du gonflement par les méthodes empiriques de prédiction (Vijayvergiya et Ghazzaly (méthodes 1&2); Scheneider et Poor, 1900 ; Johnson, 1988 ; seed et al. 1980 (méthodes 1&2)).

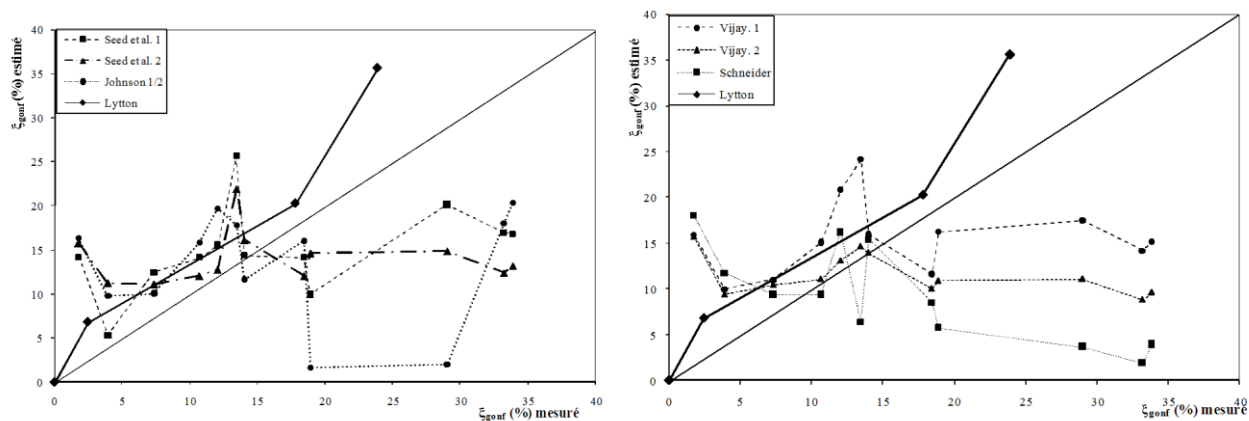


Figure II.25 : Gonflement des argiles d'In-Amenas[6].

II.6.1.2-Méthode de l'A S T M norme A S T M D.4546-90 :

Dont les principales étapes sont citées ci-après :

- L'éprouvette d'argile est placée à sec dans l'oedomètre sous la pression verticale de la pierre poreuse et du piston ;
- L'éprouvette est inondée et gonfle librement jusqu'à la fin du gonflement primaire (c'est-à-dire jusqu'à ce que l'augmentation du gonflement devienne proportionnelle au logarithme du temps). Le pourcentage de gonflement $\varepsilon_{\text{gonf}}$ est le rapport de l'augmentation de la hauteur de l'éprouvette à sa hauteur initiale ;
- l'éprouvette est ensuite chargée par étapes jusqu'à ce qu'elle retrouve son indice des vides initial.

Dans le Tableau II.14, les charges appliquées aux éprouvettes lors du gonflement sont exprimées en termes de profondeurs relatives, c'est-à-dire que si la profondeur équivalente Z_{equ} est inférieure à z , la charge appliquée est supérieure à la contrainte verticale supportée par l'éprouvette en place et qu'elle est inférieure dans le cas contraire. Les profondeurs équivalentes ont été calculées en utilisant une masse volumique moyenne de l'argile de 2 tonnes par mètre cube [10]:

Tableau II.14: Caractéristiques des argiles d'In-Aménas et gonflements observés en laboratoire[10].

ECH	Z(m)	W ₀ (%)	W _R	W _P	W _L	I _P	I _R	C ₂ (%)	ρ _d (t/m ³)	A _c	Z _{equ} (m)	ξ _{Gonf} (%)
Ech-1	3,22	14	12	21	57	36	45	46,5	1,764	0,77	7,45	1,75
Ech-2	1,25	11	12	27	84	57	72	29,9	1,726	1,9	7,81	3,92
Ech-3	3,13	8,9	7	16	74	58	62	64,4	1,6	0,9	8,61	7,32
Ech-4	3,87	8	7	17	69	52	62	65	2,014	0,8	6,9	10,67
Ech-5	8,18	15	12	22	70	48	58	65,4	2,601	0,73	8,17	12,04
Ech-6		2,6	13	20	43	23	30	52	2,09	0,44	6,98	13,43
Ech-7	1,72	10	12	23	58	35	42	46,3	1,8	0,76	7,61	14
Ech-8	2,3	7,3	11	22	74	52	3	65,1	1,706	0,8	8,2	18,42
Ech-9	2	4,2	11	26	64	40	53	37,7	2	1,06	7,2	18,9
Ech-10		3,2	14	22	61	39	47	68	2,04	0,57	6,94	29
Ech-11		3,1	10	25	75	50	65	74	2,08	0,68	7,14	33,2
Ech-12		3,9	13	26	71	46	58	70	2,08	0,68	7,01	33,85

<p>Liste des symboles : Z(m) :profondeur de prélèvement ; W₀(%) :teneur en eau naturelle ; W_R :Limite de retrait ; W_P :Limite de plasticité ; W_L :Limite de liquidité ; I_P :Indice de plasticité ; I_R : Indice de retrait (W_L-W_P) ;</p>	<p>C₂(%) : Teneur en argile ; ρ_d(t/m³) : masse volumique du sol sec ; A_c :activité (I_P/C_a) ; Z_{equ}(m) :profondeur équivalant au chargement appliqué à l'éprouvette pendant le gonflement ; ξ_{Gonf}(%) : pourcentage de gonflement (norme ASTM D.4546-86. Méthode A) ;</p>
--	---

On voit dans le Tableau II.17, que les douze éprouvettes testées, malgré leur provenance commune, ont des propriétés physiques et mécaniques relativement différentes. Elles ont en commun de fortes masses volumiques sèches ρ_d et des teneurs en argile importantes. Les teneurs en eau naturelles sont très faibles et le plus souvent inférieures à la limite de retrait.

II.7- Conclusion :

A la lumière des résultats d'intervention sur site; On peut tirer plusieurs **Conclusions** :

Le caractère gonflant du sol d'IN AMENAS est mis en évidence néanmoins l'intensité de ce phénomène dépend de plusieurs paramètres très complexes.

Aussi, à l'issue de l'investigation géotechnique in-situ et à la lumière des résultats des essais de laboratoire (dans le cadre de l'étude de sol de cette région), nous pouvons conclure : que les matériaux composant le sol de fondation sont des sols argilo-limono-sableux caractérisés par une plasticité et un potentiel de gonflement variables (I_p pouvant atteindre 50 et la pression de gonflement peut dépasser 09 bars), ce qui montre une formation de sol hétérogène).

La méthode de (COVAR- LYTTON) appliquée aux argiles d'In-Amenas a fourni des résultats qui confirment le caractère gonflant des argiles de ce site, telle qu'il a été estimé par la majorité des classifications du potentiel de gonflement. Les taux de gonflement estimés par la méthode, sont appréciables relativement aux résultats expérimentaux réalisés par H MOBAREK Hamel. Nous constatons que cette méthode fournit une approche du changement de volume bien meilleure relativement aux autres méthodes de prédiction. Les écarts par rapport aux résultats expérimentaux pourraient être attribués aux différentes hypothèses admises dans notre cas d'application. Pour mieux apprécier l'apport de cette méthode dans la prédiction du gonflement de ces argiles, d'autres applications à l'avenir pourraient nous épargner l'impact négatif de plusieurs approximations qui ont tendance à masquer la réalité des terrains et les apports scientifiques positifs de la méthode.

- Dans tous les cas, une chose est certaine : le risque de gonflement n'est pas à écarter. Ce phénomène ne peut être arrêté sans en avoir éliminé les causes, autrement dit, le niveau de fondation est choisi de façon que la couche d'argile susceptible de variation de volume soit soustraite à toute variation d'état.

CHAPITRE III:
LES TECHNIQUES DE
STABILISATION

III -Traitements Des Sols Argileux :

III.1. Introduction :

Le traitement des sols argileux est une technique ancienne, dont l'application tant au niveau des travaux de terrassement qu'au niveau de la réfection des routes ainsi que les pistes d'accès aux terrains agricoles..., le traitement des sols argileux a pour objet essentiel de réduire les variations de volumes dues aux variations de la teneur en eau.

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue :

- ✓ La stabilisation mécanique.
- ✓ La stabilisation thermique.
- ✓ La stabilisation par sables.
- ✓ La stabilisation chimique. (Par ajout de matériaux).

Les liants se divisent en deux grandes familles qui sont les liants hydrauliques (sels, ciment, chaux, ...) et les liants organiques (goudrons, bitumes ...).

III.2 BUT DE LA STABILISATION :

La stabilisation de sol à pour un but de :

1. Réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité);
2. Colmater les vides que l'on peut supprimer;
3. Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre particules (résistance mécanique) [5].

D'une manière générale, les procédés les plus utilisés dans le domaine géotechnique pour stabiliser les sols argileux sont les suivantes :

III.3 STABILISATION PAR AJOUT DE LA CHAUX :

III.3.1 Chaux :

Est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20% de la couche terrestre), Elle est utilisée depuis l'[Antiquité](#), notamment dans la construction [11].

III.3.2 Différents types de chaux :

Selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux [46]:

- * Chaux magnésienne provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium.
- * Chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux.
- * Chaux aérienne provenant d'un calcaire pur, ces la chaux la plus utilisées en technique routière, elle se présente sous deux formes : tableau.III.1. [21]

- **Chaux vive** : La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par [décomposition thermique](#) du [calcaire](#).
- **Chaux éteinte** : La chaux calcique éteinte **Ca(OH) 2** est une poudre sèche produite par la réaction de la chaux vive avec une quantité suffisante d'eau.

Tableau III.1: Caractéristiques des chaux aériennes calciques utilisées pour le traitement des sols selon la **NFP 98-101 [21]**.

	Chaux vives	Chaux éteintes
Teneur en CaO libre global	≥ 80%	≥ 50%
Teneur en MgO	≤ 8 %	≤ 6 %
Passant à 0,08 mm	≥ 50 %	≥ 90%
Passant à 0,2 mm	≥ 80%	-
Passant à 2 mm	100%	-
Teneur en eau libre	-	≤ 2%
Test de réactivité à l'eau défini par la norme NF P 98-102	Une température finale de plus de 60° doit être obtenue en moins de 25 min	

III.3.2.1- La Chaux Vive :

La chaux vive diminue la teneur en eau du sol via trois phénomènes distincts:

a) L'hydratation de la chaux vive: une partie de l'eau «disparaît» via la réaction exotherme avec la chaux vive :



Chaux vive + eau = Chaux éteinte + Chaleur

b) L'évaporation d'une partie de l'eau, provoquée par la chaleur dégagée par l'hydratation de la chaux vive (15,5 kcal/mol);

c) L'apport de matière sèche qui diminue le rapport de la masse d'eau à la masse de solide (teneur en eau). La diminution attendue est de 1 % de teneur en eau par pourcent de chaux vive introduite. Si les conditions atmosphériques sont bonnes, teneur en eau peut diminuer encore plus sous les effets du malaxage et du vent.

III.3.2.2-La Chaux Eteinte :

a. Action à court terme :

La chaux éteinte diminue également la teneur en eau mais uniquement via l'apport de matière sèche dans le sol. La diminution de la teneur en eau est limitée à 0,3 % par pourcent de chaux éteinte introduite.

La chaux influe sur les charges électriques se trouvant autour des particules d'argile et modifie ainsi les champs électriques entre ces particules. Ceci entraîne leur floculation, ce qui a des conséquences non négligeables sur les caractéristiques géotechniques du sol.

La limite de plasticité augmente (W_P), mais la limite de liquidité (W_L) reste presque inchangée. Il en découle que l'indice de plasticité ($IP = W_L - W_P$) diminue. Figure III.1.

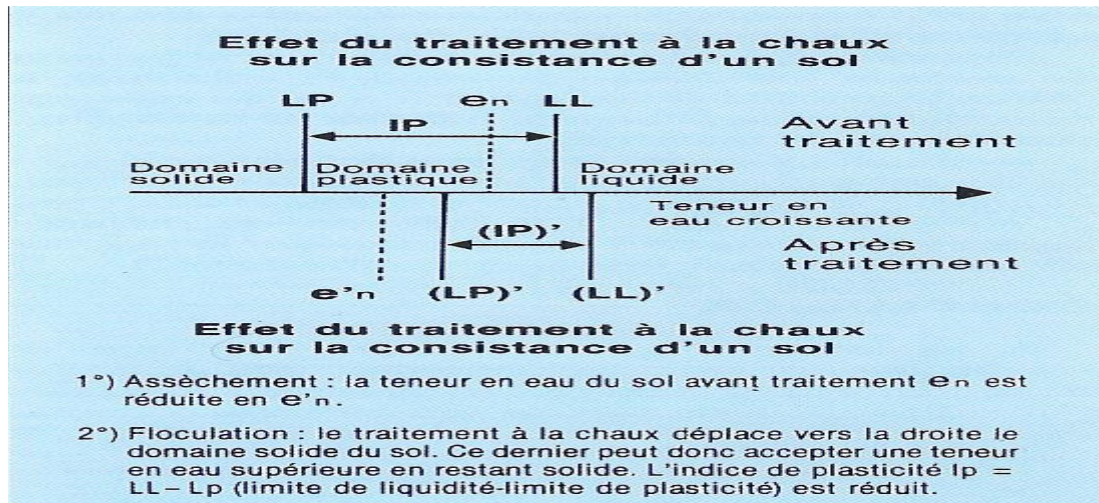


Figure III-1 : Variation d'indice de plasticité en ajout de la chaux [21].

La figure III.1 montre que les phénomènes combinés de la diminution de la teneur en eau naturelle du sol traité et de la diminution de l'indice de plasticité peuvent faire passer un sol de l'état plastique (déformable, collant -donc difficilement compactable) à l'état sec (rigide, frottant, friable - donc beaucoup plus facile à travailler).

3Le traitement à la chaux réduit donc la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche et augmente la valeur de la teneur en eau permettant de l'obtenir.

Aussi, la courbe Proctor d'un sol traité est déplacée vers la droite et vers le bas par rapport à la courbe du sol naturel. Ce déplacement est d'autant plus marqué que le sol réagit bien avec la chaux figure III.2.

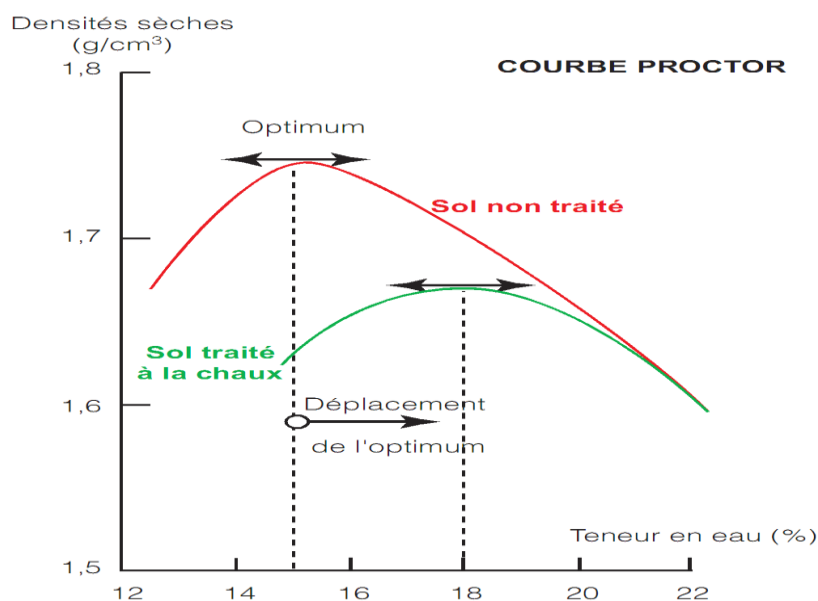


Figure III.2 : Influence de traitement à la chaux sur les caractéristiques d'un sol. [25].

b. Action à long terme :

C'est une action pouzzolanique qui se produit. Elle est due à la mise en solution en milieu de pH élevé (supérieur à 12) de la silice, de l'alumine et des oxydes de fer présents dans les minéraux argileux sous des formes cristallisées plus ou moins altérées. Ces éléments en solution réagissent ensuite avec la chaux pour former des ferro-silico-aluminates de calcium insolubles qui précipitent et cristallisent en présence d'eau, créant ainsi des liaisons de même nature que celles produites avec les liants hydrauliques.

Ces phénomènes se développent en général très lentement (plusieurs mois, voire des années) dans nos climats. Ils sont influencés par la température du milieu, la quantité et la nature de la fraction argileuse du sol et la teneur en eau du sol. Cette action a lieu à partir de pourcentages de chaux ajoutés de 3 à 4 %, en fonction des caractéristiques du sol.

Si, à court terme, une certaine résistance est également souhaitée, un traitement complémentaire avec un liant hydraulique est nécessaire.

La préparation d'un sol argileux à la chaux entraîne la formation de grumeaux qui rend ce sol bien apte à recevoir un traitement au ciment par exemple. La réaction de ce ciment avec le sol traité à la chaux consiste surtout en une hydratation de silicates et aluminates de calcium (ajoutés sous forme anhydride). Ils passent en phase liquide, après quoi les produits hydratés durcissent (« liaison hydraulique »). Par la croissance, l'imbrication et la ramification de plus en plus grande des microcristaux qui apparaissent, les grains de sols sont soudés et liés. De cette manière, ils forment des liaisons de plus en plus nombreuses

et dures. Le mélange durcit et atteint des résistances mécaniques élevées, une grande résistance au gel et une bonne imperméabilité.

Gallaway et Buchanan (1951) ont montré que la relation de la chaux avec l'argile est le résultat de deux processus :

Une réaction d'échange ainsi qu'une adsorption d'ions calcium non échangé, le résultat est une diminution de la capacité d'échanger.

Un agent cimentant se forme, il lie les particules entre elles, la chaux peut en effet stabiliser également les sols non gonflants.

Des expériences faites par Golbet et Klein ont montré que de faibles pourcentages de chaux (2 à 6%) entraînaient une réduction importante du gonflement, ainsi des conclusions équivalentes furent données par Jones, Michell et Spangler.

Abdljawad et al 1994; ont étudié l'influence de la variation de volume des constituants sur les caractéristiques des argiles gonflantes. L'étude a été effectuée sur des échantillons d'argiles anhydride. Il a été trouvé pour les deux types de mélanges à différentes le pourcent (0, 5, 10,20).des ajouts d'anhydride ou de gypse.

Les résultats qui ont trouvé que la pression de gonflement diminue lorsque le pourcent de $CaSO_4$ augmente, et beaucoup plus pour le mélange de l'argile anhydride figure.III.4, Ainsi que l'augmentation du pourcent de $CaSO_4$ pour ces types du sol induit une diminution de la limite d'Atterbergs figure.III.5.

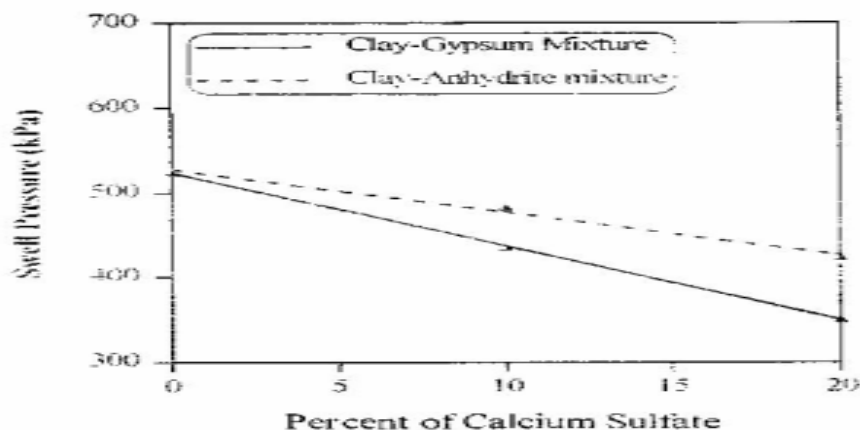


Figure.III.3: La pression de gonflement en fonction % de sulfate de calcium [11].

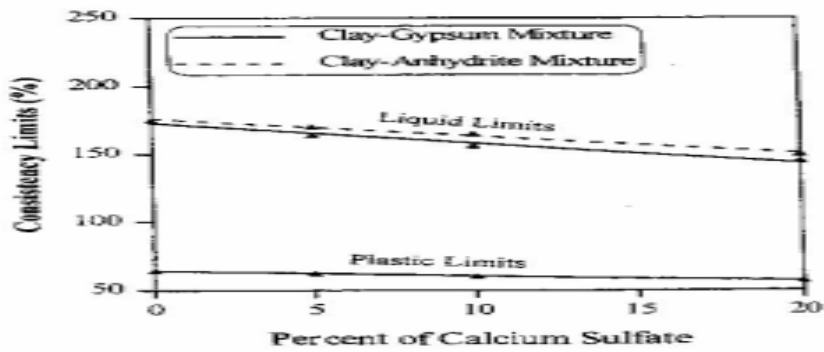


Figure.III.4: limites consistence du pour deux types de du sol en en fonction % de sulfate de calcium [11].

III.3.3-Méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol :

Il existe plusieurs méthode utilise dans la stabilisation de sol gonflement par la chaux, tel que le malaxage sur place, technique d'injection, colonnes de chaux... . (Monnaers 1947) [5].

III.3.3.1- malaxage sur place :

Le malaxage a lieu soit dans une installation annexe, soit en couche étalée figure.III.3. Coût de fourniture de chaux (et éventuellement de ciment) et de la mise en œuvre (scarification, épandage, nivellement et compactage) des sols en place.

En bref, le traitement en installation annexe figure III.4 présente les avantages suivants:

- ✓ Homogénéité du mélange;
- ✓ Réduction des émissions de poussière;



Figure III.5: Technique de traitement des sols par malaxage en couche étalier [23].



Figure III.6 : Traitement des sols par la chaux en malaxage dans l'installation [23].

III.3.3.2-Technique d'injection :

Le procédé de traitement par injection (figure III-5) est utilisé en surface et en profondeur si le terrain.

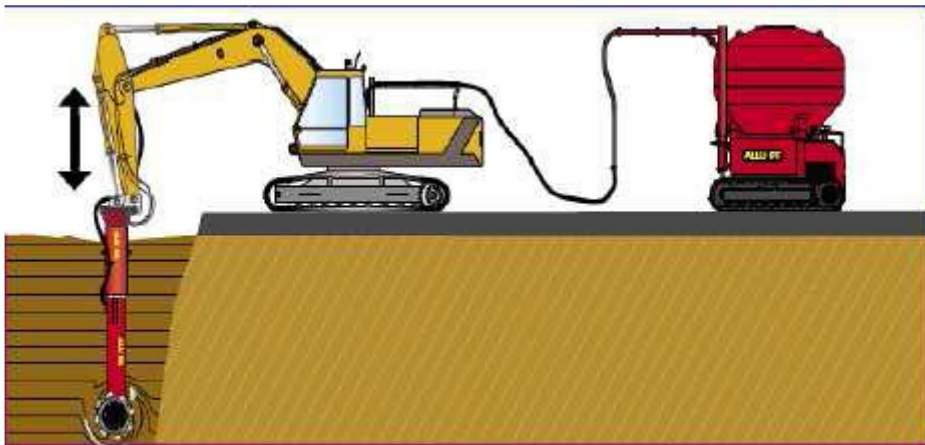


Figure III-7 : Technique par injection. [5]

III.4-STABILISATION PAR AJOUT DU CIMENT :

III.4.1-Ciment :

Les ciments sont des liants hydrauliques constitués de poudres fines de faire prise et de durcir progressivement au bout d'un temps plus ou moins long. Les composés obtenus sont stables au contact des eaux usuelles. Les ciments sont livrés dans le commerce en sacs ou en vrac.

L'action, de stabilisation par les ciments, est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et des conditions de température (Johson ; 1960). De plus, la présence de la chaux dans les ciments provoque des réactions d'échange. Les

pourcentages utilisés varient, comme pour la chaux, de 2 à 6%. Le ciment est parmi les liants les plus fréquemment utilisés dans traitement de sols de surface.

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques présentant une faible adaptation à la chaux. Le ciment rigidifie mieux et plus rapidement les sols comparativement à la chaux. De même, sa résistance au gel est meilleure.

(Mitchell et Raad (1973)) remarquent qu'appliqués à des argiles très plastiques, les ciments portlands sont, moins efficaces comparativement à la chaux. En effet, les argiles gonflantes ont une affinité à l'eau tellement grande que le ciment ne peut pas s'hydrater suffisamment au point que les réactions pouzzolaniques s'achèvent complètement. Généralement, le ciment est avantageux d'être utilisé lorsque les sols ne sont pas réactifs à la chaux **(Chen, 1988; Nelson et al, 1992)**.

Si la quantité d'eau est suffisante pour la réaction de prise de ciment, l'utilisation de ce dernier réduit la limite de liquidité, l'indice de plasticité et de potentiel de gonflement du sol.

Groft (1967) rapporte que le ciment fait augmenter la limite de retrait et la résistance du sol au cisaillement de 5% à 25% mieux que la chaux. L'hydroxyde la chaux. (Chaux éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)), ce qui permet aux réactions d'échanges cationiques de ce produire **(Mouroux et al., 1988)**.

Jones (1958) utilise des pourcentages de 2% à 6*% dans le traitement de l'argile portée ville en Californie. Il sorte une diminution considérable du potentiel de gonflement.

(Ola, (1975)) rapporte que le potentiel de gonflement d'une argile du Nigeria est fortement réduit par ajout de 8% de ciment.

Les quatre mécanismes contribuant à la stabilisation au ciment des matériaux de sol argileux sont résumés dans le tableau (III.2) [11].

Tableau.III.2: Mécanismes de la stabilisation par ciment des sols argileux [11].

Mécanisme de Stabilisation au Ciment	Description	Importance
Hydratation par ciment	Les fortes interactions se développent entre les particules de sol. Le plus haut Squelette continu des formes matérielles dures et fortes et enferme une matrice de sol inchangé, renforçant le matériel traité et en remplir des vides. Perméabilité et le gonflement /retrait a tendances de réduites, La résistance aux changements due a augmentation de la teneur en eau	Très élevé
Echange cationique	L'échange cationique change la charge électrique, réduisant la plasticité et ayant pour résultat la floculation, et agrégation des particules de sol.	Elevé
Carbonations	La chaux produite pendant l'hydrations du ciment réagit avec de l'anhydride carbonique en air aux agents de cimentage de forme.	Moyen
Réaction Pouzzolanique	La chaux libre libérée pendant l'hydratation et de la silice ou l'alumine des particules d'argile réagissent en présence de l'humidité aux agents de cimentage de forme.	Moyen

III.5-STABILISATION PAR AJOUT DES CENDRES VOLANTES :

Les cendres volantes, produites dans la combustion des charbons subbituminous, présentent des caractéristiques de cimentage et peuvent être utilisées dans une large gamme des applications de stabilisation. Le traitement de cendres volantes peut efficacement réduire le potentiel de gonflement des argiles fortement plastique et empêcher le gonflement sous les pressions plus petites de base.

Zalihe Nalbantoglu, (2004); a étudié la stabilisation des argiles gonflantes par les cendres volantes. Les résultats d'essai en laboratoire sur ces sols indiquent que ces cendres

volantes sont efficaces à l'amélioration de la texture et la plasticité des sols traités. Elles permettent de réduire l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement.

La réduction en valeurs de la pression de gonflement des deux sols indique que le gonflement des sols est empêché pour de petites valeurs de pression.

Dans la même étude, des valeurs de CEC de capacité d'échange cationique ont été mesurées pour indiquer les changements de la minéralogie des cendres volantes des sols traités et ce pour expliquer la réduction du potentiel de plasticité et d'absorption de l'eau.

Les faibles valeurs de CEC indiquent que le traitement par les cendres volantes changent la minéralogie du sol traité et produit de nouveaux minéraux secondaires.

L'utilisation des cendres volantes comme matériaux de stabilisation pour le sol semble être une solution intéressante. Cette utilisation aurait des avantages, en plus de la stabilisation, environnementaux [5].

III.6-STABILISATION PAR AJOUT DES MELANGES :

(CIMENT+CENDRES VOLANTES OU CHAUX / CENDRES VOLANTES OU CIMENT+CHAUX)

Dernièrement, un certain nombre d'auteurs ont étudié l'influence de mélanges de (chaux-cendre volcanique), mélanges (ciment-cendre volcanique) ou des ajouts ces trois constituants, sur les sols gonflants. Les résultats obtenus étaient encourageants.

III.7-STABILISATION PAR AJOUT DE SABLE:

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de l'ajout de sable sur le gonflement. Nous citerons certaines d'entre elles :

Satyanarayana (1969), a étudié le comportement de l'argile de Black Cotton au sud de l'Inde sous forme de mélange avec le sable, et sous forme de couches. Il a constaté que la pression du gonflement est réduite par le simple ajout de faibles pourcentages de sable. Plus le pourcentage de sable augmente, plus la réduction de la pression diminue (différence marquée à partir 50% de sable).

L'insertion de couches de sables (différentes positions avec l'argile), réduit la pression du gonflement en proportion appréciable due principalement à la capacité du sable à absorber le gonflement de l'argile. Cette capacité du sable dépend de la facilité de la couche de sable avec laquelle elle se déforme par compression ou, par mouvement latéral.

Komornik et livneh (1969), ont étudié l'influence de la granularité des constituants sur les caractéristiques des argiles gonflantes. Pour cela, ils ont utilisé des mélanges argile - sable et argile- marbre à différents pourcentages. Il a été constaté que la diminution du taux du gonflement des différents mélanges est due à la faible densité sèche de l'argile et à l'augmentation du matériau inerte dans les mélanges. Ainsi, ils ont constaté qu'il y a une influence du taux de l'humidité de l'argile sur la valeur de la pression du gonflement.

Mouraux (1969), a montré dans sa thèse que, si la couche gonflante est d'une grande épaisseur, de manière à ne pas pouvoir l'excaver complètement alors, il faut excaver jusqu'à une certaine profondeur puis, remblayer pour rétablir les conditions de pression initiale. Pour cela, souvent c'est le sable qui est utilisé. le bas du remblai est faiblement compacté et ce pour deux raisons :

Le haut du sol gonflant serait très compact, et par conséquent son potentiel de gonflement est élevé.

Le bas du remblai peut alors « encaisser » un gonflement éventuel.

Seed, Woodward et Lugren (1969). Ont retenu trois paramètres significatifs de l'aptitude au gonflement d'un sol : Le pourcentage d'éléments argileux inférieur à 2μ et leur nature minéralogique, l'indice de plasticité et l'indice de retrait.

Les auteurs ont mesuré le potentiel de gonflement de sols artificiels préparés en mélangeant des minéraux argileux avec diverses quantités de sables. Ce mélange permet

de diminuer le pourcentage. L'influence sur la pression de gonflement et, sa relation avec le pourcentage des éléments inférieurs à 2μ dans l'échelle bi logarithmique est linéaire.

Myondo (1979), a étudié l'effet du compactage et la résistance au cisaillement de deux argiles de composition minéralogique différente mélangées avec le sable grossier à différents pourcentages. Il a obtenu les résultats suivants :

- La granularité et la minéralogie influent sur la compactibilité des sols.
- Mise en évidence d'une limite granulométrique à 30% d'argile (70% de sable) correspondant à la meilleure compacité obtenue sous l'effet de l'énergie de compactage Proctor modifié. Les résultats des essais de cisaillement sont :

- La cohésion augmente avec le pourcentage d'argile.
- L'angle de frottement (ϕ) diminue avec l'augmentation de la quantité des fines dans les mélanges argile-sable et la variation est presque linéaire.

Une partie de l'étude d'El Sayed et d'EL Sohby (1981), a porté sur le traitement d'un sol argileux gonflant par ajout de sable et de limon à différentes concentrations. Ils ont constaté que la grosseur de la fraction non argileuse a une influence sur le gonflement. C'est-à-dire, que les particules fines provoquent un gonflement important. En plus, la pression de gonflement pour les mélanges argilelimon était plus importante que celle des mélanges argile-sable.

Mehmit et Ishibashi (1982) , ont mené une investigation expérimentale sur 8 mélanges argile-sable. Ils ont étudié la variation du gonflement en fonction de la température (à 24°C , 38°C et à 66°C). Ils ont constaté que plus le pourcentage du sable n'augmente, plus le gonflement diminué. Ils ont remarqué aussi, une réduction de 17% à 28% du gonflement quand la température diminue.

Suratman (1985), a étudié la variation du gonflement d'un mélange de montmorillonite et de sable à différents pourcentage (10 à 50%) ; le sable étant de granulométrie moyenne ($0.1\text{ mm} < D < 0.5\text{ mm}$). il a constaté une réduction du gonflement libre de 50% pour 30% de sable et une réduction de 70% pour 50% de sable.

Bengara H et col (2004), ont été tenté de réduire le potentiel de gonflement et sa pression par ajout du sable a des argiles étudiées ces sables à granulométrie et à pourcentages différents. Aussi ont été observé l'évolution du gonflement dans le temps, où ils ont

remarqué que les résultats obtenus étaient encourageant et conformes aux recherches déjà établies [47].

III.8-STABILISATION PAR SOLUTIONS SALINES :

Des différentes études ont montré que la stabilisation par les sels pouvait réduire considérablement le gonflement des argiles. Nous citerons quelques exemples de ces travaux [11].

Peele (1937), a remarqué que le carbonate de calcium augmente la résistance du sol à l'érosion. Il permet d'augmenter le potentiel floculé des argiles. Haxaire (1956), a déterminé la quantité de la molécule organique pouvant se fixer sur la montmorillonite en essayant de relier cette fixation avec la structure, la nature et l'ionisation de ces molécules ; Des familles de molécules organiques ont été ainsi étudiées. Il a montré aussi que certaines molécules telles que la guanidine et la benzine se fixent irréversiblement en quantités supérieures à la capacité d'échange de base sur la montmorillonite.

Hazart et Wey (1965), ont étudié la cinématique du gonflement de la montmorillonite en présence de l'éthylène glycol, en moyen de la diffraction X et ont mis en évidence la formation de la complexe argile glycol en insistant sur le rôle important joué par le cation interfoliaire.

Mondshine et Kercheville (1966), ont utilisé du chlorure de sodium et du chlorure de calcium dans les boues à l'huile pour déshydrater des argiles. Ils ont montré que le chlorure de calcium est plus efficace. Les boues traités ont, été testés sur des puits de forage en Louisiane et en Algérie et ont donné des résultats relativement satisfaisants. Dider(1972), s'est penché dans ses recherches sur l'influence des sels sur la pression du gonflement et le gonflement et libre de la montmorillonite. Il a donné des relations exprimant le gonflement en fonction du pourcentage théorique d'éléments inférieurs à 2μ et de l'indice de retrait de la montmorillonite pour divers fluides hydratants.

Waller et Lawler (1976), ont étudié l'influence des sels sur un échantillon d'argile reconstituée à partir de déblai de forage. Les meilleurs résultats sont obtenus à l'aide des solutions qui associent le KCl avec un polymère.

Ittis(1979), a étudié plusieurs ses types de gonflement en présence de plusieurs types de sels. Cette étude a mis en évidence deux agents stabilisants, le chlorure de potassium et le chlorhydrate de guanidine.

Azzouz (1983), a effectué ses travaux sur la stabilité des argiles feuilletées. Il a montré que les meilleurs résultats peuvent être obtenus par l'association d'un sel de potassium et d'un polymère.

Komine et Ogata, 1992, ont étudié l'efficacité d'un sel à partir du concept de l'épaisseur de la double couche diffuse. Même si certaines recherches plus récentes Qi et al 1996. Ont montré qu'il ne s'agissait que d'un aspect très partiel du phénomène.

Jennings et knight(1957); ont effectué des essais sur des argiles silicate sec riche en sodium à l'état saturé et à état non saturé. Ils ont déduit que le potentiel de gonflement est très élevé à l'état saturé par rapport l'état non saturé. Le degré de saturation étant fixé et la composition chimique du sol argilesilice sec ont été analysés par l'ajout d'un taux de sodium dans un échantillon et un taux du calcium dans un autre. Cette expérience a montré que le potentiel de gonflement est plus important dans des échantillons riches en sodium par rapport aux échantillons riches en calcium ; c.à.d. le sodium est un facteur chimique favorable pour le gonflement du sol.

Les même auteurs ont étudié l'influence de la composition chimique de fluide imbibé dans le sol argile-silice sec et riche en sodium sur le potentiel de gonflement f. Le potentiel de gonflement est plus important qu'aux deux autres échantillons imbibés par le fluide 0.4 N NaCl et 0.4N CaCl₂.

La même expérience a été effectuée sur un sol argile-silice sec et riche en calcium. Le résultat montre que l'échantillon imbibé par la solution de 0.4 N NaCl présente un potentiel de gonflement plus important qu'aux deux autres échantillons imbibés par l'eau de robinet et 0.4N CaCl₂.

Olson et Mesri1970 ; ont réalisé des travaux dans le but d'étudier l'influence des cations de Na⁺ et Ca²⁺ sur la compressibilité du sol argile-silice sec et saturé. Les résultats indiquent que l'indice de vide est plus important dans l'échantillon riche en le sodium qu'à celui riche en calcium.

Ces mêmes auteurs ont lancé d'autres essais, sur un autre l'échantillon de sol argile-silice saturé en calcium et imbibé par de l'eau de robinet et 0.4N CaCl₂. Ils ont conclu que l'indice de vide est important dans l'échantillon imbibé à l'eau de robinet. Ce résultat monte que les cations de calcium joue un rôle négligeable par rapport aux cations de sodium. Ainsi, la compressibilité est plus influencée par les cations de sodium.

Hachichi et Fleureau (1999) ont étudié la réduction du gonflement de plusieurs échantillons intacts d'Algérie par des sels. Dans cette étude, des réductions substantielles ont été obtenues avec de fortes concentrations de sels.

Hachichi et al (2000), Bouroukba.S (2001), ont étudié la réduction du gonflement des argiles de la région d'Oran (Sidi Chahmi et Mers El Kébir) par des sels des polymères. Des réductions importantes ont été observées par l'association de fortes concentrations en

chlorure de potassium et en chlorure de calcium (66% et 48%), mais pour le chlorure de sodium à forte concentration ne donne pas de bons résultats (22% et 28%) ; mais il a l'avantage d'être moins coûteux.

Aboubekr.N et Aissa mamoune.S.M, (2003), ont étudié l'influence des sels sur le gonflement libre des argiles. Afin de mettre en évidence l'influence de ces sels sur l'amplitude, l'étude a été effectuée sur des échantillons d'argiles naturelles et artificielles en utilisant quatre sels différents (chlorure de potassium, Chlorure de Sodium, Chlorure de Calcium, Sulfate d'Ammonium). Des réductions importantes ont été observées par l'association d'un sel de chlorure de potassium mais pour chlorure de calcium est moyen a faible.

Markus Tuller, Dani Or (2003); ont observé à l'aide d'un microscope électronique (SEM) (figure. III.8) que les distances moyennes entre les couches sont beaucoup plus petites dans Ca_{2+} qu'en Na_{+} montmorillonite. En raison de la position face à face collante le nombre de feuillet par trajectoire est plus grand en montmorillonite Ca_{2+} (55 à 0.032 barre ; 225 à la barre 10 ; et 400 à la barre 1000). En outre, tactoids formant le micropore les murs sont plus longs dans Ca_{2+} que dans la Montmorillonite Na_{+} en raison de disposition préférée à former les liens face à face.

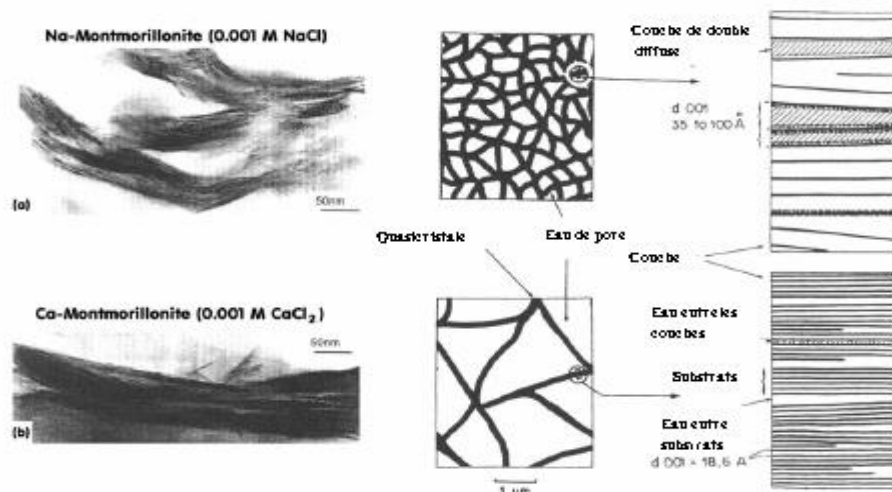


Figure.III.8: Microstructure de texture d'argile comme affectée par la composition en solution (électrolyte) (Tessier, 1990). [11]

Schmitz R. M, van Paassen L.A (2003); ont étudié l'effet des différents types sels sur la minéralogie des argiles. Ils ont proposé une formulation empirique décrivant la réduction de la limite de liquidité par les solutions salines avec l'augmentation de sel figure (24).

Jad warkim, 2005 ; a été effectué des essais, sur l'argilite de Tournemire, ont montré que les déformations dues au gonflement et au retrait sont influencées par la nature et la

concentration en sel dissout dans l'eau déminéralisée. Il a été observé que le gonflement libre est plus élevé pour une solution de NaCl, plus faible pour une solution de KCl et intermédiaire pour une solution de CaCl₂. Il a été constaté que ces déformations sont significatives et ne dépendent pas du chemin chimique suivi par l'échantillon pour des essais effectués sous faibles contraintes.

Aussi, il a été remarqué que l'activité de la solution n'a pas d'influence directe sur le gonflement (tableau III). , il a été effectué des essais avec des solutions de NaCl ont également montré que le coefficient qui exprime le rapport entre la déformation axiale sous contrainte et la déformation libre, permet de réduire le nombre d'essais, étant donné qu'il dépend uniquement de la contrainte appliquée et non de la concentration en sel.

Tableau III.3: *Activité et gonflement pour des solutions salines de normalité. [11]*

Solution saline	D de gonflement (%)	Activité
1M KCl	1.05	0.9688
1M CaCl₂	0.13	0.9422
1M NaCl	0.028	0.9668

En outre, il a été observé que le gonflement normalisé ne dépend pas de l'orientation de l'échantillon, ce qui signifie que l'anisotropie du gonflement est indépendante de la nature et de la concentration en sel et est égale à 4. Il a été d'affirmer ce constat par des essais complémentaires réalisées au moyen de l'enceinte hygrométrique. Ainsi il a été réalisé des essais de mesure de l'évolution du pH ont prouvé que le gonflement se stabilise avant la stabilisation du pH.

III.9-SUBSTITUTION :

Cette technique utilisé généralement dans les constructions, il s'agit de décaper partiellement le sol médiocre avec un débordement de 2 m par rapport aux murs extérieur ; Elle consiste à excaver jusqu'à une certaine profondeur puis pose un filme de membrane et une couche de sable 10cm, puis remblayer avec de matériau sélectionné de bon caractéristique, peu perméable et inerte à l'eau [39] figure III 9.

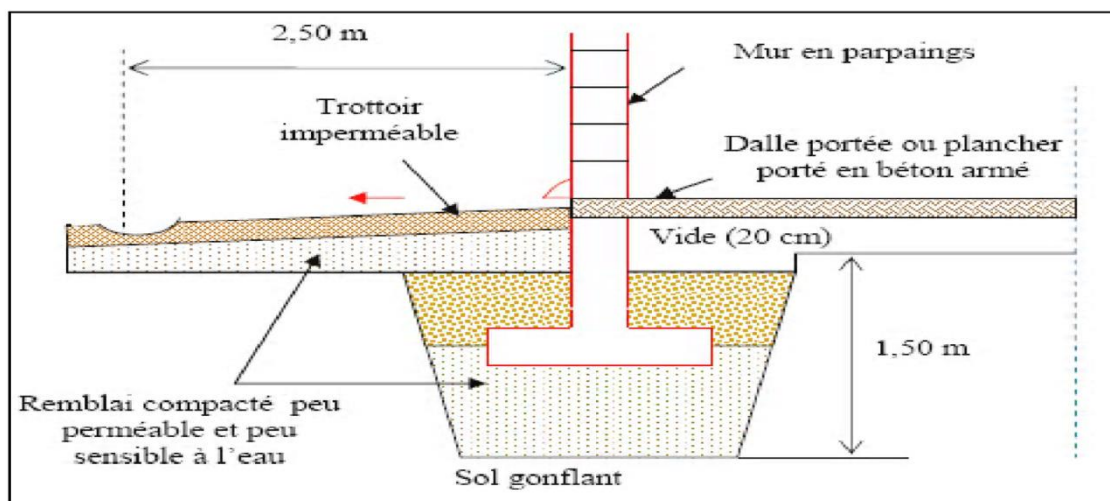


Figure III.9: Semelle Superficielle Sur sol reconstitué (Mouroux 1988). [7]

C'est la solution la plus évidente, et la plus utilisée dans la région de In Amenas afin d'obtenir un bon sol support figure III-8.



Figure III-10 : Technique de Reconstitution DTR SONATRACH IN AMENAS

III.10- AUTRES TECHNIQUES DE STABILISATION :

III.10.1-DRAINAGE :

C'est la technique la plus classique qui est mise en œuvre. Plusieurs procédés sont utilisés ; comme les tranchées drainant, drains de carton, drains de sables verticaux, tapis de la cote de la nappe (Livet) [39].

III.10.2-APPLICATION DE FORTES PRESSIONS :

Le gonflement peut être évité en appliquant au sol des pressions supérieures à la pression de gonflement. IL s'agit de pression de gonflement réelle, c'est-à-dire correspondant à la pression limite minimum nécessaire pour empêcher le sol de gonfler par des chemins de contraintes réelles, in situ, cette pression peut être appliquée soit par l'édifice lui même,

soit par des surcharges qui sont généralement des remblais de sols non gonflants (Mouroux.1969), cité par C'est une solution à déconseiller.

III.10.3- COMPACTAGE :

Dawson recommande de compacter les argiles à des densités minimales et Seed (1961) note que les argiles compactées de la côte sèche de l'optimum ont plus tendance à gonfler que si elles sont compactées de la côte humide. Malheureusement, de côte humide les argiles sont moins résistantes. Il faudrait donc retrouver un compromis.

III.10.4-PREHUMIDICATION:

On crée ainsi un gonflement avant construction et si une forte teneur en eau est maintenue. Le volume restera sensiblement constant par la suite. Deux techniques sont utilisées (Bengraa .H, 2004) :

- Simple arrosage par jet.
- Création de bassins au-dessus du sol gonflant, et c'est beaucoup plus utilisé.

III.10.5-TRAITEMENT THERMIQUE :

Une augmentation de la température peut améliorer la résistance d'une argile. En réduisant la répulsion électrique entre les particules sous l'effet de la chaleur on provoque un écoulement de l'eau interstitielle due au gradient thermique appliqué.

III.10.5-UTILISATION DE FONDATIONS ET D'EDIFICES SPECIAUX :

Elles sont utilisées, soit pour réduire le gonflement, soit pour dissiper les pressions du gonflement. L'étude la plus intéressante était faite par Jennings et Evans (cité par Mouroux ; 1969). Elle donne, en effet, plusieurs types de construction suivant le soulèvement estimé. Elle comprend:

Des renforcements en acier des murs pour assurer une plus grande rigidité.

Des «constructions Split », c'est-à-dire, conçues pour assurer le déplacement éventuel sans dommage d'une partie de l'édifice.

Des reports de charges sur des semelles isolées.

Des pieux fondés sur une couche peu gonflante.

Par ailleurs, on peut placer un tapis graveleux entre l'argile et la construction pour amortir l'effet du gonflement.

III.11-Avantages de stabilisation:

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au ciment ou au liant hydraulique routier (LHR) est une technique qui offre trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux.

III.11.1-Avantages techniques :

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique permet la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, durable et stable, présentant des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. En outre, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle structure.

Cette technique assure un bon comportement par temps chaud sans déformation, niorniérage et un bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à la rigidité du matériau et à l'effet de dalle induit. Enfin, le traitement des sols en place est une technique possédant une facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation.

III.11.2-Avantages économiques :

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique est une technique de traitement à froid, donc utilisant peu d'énergie. La réutilisation des matériaux en place est un facteur d'économie important puisqu'il réduit au minimum les déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport.

L'absence de transport de granulats ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier.

Enfin, le traitement des sols en place est une technique très économique, notamment du fait de la durée plus courte des travaux par rapport à une solution avec décaissement.

III.11.3-Avantages écologiques et environnementaux :

Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergie globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'utilisateur et aux riverains et une réduction de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier.

La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui contribue à préserver l'environnement.

Tableau III.4: Avantages et Inconvénients des Techniques de Stabilisation Couramment Utilisées (Babouri 2008) [5].

Techniques	Procédés	Avantages	Inconvénients
Stabilisation mécanique	Compactage	-Le compactage est le plus économique -Réduire le potentiel expansif	Il faut une grande quantité d'eau. (compacter au-dessus de l'optimum avec une w_n élevée).
	Substitution	-	· L'épaisseur de la couche. · Disponibilité du matériau
	Préhumidification	-	· Le temps de l'opération. · La distribution uniforme de w_n
Amélioration par congélation	Circulation d'un fluide froid (azote liquide) dans des tubes	- Lorsque aucune solution n'est possible	· La réalisée le plus rapidement possible. · Il faut tenir compte de la Déstabilisation du massif de sol au dégel.
Stabilisation Thermique	Augmenter la température	Réduire la répulsion électrique entre les particules.	-Très coûteuse.
Stabilisation chimique (Par ajout de matériaux)	Sels	-Augmenter la concentration ionique de l'eau libre. -Réduire le phénomène d'échange. -Augmenter la résistance. -Diminuer la plasticité. -Réduire le potentiel de variation de volume.	-Le choix d'un type, de dosage et de la méthode d'addition d'un produit. (Valence et rayon du cation).
	Ciment	-Augmenter la limite de retrait -Diminuer la plasticité, la densité sèche et la pression du gonflement.	-Utilisation d'un dosage important.
	Chaux	-Augmenter la résistance et w_{opt} . -Utilisation d'un faible dosage.	-Carbonatation de la chaux.

III.12-CONCLUSION :

L'utilisation des techniques de stabilisation permet :

- De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une bonne consistance pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé.
- De modifier les propriétés du sol.
- D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols médiocres, ainsi que gaine des quantités important des matériaux sélectionné utilisé à la reconstitution.

La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux. Quelques exemples sont cités concernant l'utilisation de produits chimiques servant à la stabilisation des sols argileux.

Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement figure III.11.

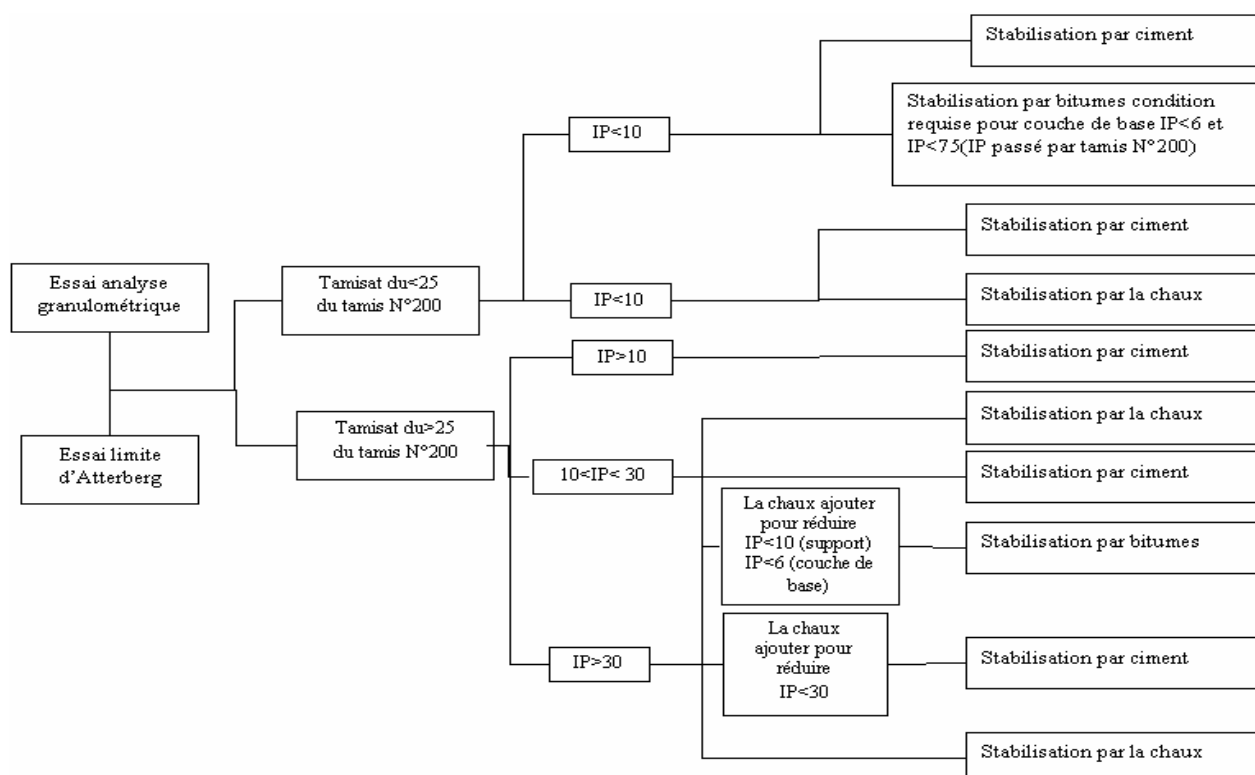


Figure III.11. L'organigramme pour choisir la stabilisation chimique appropriée pour un projet. [11]

- suite aux résultats théoriques de la stabilisation par ajout de sable, le potentiel de gonflement diminue dans le temps avec l'augmentation du pourcentage de sable. De plus, cette évolution change selon qu'il s'agisse d'un sable grossier ou fin. Les résultats obtenus montrent que le potentiel de gonflement diminue lorsque le sable ajouté est d'une granulométrie grossière, il est nécessaire de prévoir l'utilisation de cette technique à la stabilisation des sols de cette région au lieu de la méthode de reconstitution la plus coûteuse ; Plus le manque des matériaux sélectionné.

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude théorique des sols gonflants de la région d'In Amenas et les solutions de stabilisation les plus favorables. L'intérêt a été particulièrement porté pour objectifs :

Une collection des données et une étude bibliographique dans le premier chapitre à été réalisée dans ce mémoire, a mis en relief de l'importance et les conséquences du ce phénomène sur la stabilité et le comportement des ouvrages réalisés sur les sols argileux. Il a également permis de mettre en évidence de la complexité de ce phénomène surtout a l'échelle microscopique en raison des nombreux mécanismes impliqués (adsorption, osmose, capillarité).

Aussi, une étude expérimentale du gonflement présenté par quelques résultats trouvés par des différentes interventions sur site. D'après les observations et les suivis tentativement de l'évolution du gonflement en fonction du temps.

Le potentiel de gonflement obtenu par les deux méthodes COVAR- LYTTON et ASTM est partiellement différent, et nous montre que l'argile d'In Amenas a un potentiel de gonflement variable du moyen à élever.

Suite aux résultats de la stabilisation par ajout de sable, le potentiel de gonflement diminue dans le temps avec l'augmentation du pourcentage de sable. De plus, cette évolution change selon qu'il s'agit d'un sable grossier ou fin. Les résultats obtenus montrent que le potentiel de gonflement diminue lorsque le sable ajouté a une granulométrie grossière, il est nécessaire de prévoir l'utilisation de cette technique à la stabilisation des sols de cette région au lieu de la méthode de reconstitution la plus coûteuse ; Plus le manque des matériaux sélectionné.

Références Bibliographiques :

- * [1].**A.H.BELHADJ 2007** : CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA STABILISATION DU GONFLEMENT PAR LE SABLE OU LA CHAUX ; Application aux bentonites de MAGHNIA
- * [2].**H.NOWAMOOZ 2007**: RETRAIT/GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX COMPACTES ET NATURELS.
- * [3].**J.GAOMBALET 2004**: LE GONFLEMENT DES ARGILES ET SES EFFETS SUR LES OUVRAGES SOUTERRAINS DE STOCKAGE.
- * [4].**M.HARRAT 2007** : CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DU PROCEDE DE FABRICATION DE LA CERAMIQUE.
- * [5].**M.DJAANI 2011**: STABILISATION DES SOLS GONFLANTS DE LA REGION D'IN-AMENAS PAR AJOUTS DES LIANTS HYDRAULIQUES (CHAUX ET CIMENT).
- * [6].**H. MOBAREK-HAMEL 2011** : PREVISION DU GONFLEMENT DES ARGILES D'IN-AMENAS (20EME CONGRES FRANÇAIS DE MECANIQUE).
- * [7].**L.BOUNA NOVEMBRE 2012**:FONCTIONNALISATION DES MINERAUX ARGILEUX D'ORIGINE MAROCAINE PAR TiO_2 EN VUE DE L'ELIMINATION PAR PHOTOCATALYSE DE MICROPOLLUANTS ORGANIQUES DES MILIEUX AQUEUX
- * [8].**N.MOUDJAHID2008 (LTPS)**: ETUDE GEOTECHNIQUE DU TERRAIN DE LA CENTRALE TURBINES A GAZ A IN AMENAS SONALGAZ.
- * [9].**M.KHEMAKHEM**:LES ESSAIS DE LA GEOTECHNIQUE ROUTIERE ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE LES NORMES
- * [10].**Z. DERRICHE et M. KEBAILI**:PREVISION DU GONFLEMENT DES ARGILES D'IN-AMENAS.
- * [11].**F.Z.AZZOUZ** : CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA STABILISATIONCHIMIQUE DE QUELQUES ARGILES GONFLANTES DE LA REGION DE TLEMSEN
- * [12].**T.Camille** : CARACTERISATION ET QUANTIFICATION DES MINERAUX ARGILEUX DANS LES SOLS EXPANSIFS PAR SPECTROSCOPIE INFRAROUGE AUX ECHELLES DU LABORATOIRE ET DU TERRAIN.
- * [13].**FONDATION.MAIF** : ANALYSE DU COMPORTEMENT DES SOLS ARGILEUX LORS DE CYCLES CLIMATIQUES EXTREMES ; APPLICATION AU RISQUE SECHERESSE : AIDE AU DIAGNOSTIC ET RECOMMANDATIONS.

- * [14]. Le retrait –gonflement des argiles 4^{ème} version 06/08/2007 (comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel).
- * [15].**A.DJEDID** : L'IDENTIFICATION DES SOLS GONFLANTS : POUR UNE DEMARCHE UNIFIEE.
- * [16].**Z.BELABBACI, A.MAMOUNE & A.BEKKOUCHE**: STABILISATION D'UN SOL GONFLANT PAR L'AJOUT DE LAIT DE CHAUX.
- * [17].**M.BAKHTI** : STABILISATION DES SOLS GONFLANTS PAR AJOUT DE POUDRETTE DE CAOUTCHOUC ISSUE DU BROYAGE DES PNEUS USES
- * [18]. **A.BOUALBA** : CARACTERISATION DES ARGILES DELA REGION DE BORDJ OMAR DRISS WILLAYA D'ILLIZI.
- * [19].**KEBAÏLI Nabil**.Analyse du gonflement de l'argile en relation avec ses limites de consistance : Application aux argiles de Hassi Messaoud et d'In Aménas
- * [20].**M.S.KARROUT** : Influence de la qualité de l'eau d'inondation sur le potentiel de gonflement des argiles expansives de Hassi Messaoud et d'In amenas.
- * [21].**J. DUPRAZ & M.ZOHR**: APPORTS DE LA TECHNIQUE DE TRAITEMENT DE SOLS ARGILEUX ET LIMONEUX A LA CHAUX.
- * [22].**N.MAUBEC**.APPROCHE MULTI-ECHELLE DU TRAITEMENT DES SOLS A LA CHAUX ETUDES DES INTERACTIONS AVEC LES ARGILES.
- * [23].**BENOR** : CHAUX POUR LES TRAITEMENTS DES SOLS.
- * [24]. **M.DIOP** :CONCEPTION DE STRUCTURES ROUTIÈRES SUR MARNES ET ARGILES GONFLANTES Etude de cas : BARGNY-DIAMNKNIO.
- * [25].Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de forme (DOCUMENTATION TECHNIQUE : Routes n°89 • Septembre 2004).
- * [26]. **A. LE ROUX** : Traitements des sols argileux par la chaux.(*Assistant Section "Mécanique des Roches" Département des Sols Laboratoire Central*).
- * [27]. **F.Z.AISSIOU, A.NECHNECH** :Amélioration De Caractéristiques Mécaniques D'un Sol Argileux Par Incorporation De Chaux.
- * [28].**P.GIROUD. A. BOTTERO**: Influence des propriétés physico-chimiques des argiles monominérales sur leur comportement mécanique.
- * [29].TECHNIQUES ET PRATIQUE DE LA CHAUX (Deuxième édition 2003).
- * [30].**B. LOUAFI& R. BAHAR** : ETUDE EN LABORATOIRE DE L'EFFET DE L'APPORT D'UN MATERIAU INERTE SUR LES CARACTERISITIQUES DE GONFLEMENT D'UNE MARNE ARGILEUSE.

- * [31].**F. MELLAL & B. LAMRI**: ETUDE DU COMPORTEMENT D'UNREMBLAI ROUTIER TRAITÉ A LA CHAUX CAS DE L'AUTOROUTE EST-OUEST.
- * [32]. **A.HACHICHI, S.A.BOUROKBA, A.BENAISSA, J.M FLEUREAU, M. HATTAB, S. TAIBI**:ETUDE DES PHENOMENES RETRAIT- GONFLEMENT ET STABILISATION DESSOLS GONFLANTS DE LA REGION D'ORAN.
- * [33].**M.I.GHEMBAZA, M.DADOUCH, Z. BELLIA**:EFFET DU CIMENT SUR LE COMPORTEMENT PHYSICO-CHIMIQUE D'UN MATERIAU DE LA REGION DE SIDI BEL ABBES.
- * [34]**DTCES-CETE Sud- Ouest** : TRAITEMENTS DES SOLS A LA CHAUX ET (OU) AUX CIMENTS PRESENTATION SYNTHETIQUE DES ASPECTS TECHNIQUE ET ECONOMIQUE.
- * [35].**J.ABDO**.TRAITEMENT DES SOLS EN PLACE AUX LIANTS HYDRAULIQUES (centre d'information sur le ciment et ces applications).
- * [36].**L.SAUSSAYE**. Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification.
- * [37].**J.François & B.SOYEZ** :Les essais de gonflement.
- * [38].**F.ASSASSI 2010** : SYNTHESSES ET CARACTERISATIONS DES NANOCOMPOSITES POLYPYRROLE/MONTMORILLONITE ORGANOMODIFIEE A STABILITE THERMIQUE AMELIOREE,
- * [39].**B.MAZOUZ** :Modélisation par élément finis d'une semelle filante flexible soumise à l'action des sols argileux gonflant.
- * [40].**M.CHRETIEN** : COMPREHENSION DES MECANISMES DE RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX : APPROCHE SUR SITE EXPERIMENTAL ET ANALYSE DE SINISTRE SUR CONSTRUCTIONS INDIVIDUELLES.
- * [41].**AFNOR**: NF P 94-056 Analyse Granulométrique ;
- * [42].**AFNOR**:NF P 94-051 LIMITES D'ATTERBERG ;
- * [43].**AFNOR**:NF P 94-068 BLEU METHYLENE ;
- * [44].**AFNOR**:NFP94-091 OEDOMETRIQUE,
- * [45].**AFNOR**: NF P94-071 CISAILLEMENT ;
- * [46].**Code de bon pratique** : Pour le traitement des sols à la chaux et /ou liant hydraulique.
- * [47].**BOUALBA Abdellah** : Caractérisation des Argile de bordj Omar Dris.