



Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie



Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie civil

SPECIALITE : Géotechnique

THEME

Etude de l'effet du temps d'une sur propriétés mécanique d'une argile expansive traité par différents types de ciment et reconstitué à forte énergie de compactage

Présenté par :

Gherabi Ouahid

Saker El arbie

dirigé par :

Mekki Lakhdar

Promotion: 2019/2020

REMERCIEMENTS

Je ne remercie jamais assez ALLAH, le tout puissant de nous avoir permis de mener à bien ce modeste travail. En premier lieu, nous remercions Pro. KHEMISSA Mohamed et Dr. MEKKI Lakhdar qui ont bien voulu proposer le thème de Master, pour son aide précieux, sa disponibilité durant toute la durée de notre projet. Je remercie également les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre travail. A tous nos enseignants à toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je dirai merci

Je présente mes profonds respects et mes reconnaissances à Pr BENCHEIKH Mohamed directeur du laboratoire de développement des géomatériaux, qui mis à notre disposition les moyens nécessaires pour accomplir notre travail.

Enfin, merci à mes parents, pour m'avoir donné le goût et l'ambition de faire des études, ainsi Qu'à tous les professeurs qui, au cours de ma scolarité du primaire au Master, m'ont fait aimer les sciences ; et tous les enseignants du département génie civil.

Dédicaces

*Je dédie mon humble travail aux personnes qui comptent le plus
pour moi et à mes proches*

*mon père abd alah et ma mère kheltoum, je les remercie pour tout ce
qu'ils ont fait pour moi, mes quatre frères que j'aime, les frères avec
lesquels j'ai grandi, ma famille gherabi et tous mes amis.*

Ceux qui m'ont soutenu dans ma vie académique et quotidienne,

(yamin. Zaki.), la liste est longue

*Mais je ne remercierai jamais assez ma mère car c'est ma mère que
j'aime tant, que Dieu prolonge sa vie. Merci maman.*

Et à tous mes amis de la promotion de Géotechnique “2019_2020”

ملخص

يشهد النسيج الحضري لولاية المسيلة في الوقت الحاضر تطوراً ملحوظاً بسبب النمو السكاني المتزايد، ومن ثم فإن امتداده إلى الأراضي غير المأهولة غالباً ما تكون أقل مواتية من المناطق الحضرية. تقع هذه الولاية في منطقة تُصنف على أنها شبه الجافة، وتتضمن جيولوجيتها تكوينات طينية تتّمر بتغير كبير في الحجم عند تغير عوامل استقرارها (الظواهر المناخية الطبيعية بسبب الجفاف، والنشاط البشري عن طريق تغير مستوى المياه الجوفية بسبب الضخ المفرط. تعرض هذه المذكرة نتائج دراسة أجريت على طين انتفاخي تم جلبه من الموقع الحضري بلدية سيدي هجرس، حيث تظهر خسائر على المباني الخفيفة (المباني منخفضة الارتفاع والطرق) الغرض من هذه الدراسة هو تحديد خصائصه الفيزيائية والميكانيكية لهذا الطين المعالج بثلاث فئات من الأسمنت (32.5، 42.5 و 52.5) ثم تحليل تأثير العلاج على الخصائص الميكانيكية. بالإضافة إلى تجارب تعريف التربة يشمل البرنامج التجريبي الذي تم تنفيذه على اختبارات الرص الضغط البسيط واختبارات القص المباشر بعلبة كازاغراندي، تتوافق إجراءات الاختبار المتبعة قدر الإمكان مع طرق الاختبار المعمول بها. طريقة تفسير النتائج تعتمد بشدة على المعرفة المكتسبة في جميع أنحاء العالم.

الكلمات الدالة: الطين المنتفخ، انتفاخ، معالجة، الاسمنت، الضغط البسيط، الاودومتر.

Résumé

Le tissu urbain de la wilaya de M'sila connaît de nos jours un développement considérable en raison d'une démographie sans cesse croissante, d'où son extension vers des terrains vierges souvent moins favorables que ceux déjà urbanisés. Cette wilaya est située dans une zone classée comme semi-aride, dont la géologie comporte des formations argileuses caractérisées par une forte variation de volume lorsque les conditions de leur équilibre sont modifiées (phénomènes climatiques naturels dus à une sécheresse prolongée, activité humaine par modification du niveau des nappes phréatiques du fait de pompages excessifs, ...). Ce mémoire présente les résultats d'une étude effectuée sur une argile expansive prélevée dans la commune de Sidi-Hadjrès, où d'importants désordres apparaissent fréquemment dans les constructions légères (pavillons, bâtiments de faible hauteur, routes). L'étude effectuée vise à déterminer les paramètres physiques et mécaniques de cette argile traitée par trois classes de ciment (classes 32.5, 42.5 et 52.5), puis à analyser l'influence du traitement sur ses propriétés mécaniques. Outre les essais d'identification, le programme expérimental exécuté comporte des essais de compactage, de compression simple et de cisaillement direct à la boîte de Casagrande. Les procédures d'essais suivies ont été conformes autant que possible aux méthodes d'essais en vigueur.

Mots-clés : Argile expansive, compactage, traitement, classes de ciment, compression simple, cisaillement direct.

Summary

The urban fabric of the wilaya of M'sila is nowadays experiencing a considerable development due to an ever increasing population, hence its extension to virgin lands often less favorable than those already urbanized. This wilaya is located in an area classified as semi-arid, whose geology includes clay formations characterized by a large variation of volume when the conditions of their equilibrium are modified (natural climatic phenomena due to a prolonged drought, human activity by modification of the groundwater level due to excessive pumping...). This memoirs presents the results of a study carried out on an expansive clay collected in the commune of Sidi-Hadjrès, where major disorders frequently appear in light constructions (pavilions, low-rise buildings, roads). The purpose of the study is to determine the physical and mechanical parameters of this clay treated with three classes of cement (classes 32.5, 42.5 and 52.5) and then to analyze the influence of the treatment on its mechanical properties. In addition to the identification tests, the experimental program carried out includes compaction tests, simple compression tests and direct shear tests with the Casagrande box. The testing procedures followed were as consistent as possible with the current testing methods and the method of interpreting the results draws heavily on the knowledge gained around the world.

Key words: Expansive clay, compaction, treatment, classes ciment, simple compression, direct shear.

Introduction générale

Titer	la Page
Merci et gratitude.	I
Liste des forms.	II -IV
Liste des tableaux.	VII
indice	VIII-IX
Résumé.	
Introduction GENERALE.	
CHAPITRE I	
Introduction.	
Généralités sur les sols.	
Les argiles.	
Problèmes des sols argileux.	
Stabilisation des sols argileux.	
Conclusion.	
CHAPITRE II:	
Introduction.	
Localisation	
Essais d'identifications	
CHAPITRE III:	
Introduction.	
Les essais d'identification	
ESSAIS MECANQUES	
<i>Conclusion.</i>	
Conclusion général.	
<i>BIBLIOGRAPHIQUE.</i>	

Introduction générale

Figures	Titre de la figures	la Page
CHAPITRE.I		
Figure.I.1	Schéma microscopique d'un sol argilo-limoneux.	
2	Diagramme de plasticité de Casagrande.	
3	Types de phyllosilicates formés au cours de l'altération.	
4	Texture des sols gonflants.	
5	Photographies MEB de texture matricielle (a: Argile Verte de Romainville)et textureagrégée (b: Argile de Bavent).	
6	Structure des argiles	
7	Feuillet de kaolinite.	
8	Particule de kaolinite.	
9	La liaison entre les particules de montmorillonite.	
10	La liaison entre les particules de l'illite.	
11	Schéma d'assemblages de particules (Collins et McGown, 1974)	
CHAPITRE.II		
1	.Le site urbain de Sidi-Hadjrès (wilaya de M'sila, Al	
2	.Image satellite prise le 2017,	
3	Appareillage d'analyse granulométrique (tamisage).	
4	Appareillage de limites d'Atterberg.	
5	Les étapes de l'essai au bleu de méthylène	
6	. Essai au bleu de méthylène.	
7	Valeurs de bleu de quelques sols	
8	Appareillage de l'Essai Proctor modifié.	
CHAPITRE.III		
1	La courbe d'analyse granulométrique par tamisage essai N° 01	

Introduction générale

2	La courbe d'analyse granulométrique par tamisage essai N° 02	
3	La courbe d'analyse granulométrique par tamisage essai N° 03	
4	la courbe de limite de liquidité du sol naturel de essai N° 01	
5	la courbe de limite de liquidité du sol naturel de essai N° 02	
6	la courbe de limite de liquidité du sol naturel de essai N° 03	
7	Courbe de proctor modifié (sol naturel) : la densité sèche en fonction de teneur en eau	
8	Courbe de proctor modifié (sol +2% ciment) : la densité sèche en fonction de teneur en eau	
9	Courbe de proctor modifié (sol +4% ciment) : la densité sèche en fonction de teneur en eau	

Introduction générale

Tableau	Titre du tableau	la Page
CHAPITRE.I		
Tableau I.1	Classification des sols selon leurs propriétés mécaniques.	
2	Occurrence des minéraux argileux dans le sol en fonction du climat.	
3	Surface spécifique et la capacité d'échange cationique (CEC) de quelques minéraux argileux.	
4	les avantages et les inconvénients des différentes techniques de stabilisation	
CHAPITRE.II		
1	Description de sol en fonction du coefficient d'uniformité	
2	Classification des sols.	
3	présente les différents degrés de plasticité du sol selon l'indice de plasticité I_p .	
CHAPITRE.III		
1	représentant les valeurs de teneur en eau.	
2	granulométrie par tamisage de l'essai N:1.	
3	granulométrie par tamisage de l'essai N:2.	
4	granulométrie par tamisage de l'essai N:3.	
5	Résultats de essais limite d'atterberg.	
6	:L'indice de plasticité.	
7	L'indice de plasticité.	
8	L'indice de plasticité.	
9	Résultats de essais limite d'atterberg.	
10	: L'indice de plasticité	
11	Résultats des paramètres tirés de l'essai au bleu méthylène.	
12	<i>Paramètres géotechnique d'argile de Sidi Hadjres_M'sila</i>	

Introduction générale

13	Résultat de Proctor modifié (0% ciment)	
14	Résultat de Proctor modifié (2% ciment) .	
15	Résultat de Proctor modifié (4% ciment) .	

INTREDCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale

Avant la réalisation des projets routière ou des ouvrages d'infrastructure, la réutilisation des matériaux du site pour la construction nécessite un sol de bon caractéristiques (physique et mécanique), cette situation est rarement de trouver. A cet effet, il faut réduire des impacts négatifs sur la nature et le fonds d'investissement du projet. Pour éviter les problèmes de réalisation, on utilise bien souvent des méthodes du traitement des sols pour améliorer les propriétés géotechniques insuffisantes des sols rencontrés sur le site avant de réutilise pour une certaine fonction dans l'ouvrage.

L'emploi des liants chaux et ciment en technique routière est développé depuis une trentaine d'années. Elle concerne essentiellement les sols fins (marneux, argileux, limoneux...). Le traitement des sols en place évite le transport et valorise les matériaux locaux, ce qui permet de stabiliser des sols à des coûts très intéressants, avant la mise en place des couches superficielles. Ce traitement procure deux avantages :

- L'assèchement des sols;
- L'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable (résistances mécaniques, insensibilité à l'eau et au gel). [1]

La wilaya de M'sila en Algérie connaît de nos jours un essor économique et social considérable, qui se traduit par une extension sans cesse croissante de son réseau routier parallèlement au développement de son tissu urbain, d'où son extension vers des terrains vierges souvent moins favorables que ceux déjà urbanisés. Cette wilaya est située dans une zone classée comme semi-aride, caractérisée par de faibles précipitations et des écarts de température importants entre l'hiver et l'été. La géologie de cette zone comporte des formations argileuses caractérisées par une forte variation de volume lorsque les conditions de leur équilibre sont modifiées. Ces formations argileuses sont très surconsolidées, peu perméables et très peu sensibles au fluage ; leur sur consolidation est due au phénomène de retrait résultant d'une dessiccation plus ou moins poussée.

Introduction générale

Dans cette étude, on utilise le ciment pour traiter un sol argileux expansif prélevées sur site urbain situés Sidi-Hadjrès dans la wilaya de M'sila, où d'importants désordres apparaissent fréquemment dans les infrastructures routières, voiries et réseaux divers et dans les constructions civiles et industrielles de faible hauteur, pour atteindre le but visé, le travail sera divisé en quatre chapitres y compris une introduction générale et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous présentons tout d'abord les différents types des sols argileux et de leurs caractéristiques tel que la texture, principales types d'argiles, porosité et distribution de taille de pores, la nature minéralogique des argiles, composition chimique, teneur et potentiel de l'eau, rétention de l'eau dans le sol.

Les propriétés physiques et mécaniques du sol avant et après traitement seront présentées au deuxième chapitre, ainsi ces propriétés sont déterminées par des essais effectués au laboratoire de département génie civil dans notre université.

Dans le troisième et dernier chapitre, on présente les résultats obtenus et les éventuelles interprétations.

Et en fin nous terminerons cette étude par une conclusion générale et des recommandations.

Chapitre I

Introduction générale

CHAPITRE I Synthèse bibliographique

I.1. Introduction :

La géotechnique fait appel aux techniques du génie civil, qu'elle applique à l'étude du sol et de la roche, c'est-à-dire aux matériaux naturels qui constituent l'écorce terrestre. Pour l'ingénieur, le sol se définit comme un agrégat peu compact, composé de minéraux, de matières organiques et de sédiments que l'on retrouve au-dessus du substrat rocheux. Les sols peuvent être fractionnés assez facilement en particules organiques ou minérales, contrairement à la roche, dont les grains minéraux sont retenus par une force cohésive et moléculaire très importante. (Melbouci.B, 2017).

Dans tous les projets de construction, une campagne de reconnaissance géotechnique est nécessaire. Elle a pour but d'étudier la structure géologique du sol (nature des matériaux du sol, profondeur des couches, niveau de la nappe phréatique...), et de déterminer certains paramètres décrivant le comportement du sol (contrainte du sol, la déformabilité,...); ces paramètres servent à la conception et au calcul des ouvrages géotechniques. (Robert.D, williamd.k,1991)

A la base des essais au laboratoire et in situ, une classification du sol étudié est faite en vue de l'identifier en le classant dans une catégorie des sols à propriétés physiques similaires.

La classification des sols se fait en général à partir des essais d'identification au laboratoire, tels que l'analyse granulométrique, la limite de plasticité, la limite de liquidité et l'analyse de la teneur en matières organiques. A partir des essais in situ, il existe aussi des systèmes de classification des sols, mais qui sont moins précis que ceux basés sur les essais au laboratoire. (Bouafia.A,1996)

I.2. Généralités sur les sols :

2.1. Définition :

Un sol est constitué par un agrégat naturel de grains minéraux pouvant être séparés par des actions mécaniques légères (trituration ou agitation sous l'eau...), bien qu'il soit un matériau meuble, poreux, non homogène situé à proximité de la surface de la terre.

De plus, les sols des roches qui peuvent être définies comme des agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes; le sol constitue un matériau de base utilisé en génie civil, il sert de:

- Support pour les ouvrages: toutes les structures réalisées transmettent leurs charges au sol de fondation par l'intermédiaire de fondations superficielles ou profondes.
- Matériau de construction: exploité en carrière ou dragué en rivière, utilisé pour la fabrication des bétons (granulats), et dans les couches du corps de chaussée, la réalisation des digues et des barrages,...etc. (Sadoun.A, Bechkit.O,2015)

2.2. Différents types des sols:

Le sol est un milieu tri-phasique qui se compose de:

- Grains solides formant le squelette du sol;

Introduction générale

- La phase liquide composée de l'eau industrielle, si l'eau occupe tous les vides du sol, on dit qu'il est saturé;

- La phase gazeuse composée de l'air et éventuellement de l'eau évaporée.

Il existe en pratique deux catégories du sol, tel que:

- Sols pulvérulents: regroupent des sables, des graviers, des cailloux et des mélanges de ces matériaux tels que le sable graveleux; couramment ces sols sont caractérisés par une grande perméabilité, et l'absence d'une adhérence entre ses grains.

- Sols purement cohérents: regroupent des sols fins saturés tels que l'argile, la marne et des mélanges de ces matériaux tels que la marne argileuse. Ces sols sont caractérisés par une faible perméabilité et la présence d'une force cohérence entre ses particules.

En pratique, le sol peut contenir une de ces catégories, comme il peut les englober simultanément, sous forme de matériaux ayant des caractéristiques intermédiaires comme, à titre d'exemple, le limon (silt), l'argile sableuse ou le limon argileux. Dans un sol pulvérulent, les forces prédominantes entre les grains sont celles du poids; leur comportement dépend essentiellement de son état de densité. Le minéral constituant principalement ce sol est le quartz (silice). Ce sol est aussi appelé granulaire, car il est constitué des grains relativement gros (plus de $80\ \mu\text{m}$ de dimension). Le contact entre les grains est direct, et le squelette du sol est formé ainsi d'un empilement de grains. Les forces de frottement entre les grains, qui peuvent être mobilisées lors d'un chargement du sol caractérisent la résistance au cisaillement de ce sol. En général, ce sol retient peu l'eau interstitielle libre, celle-ci pouvant circuler librement entre les grains.

Les forces d'attraction (ou de tension) capillaire sont négligeables devant les forces de poids de grains, mais pour un sable saturé, les forces capillaires lui confèrent une certaine cohésion entre les grains, dite cohésion capillaire, et permettent à un volume de ce sol de se tenir seul.

Ceci peut se constater dans certains talus sableux humides dans des plages, ayant une grande hauteur et un angle de talus presque droit. Dans un sol purement cohérent les forces d'attraction capillaires entre les grains sont prédominantes à cause de la valeur importante des surfaces de grains.

On définit la surface spécifique comme étant la somme des surfaces de grains contenus dans un gramme de sol.

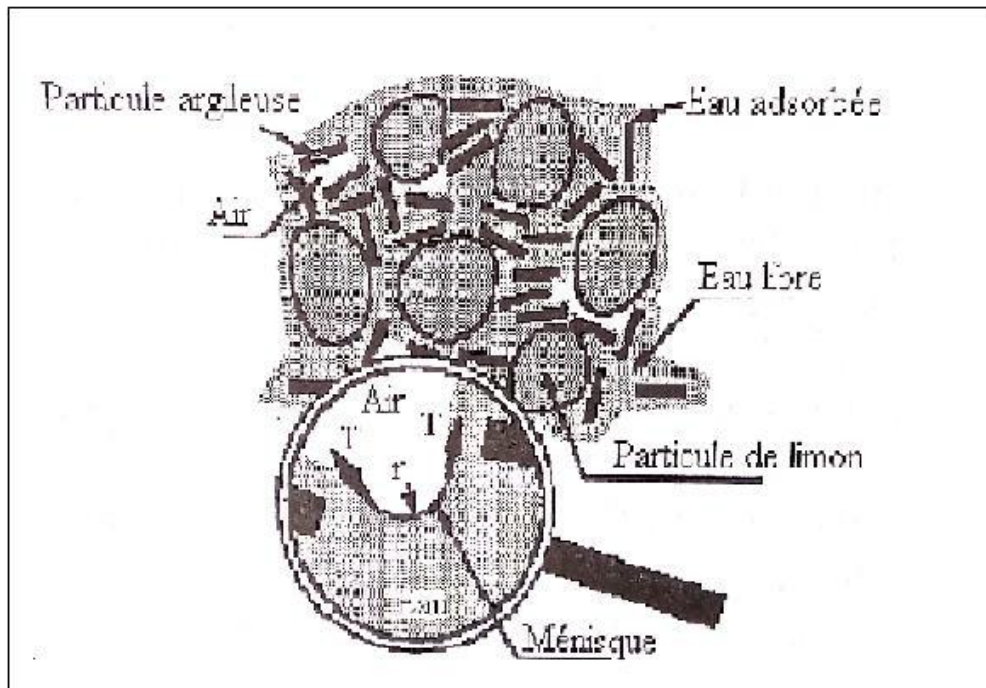
Plus un sol est fin plus la surface spécifique est grande. On rappelle que la force de tension capillaire est proportionnelle à la surface du grain. C'est cette attraction capillaire qui explique en partie la propriété de cohésion dont est doué un sol argileux.

Certains matériaux de sol comme la montmorillonite ont tendance à absorber de l'eau et par conséquent gonfler. Dans le cas d'une

diminution de l'eau, l'argile manifeste un retrait, c'est-à-dire que son volume diminue.

La cohésion de l'argile fait qu'un volume donné de ce sol a une forme propre, contrairement au sable sec qui prend la forme du récipient qui le contient. La plasticité de l'argile est constatée en soumettant au matériau argileux un chargement, le volume déformé ne revenant pas à son état initial après déchargement. La trace d'un piéton sur la surface d'un terrain argileux humide est un exemple concret de la plasticité des argiles. Les argiles souvent rencontrées sont la montmorillonite, la calcite, l'illite et la kaolinite. La marne est une argile compacte de couleur grise en général, contenant un pourcentage de calcaire.

Introduction générale



Figure

(I, 01): Schéma microscopique d'un sol argilo-limoneux.

L'étude des propriétés des argiles est beaucoup plus complexe que celle des sols pulvérulents, car elles dépendent de la structure chimique du minéral argileux. L'argile est en fait constituée de silicates d'alumine hydratés associés à un ou plusieurs cations, comme le calcium, le sodium, le magnésium et le fer.

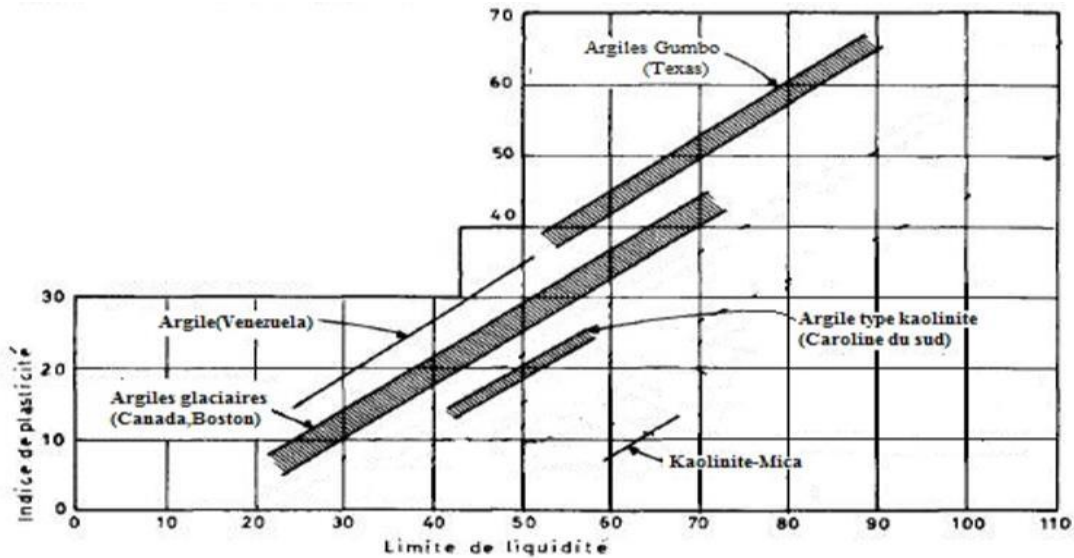
Le comportement des argiles dépend essentiellement de la présence de ces cations.

Les silicates forment un empilement de feuillets chargés électriquement et tendent à se neutraliser en attirant des ions. La figure (I, 01) montre la formation d'une pellicule d'eau autour du grain argileux, dite eau adsorbée qui a un comportement visqueux solide. Cette couche confère au sol argileux un comportement visqueux et peut contribuer au fluage, c'est-à-dire à l'évolution de la déformation à long terme sous des contraintes constantes dans le temps. (Bouafia, A. 1996)

2.3. Classification des sols:

La classification géotechnique des sols a pour but de ranger les sols par catégories présentant des caractéristiques géotechniques voisines. Il existe plusieurs classifications géotechniques utilisant différents paramètres et caractéristiques distinctes. Deux sols peuvent être les mêmes d'un point de vue géologique mais différents selon leurs caractéristiques géotechniques et aussi selon la classification choisie. La figure (I, 02) présente des sols argileux de différentes origines mais qui n'ont pas la même considération géotechnique: la limite de liquidité et l'indice de plasticité varient considérablement d'une argile à une autre.

Introduction générale



Figure

(I, 02): Relation entre la limite de liquidité et l'indice de plasticité pour des sols caractéristiques.

- Les résultats d'essai in-situ (Pressiomètre et pénétromètre) permettent aussi de classer le solévolutif en fonction de la pression limite et de la résistance à la pointe.

Tableau (I, 01): Classification des sols selon leurs propriétés mécaniques.

Classe de sol	Pressiomètre P_1 (Mpa)	Pénétromètre Q_c (Mpa)
Argiles et limons		
A-Argiles et limons mous	< 0,7	< 3,0
B-Argiles et limons fermes	1,2 à 2,0	3,0 à 6,0
C-Argiles très fermes à dures	> 2,5	> 6,0
Sables et graves		
A-Lâches	< 0,5	< 5
B-Moyennement compacts	1,0 à 2,0	8 à 15
C-Compacts	> 2,5	> 20
Marnes		
A-Tendres marno-calcaires	1,5 à 4	-
B-Fragmentées	> 4,5	-

Les classifications des sols existant sont le triangle de texture de Taylor, la classification du Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées (L.C.P.C), le Guide de Travaux Routiers (G.T.R).....La classification L.C.P.C est basée soit sur les résultats classiques d'essais de

Introduction générale

laboratoire (granulométrie, limites d'Atterberg), ou l'appréciation visuelle et des tests simples sur le chantier.

Il faut avoir une grande expérience pour employer correctement la méthode rapide ou méthode dechantier. Pour particulièrement les sols évolutifs (fins) deux étapes indissociables sont à observer au laboratoire :

La première subdivision (analyse granulométrique), ou les sols sont classés selon la proportion massique des grains inférieurs ou supérieurs à 0,08mm.

- Les sols grenus: lorsque plus de 50 % des éléments > 0,08mm.

- Les sols fins: quand plus de 50 % des éléments < 0,08mm.

On peut classer les sols par l'utilisation de la courbe de Casagrande (utilisation des résultats des limites d'Atterberg).

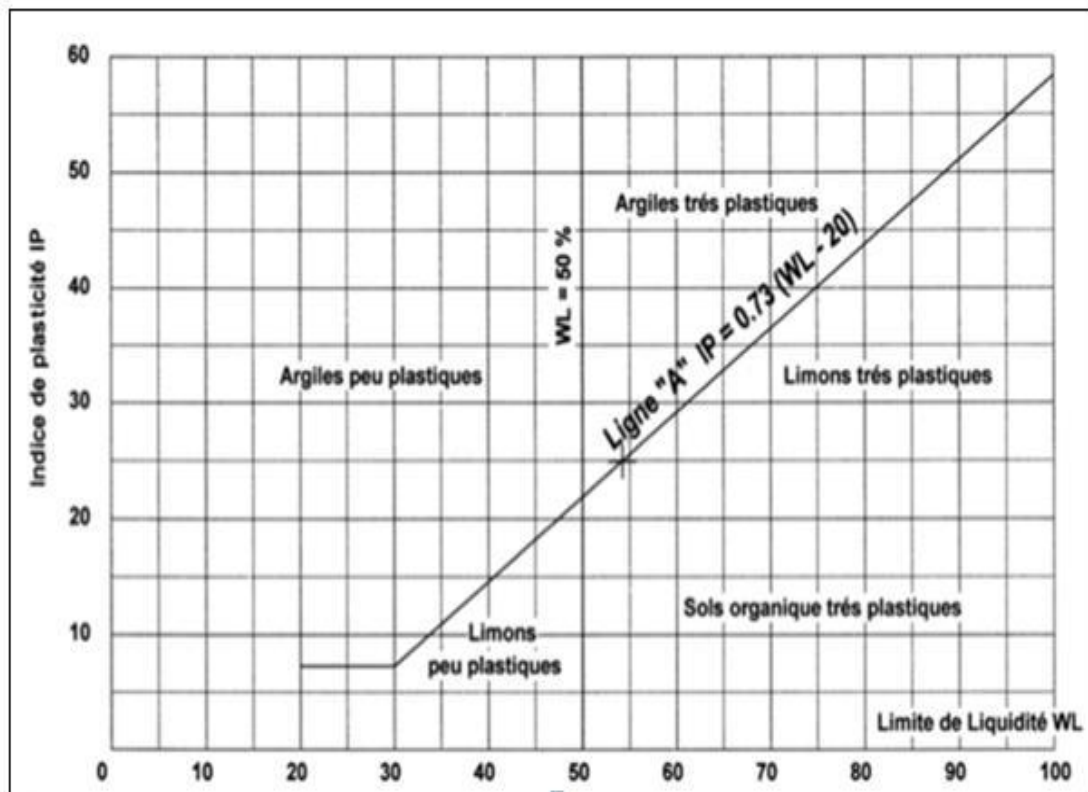


Figure (I, 02): Diagramme de plasticité de Casagrande.

La classification des sols selon le contenu en matière organique (MO) se fait comme suit:

- Pour $MO < 3\%$, la matière organique n'a pas d'influence sur le sol.

- Pour $3 < MO < 10\%$, le sol est faiblement organique.

- Pour $MO > 10\%$, il est considéré comme un sol organique. (Marwana.A, Muangongo.I.2015)

I.3. Les argiles:

3.1. Origine des argiles:

Les argiles résultent de la désagrégation en surface de roches silicatées très répandues dans la couche terrestre comme le granit, le gneiss ou les schistes.

Introduction générale

Ils sont transportés par l'eau et déposés. Certains dépôts se transforment par diagenèse (déshydratation et compactage), et forment des roches argileuses compactes et des schistes. Les sédiments argileux ayant subi une métamorphose sont souvent structurés en couches minces en raison de la présence de phyllosilicates. Ces derniers sont des minéraux argileux (les micas par exemple) dont la dimension des feuillets peut atteindre $5\mu\text{m}$, donc une taille supérieure à celle des argiles au sens strict.

Ces phyllosilicates confèrent aux roches argileuses la structure litée typique des schistes. La dissolution du calcaire donne également naissance à des dépôts argileux. L'activité végétale produit également des argiles, jusqu'à 30 kg par an et par hectare

3.2. Définition géotechnique des argiles:

Du point de vue du géotechnicien, les argiles désignent la fraction des particules du sol dont la taille est inférieure à $4\mu\text{m}$. Les particules d'une taille inférieure de $2\mu\text{m}$ ne sont plus visibles avec un microscope optique. Il faut alors recourir à la sédimentométrie pour pouvoir déterminer la quantité de particules contenues dans un sol et déterminer la nature à l'aide des méthodes basées sur la diffraction des rayons X (DRX).

En effet, la nature des argiles ont une grande incidence sur les propriétés mécaniques des sols, en particulier sur leur comportement avec l'eau.

Les argiles constituent la fraction la plus fine des sols. A l'opposé, la fraction la plus grossière des sols est appelée «squelette» qui comprend des pierres et des blocs. Entre ces deux extrêmes, on trouve la fraction des limons ou silts, des sables et des graviers. La définition géotechnique des argiles est liée aux caractéristiques chimiques de ceux-ci.

Les argiles sont des minéraux des phyllosilicates, ils se distinguent par une structure en feuillets formés de cristaux en arrangement octaédrique (O) ou tétraédriques (T) capable d'intégrer des cations hydratés (Ca, Na, Fe, Al, ... etc.) dans les espaces inter foliaire. Le critère de classement des argiles est basé sur la forme de succession des couches dans les feuillets. Il y'a trois grandes classes: les feuillets TO, TOT et TOTO.

Dans la pratique, on utilise très souvent le terme générique de «fines».

Il s'agit alors des argiles telles qu'elles sont définies plus haut et des limons. Les normes européennes définissent les fines comme le pourcentage (massique) des passants au tamis de $0,063\text{ mm}$. (Portet, Noël, Nicaise, Portillo, Vermeulen, 2011)

3.3. Minéralogie des argiles:

Les minéraux argileux sont de très petites particules très actives sur le plan électrochimique.

Lorsque le pourcentage d'argile augmente, l'influence de la portion argileuse sur le comportement global du sol augmente proportionnellement. (Harrat. M, 2007) «Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique Etude

sur site: unité Maghreb céramique de Touggourt», mémoire de magistère, département de génie

procédé, université d'Ouargla, 2007.

Selon le climat, l'origine des minéraux est variable:

- Héritage: à partir de la roche-mère;
- Transformation: à partir d'autres minéraux argileux;
- Néof ormation: formés à partir des ions transportés par l'eau du sol.

Introduction générale

La nature de la roche-mère joue un rôle:

- L'altération d'une roche acide, comme le granite, donne plutôt de la kaolinite;
- L'altération d'une roche basique, comme le basalte, donne plutôt des smectites.

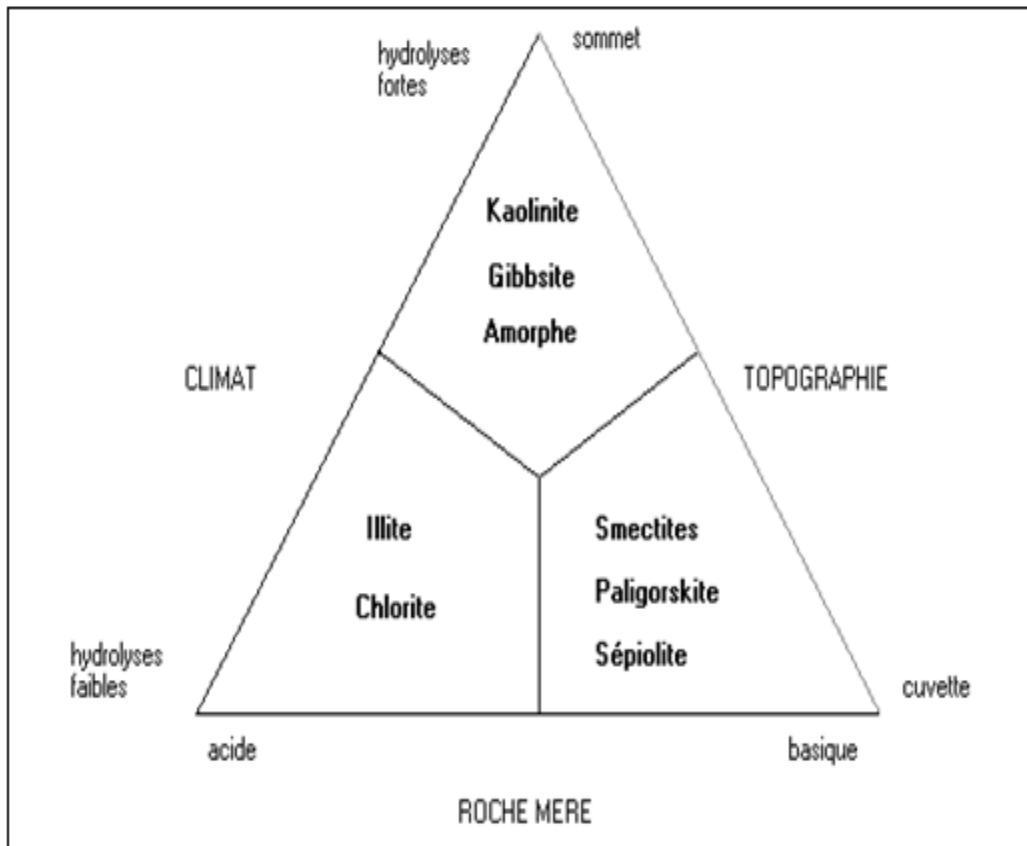


Figure (I, 03): Types de phyllosilicates formés au cours de l'altération.

La topographie, qui commande le drainage, intervient également:

- Sur une pente, où le drainage et le lessivage sont bons, la formation de kaolinite est favorisée;
- Dans une cuvette, milieu confiné où se concentrent les solutions, se forment plutôt des smectites.

Introduction générale

Tableau (I, 02): Occurrence des minéraux argileux dans le sol en fonction du climat.(
<https://www.upicardie.fr>)

Climat	Végétation et sol	Origine des argiles	Minéraux fréquents
Glaciaire	Toundra	héritage	Illite ; chlorite
Boréal tempère	Tagia et foret podzol et sols bruns	Transformation héritage	Vermiculite, interstratifiés illite, chlorite, Smectites
Méditerranéen subtropical	Steppes, savane FerSiAlitique	Transformation néoformation héritage	Smectites
désertique	néant	héritage	illite, chlorite
équatorial	Foret ferralitique	néoformation	Gibbsite, kaolinite

3.3.2. Textured'une argile:

Tout comme la structure cristalline des argiles, la texture est un paramètre important car il conditionne les propriétés physiques du minéral.

La texture concerne l'assemblage des minéraux (argileux ou pas) sous forme d'agrégats ainsi que l'arrangement ou la distribution spatiale de ces agrégats.

Aubouin et al définissent la texture comme «la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein de la roche».

Cette organisation peut faire l'objet de différentes classifications. Ces classifications sont valables pour les sols argileux.

Gens et Alonso ont été établis une classification pour les sols gonflants, à partir des travaux de Collins et McGown. Cette classification se base sur l'organisation des particules élémentaires argileuses:

- Texture «matricielle» figure (I, 05), texture dont la base est une pâte homogène avec les particules élémentaires disséminées dans cette pâte. Cette texture est une caractéristique des sols naturels ou des sols compactés du côté humide de l'optimum Proctor.
- Texture «agrégée» ou «compactée» figure (I, 06), texture compactée avec les particules élémentaires assemblées sous forme de mottes ou d'agrégats. Cette texture est une caractéristique des sols compactés, du côté sec de l'optimum Proctor.

Introduction générale

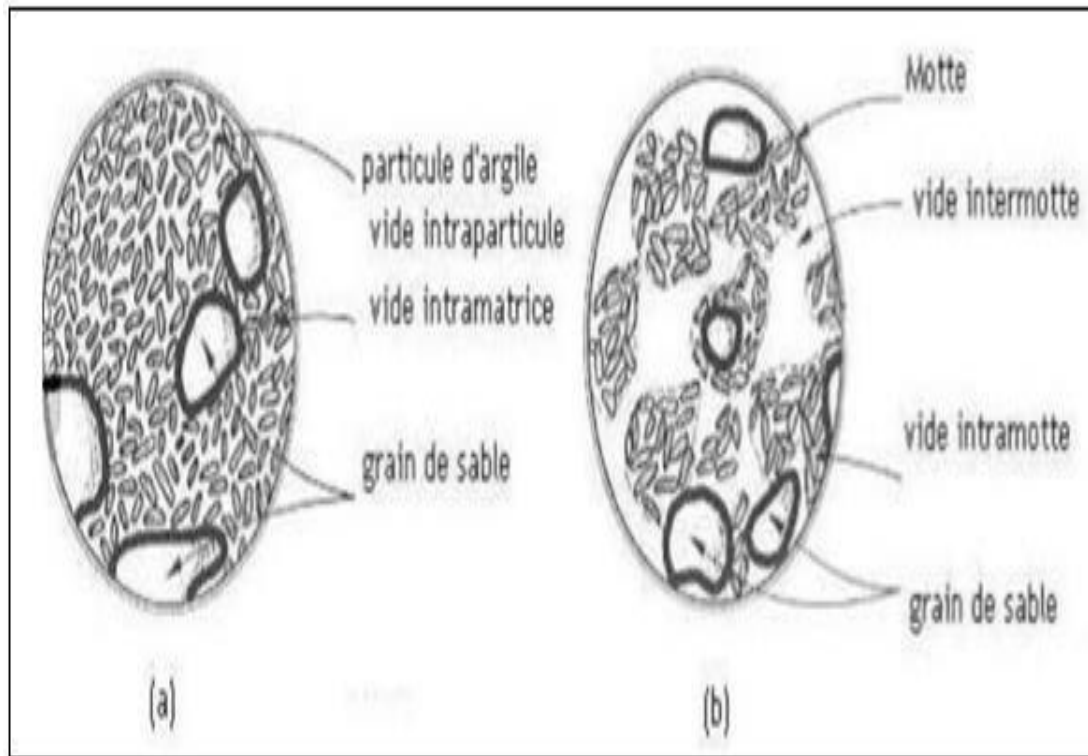


Figure (I, 04): Texture des sols gonflants.

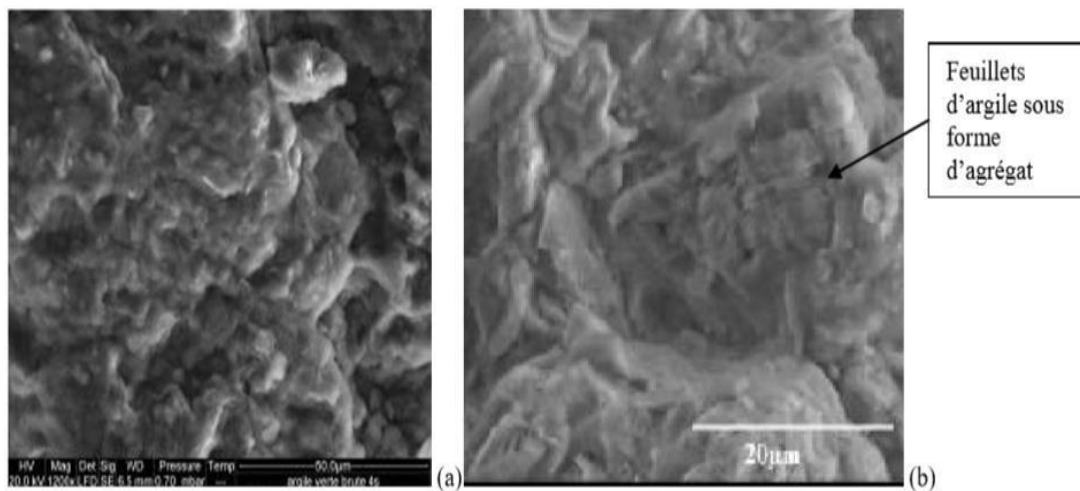


Figure (I, 05): Photographies MEB de texture matricielle (a: Argile Verte de Romainville) et texture agrégée (b: Argile de Bavent).

Il est rare de rencontrer des sols argileux composés uniquement d'argile, et au sein même de la fraction argileuse, plusieurs types d'argiles peuvent coexister. La texture des sols argileux peut varier fortement en fonction du type de minéraux argileux, du mode de sédimentation et de l'état de consolidation. Une roche argileuse qui présente une organisation serrée et orientée des particules d'argiles n'a pas le même gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation a été rapide et récente et pour lequel la distance entre les plaquettes est maximale.

Cette organisation des minéraux argileux est la principale cause du gonflement anisotrope. La texture des matériaux argileux se superpose donc aux organisations des autres minéraux non argileux.

Introduction générale

Cette hétérogénéité rend la structure et la texture extrêmement complexes, surtout lorsque les minéraux argileux sont cimentés par d'autres minéraux carbonatés. (Tatiana. M.2011)

3.4. Structure des argiles:

Les argiles s'organisent par des structures en feuillets:

-Empilement de minéraux d'oxyde de silicium (cristaux tétraédriques ou octaédriques) en feuillets entrecoupés par des espaces. Souvent, l'atome de silicium est remplacé par Al (tétraédrique) ou Al, Fe, Mg, Li (octaédriques).

- Charges négatives à la surface (généralement en raison de l'incorporation d'hydroxyles OH-).

- Les charges négatives sont compensées par l'incorporation de cations dans les espaces entre les couches.

L'illustration ci-après montre la structure d'une montmorillonite (droite et gauche), avec l'alternance des couches T et O, ici une séquence TOT avec l'adsorption d'eau dans l'espace interfoliaire (en vert).

La macroscopie du milieu représente un empilement de kaolinite qui est beaucoup moins réactive avec l'eau, c'est pourquoi elle est utilisée pour fabriquer la porcelaine.

La montmorillonite, qui peut absorber énormément d'eau, serait inapte à la fabrication de poterie ou de porcelaine en raison du retrait lors de la cuisson.

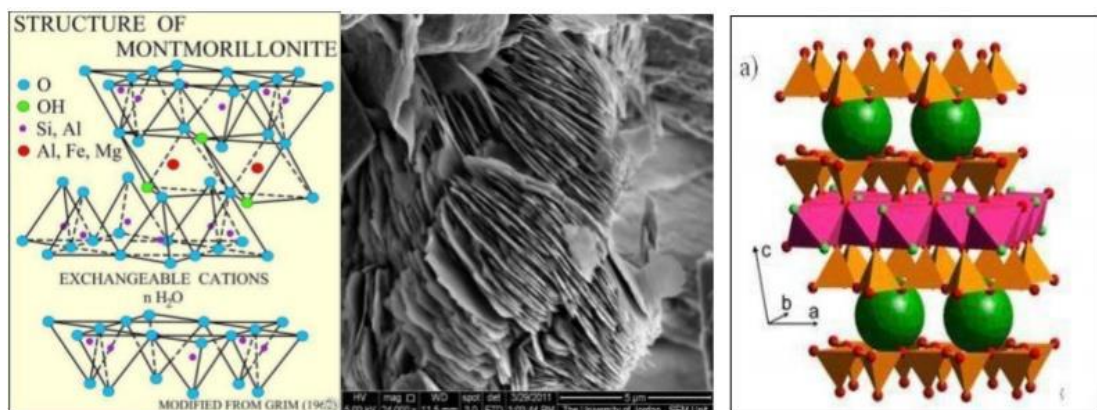


Figure (I, 06): Structure des argiles. (Portet, Noël, Nicaise, Portillo, Vermeulen.2011)

3.5. Principales familles d'argile:

Les types d'argiles fréquents sont: la kaolinite, la montmorillonite et l'illite.

3.5.1. Les Kaolinites:

Le feuillet de kaolinite résulte de la liaison d'un feuillet tétraédrique avec un feuillet octaédrique, la liaison se faisant par les atomes d'oxygène.

Introduction générale

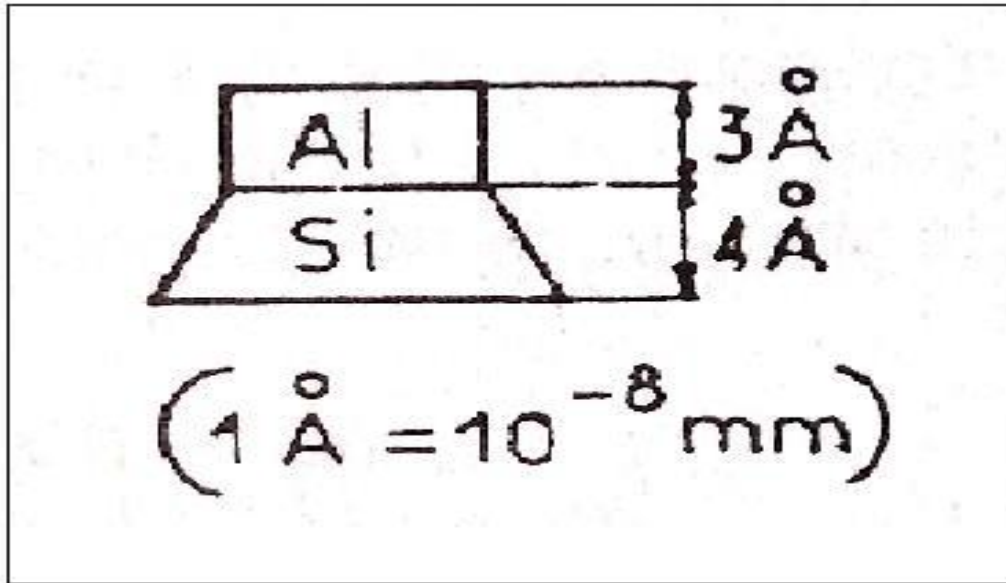


Figure (I, 07): Feuillet de kaolinite.

La particule de kaolinite est formée d'un empilement de ces feuillets, les liaisons entre ces feuillets étant du type «liaison hydrogène», donc des liaisons faibles. Aux extrémités, la particule est chargée électriquement, car les feuillets ne sont pas tous identiques.

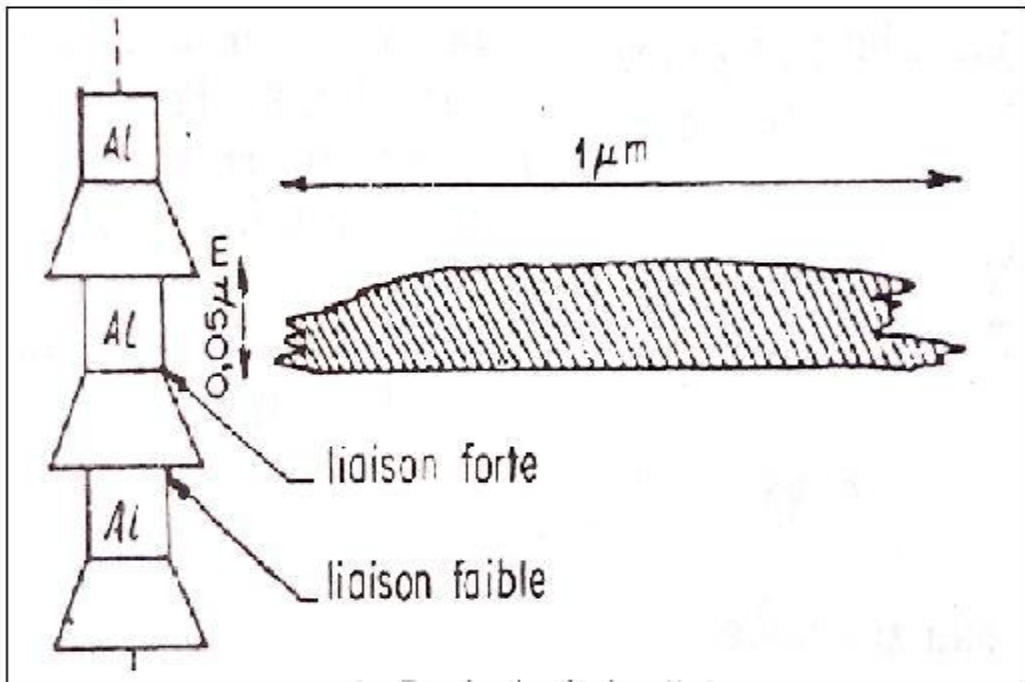


Figure (I, 08): Particule de kaolinite.

3.5.2. Montmorillonite:

La particule de montmorillonite résulte de l'empilement des feuillets élémentaires suivants:

Introduction générale

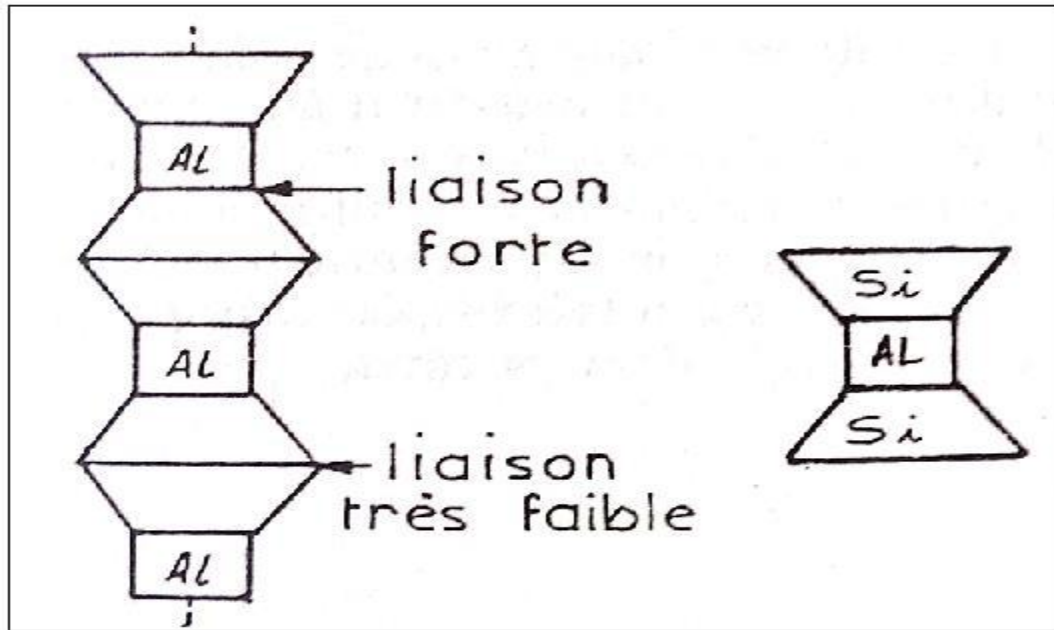


Figure (I, 9): La liaison entre les particules de montmorillonite.

La liaison entre deux feuillets est une liaison de type hydrogène, mais faibles de telle sorte que des molécules d'eau peuvent s'installer entre les feuillets.

Il peut y avoir jusqu'à cinq à six couches de molécules d'eau. Ainsi, les sols dont la teneur en montmorillonite est élevée sont susceptibles de gonflement ou de retrait importants suivant les variations de la teneur en eau.

Poursuite de la faiblesse de la liaison, les particules de montmorillonite ont des dimensions très faibles:

- Diamètre: 0,05 μm ;
- Epaisseur: 1/400 du diamètre.

Ces particules sont également chargées électriquement à leurs extrémités.

3.5.3. L'illite:

Cette argile a une structure analogue à la montmorillonite mais des ions potassium sont intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. L'atome d'aluminium du feuillet octaédrique qui se trouve sous forme d'un Al^{+3} peut être remplacé par d'autres ions comme Mg^{+2} principalement dans la montmorillonite et dans l'illite. Il en résulte un déséquilibre électrique qui est compensé par l'adsorption à la surface de cations Ca^{+2} , Li^{+} , Fe^{+2} . Aux extrémités de la particule d'argile, y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits «échangeables» jouent un rôle important dans le comportement des argiles.

Introduction générale

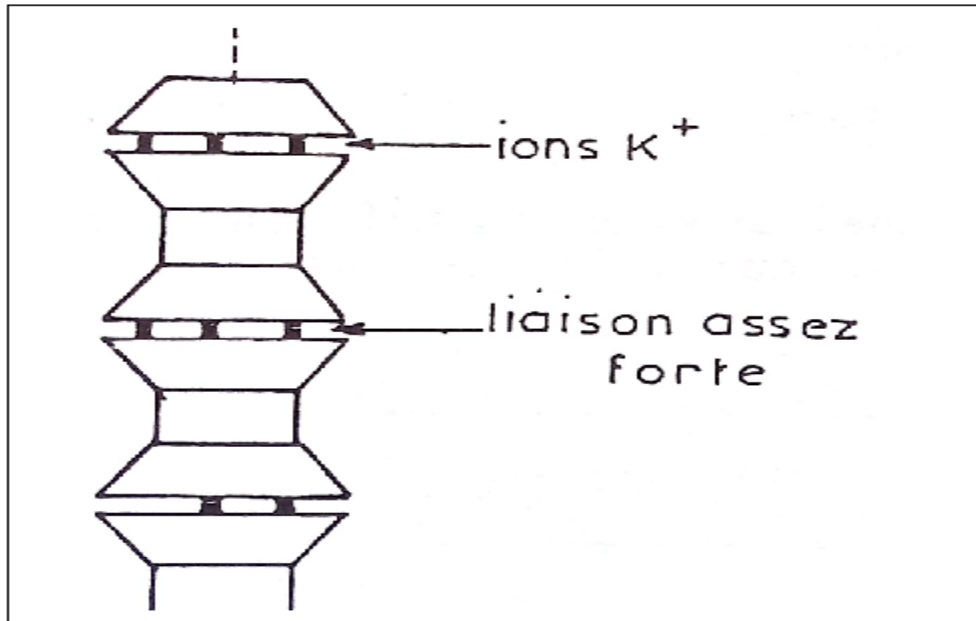


Figure (I, 10): La liaison entre les particules de l'illite. (François.S.1997)

3.6. Propriétés et rôle des minéraux argileux:

Les propriétés bien particulières des minéraux argileux sont dues à la petite taille, la structure en feuillets et la charge négative des particules.

Elles forment avec l'eau des solutions colloïdales qui flocculent lorsque les charges de surface des particules sont neutralisées par des ions.

Ce phénomène est réversible: les particules retrouvent l'état dispersé lorsque les ions sont éliminés par rinçage. Les argiles fixent l'eau par adsorption à leur surface et augmentent de volume par gonflement. Elles constituent ainsi une réserve d'eau. L'argile sèche développe une tension de succion importante pour l'eau qui peut s'opposer à celle des racines des plantes.

Avec adjonction croissante d'eau, la tension de succion diminue, l'ensemble eau-argile devient plastique, puis visqueux et finalement les particules d'argile se dispersent dans l'eau en formant une solution colloïdale. L'argile imprégnée d'eau qui se dessèche se rétracte et se casse par des fentes de retrait.

Les argiles confèrent au sol sa structure et ses propriétés mécaniques. Elles sont associées aux autres composants et constituent les complexes argilo-humiques (ou organominéral); leur teneur peut atteindre 50%. Elles sont généralement à l'état flocculé, généralement par l'action des ions Ca^{+2} et H^+ , ce qui donne au sol ses qualités agronomiques: bonne aération entre les agrégats,

retrait modéré à la dessiccation, bonne perméabilité à l'air et l'eau. En revanche, les sols dont les argiles sont dispersées, et non flocculées, présentent des caractères défavorables à la culture: mauvais état structural, mauvaise circulation de l'air et de l'eau, retrait important à la dessiccation, forte adhérence aux outils travaillant le sol. Les mêmes inconvénients se retrouvent dans les sols saturés par l'ion sodium, comme dans les polders; leur mise en culture exige au préalable un lessivage du sol par les eaux douces, de façon à éliminer le Na^+ qui est remplacé par l'ion Ca^{+2} fourni sous forme de sulfate (gypse).

Introduction générale

Tableau (I. 03): Surface spécifique et la capacité d'échange cationique (CEC) de quelques minéraux argileux. (<https://www.upicardie.fr>)

Minéral	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface totale (m ² /g)	C.E.C (millié- -quivalent /100)
Kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
Illite	20-55	80-120	100-175	10-40
Smectites	600-700	80	700-80	80-150
Vermiculite	700	40-70	760	100-150
Chlorite	-	100	100-175	10-40

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

3.6.1. Densité de charge spécifique:

Deux types de charge existent dans les milieux argileux:

- Une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques (dans la couchetétrahédrique ou octaédrique);
- Une charge de surface variable selon le pH du milieu liée aux réactions chimiques, qui se reproduisent 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 de la 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.

3.6.2. Capacité d'échange cationique (CEC):

La capacité d'échange cationique 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.

3.6.3. Surface spécifique:

L'argile est composée de la surface externe comprise entre les particules, et la surface interne correspondant à l'espace interfoliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne

Introduction générale

un pouvoir de gonflement plus important, et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé. (Delloum.2016)

I.4. Problèmes des sols argileux:

En Algérie le gonflement, le glissement et le tassement sont des risques multipliés selon la sismicité de la zone, et aussi de l'activité anthropique.

4.1. Tassement des sols:

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées, et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation.

4.2. Glissements de terrain:

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites.

La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement, qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes visibles ou non, et de formes diverses. (Marwana.A, Muangongo.2015)

4.3. Gonflement des sols argileux:

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux (Montmorillonites, saponites et autres natronites), ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse. Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes, et varient en fonction de leur teneur en eau); la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle), et de périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs).

4.3.1. Mécanisme du gonflement:

Le gonflement représente l'extension des doubles couches entourant les particules argileuses. Les principaux facteurs régissant le gonflement des argiles peuvent être classés en deux catégories: les facteurs mécaniques et les facteurs physico-chimiques.

a) Facteurs 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 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.

b) Facteurs physico-chimiques du gonflement:

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

- Forces électriques;

Introduction générale

- La texture de la surface des particules;
- 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. (Harrat. M.2007)

4.3.2. Gonflement interfoliaire et interparticulaire

L'analyse minéralogique précédente montre que certaines argiles, pour lesquelles les liaisons interfeuillettes sont très faibles, ont la propriété de fixer les molécules d'eau entre deux feuillets voisins (c'est le cas de smectites telles que la montmorillonite, et de certaines chlorites).

L'eau pénètre à l'intérieur des particules et s'organise en couches monomoléculaires, il s'agit alors d'un gonflement intraparticulaire ou interfoliaire. Il intervient à l'échelle la plus petite de la structure argileuse mais peut présenter une ampleur très importante.

En dehors de ce cas particulier, qui définit les argiles dites "gonflantes", le gonflement est interparticulaire, c'est-à-dire que l'eau ne pénètre pas à l'intérieur des particules d'argiles.

Ce gonflement interparticulaire, contrairement au gonflement interfoliaire, a une ampleur assez limitée, mais affecte toutes les argiles.

4.3.3. Relations entre la texture du matériau et le gonflement

Après avoir présenté les résultats théoriques obtenus pour expliquer le gonflement des minéraux argileux, on s'est intéressé au développement du phénomène de gonflement au niveau microscopique.

Le gonflement, dont on constate les effets macroscopiques, se développe en fait à l'échelle microscopique, et consiste en une réorganisation du squelette solide et du réseau poreux constituant la texture du terrain. Pour analyser le développement microscopique du gonflement, on s'est attaché à définir la notion de texture d'un terrain et à décrire l'évolution de sa texture au cours du gonflement.

4.3.4. Définition de la texture d'un terrain

En géologie, la texture désigne la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein du matériau (GRUNBERGER D.1995) Systématique de matériaux argileux au M.E.B. a permis de cerner l'organisation des particules d'argile et de dégager certaines textures.

Van Olphen (1963) a proposé une classification basée sur l'association des particules argileuses entre elles, à partir des critères : dispersé, agrégé (face contre face en agrégats), flocculé (association d'agrégats ou de particules bord-bord ou bord-face), dé flocculé (aucune

Introduction générale

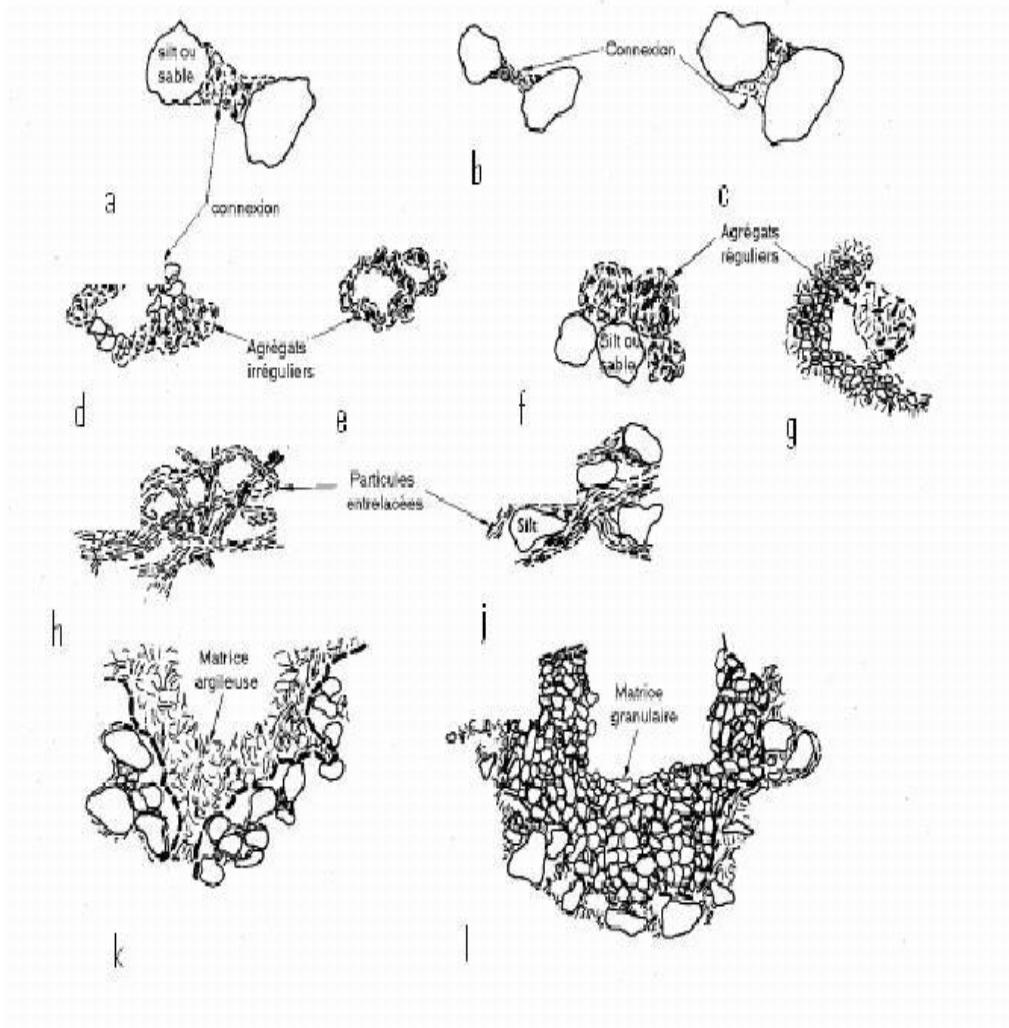
association entre les particules ou entre les agrégats). Cette classification (figure I.9) ne repose pas sur une observation directe, mais sur les possibilités d'assemblage géométrique.

Agrégé Le Roux (1976) distingue trois classes principales de textures, à partir d'observations sur les marnes :

- La texture homogène où tous les minéraux sont intimement mélangés et où aucune direction n'est privilégiée,
- La texture orientée où une direction privilégiée apparaît dans l'arrangement des grains,
- La texture floconneuse ou en microagrégats où la phase argileuse se présente sous forme grossièrement sphérique, soit seule, soit associée aux carbonates.

Collins et McGown (1974) ont tenté de préciser cette définition dans le cas des terrains contenant une proportion non négligeable de grains non argileux, en introduisant une classification des relations existant entre particules argileuses et grains sableux ou silteux (figure I.10) : connexions argileuses entre grains silteux (a, b, c), agrégats irréguliers en nid d'abeille (d, e), agrégats réguliers (f, g), particules argileuses entrelacées avec ou sans inclusions silteuses (h, j), matrice argileuse (k) ou matrice granulaire (l).

Introduction générale



Figure

I.11.Schéma d'assemblages de particules (Collins et McGown, 1974)
(Lakhdar MEKKI .2006)

4.3.5. Identification des sols gonflants. (Lakhdar MEKKI.2006)

Les paramètres d'identification des sols gonflants sont nombreux et dépendent surtout de leur minéralogie. Cependant, l'analyse minéralogique seule n'informe pas sur les paramètres quantitatifs caractérisant le phénomène de gonflement.

Il est par contre possible de définir dès la phase de reconnaissance préliminaire un certain nombre de paramètres géotechniques simples qui sont en relation avec le caractère expansif des sols. Ainsi, on peut soupçonner le caractère expansif d'un sol à travers sa granulométrie, ses limites d'Atterberg et son activité.

Ces méthodes indirectes, qui relient le gonflement aux paramètres géotechniques, permettent d'identifier les sols gonflants ; alors que les méthodes directes comportant des essais de gonflement en caractérisent plus précisément le comportement gonflant.

Introduction générale

4.3.6. Définition des paramètres de gonflement. (Lakhdar MEKKI.2006)

En toute rigueur, les paramètres mécaniques à déterminer pour caractériser les terrains gonflants ne sont pas les mêmes selon que l'objectif choisi est d'empêcher le gonflement, ou de s'assurer qu'il se produira de façon progressive ou périodique, ou de construire l'ouvrage après achèvement du processus de gonflement.

Devant cette complexité, c'est une approche macroscopique qui est adoptée dans la pratique quotidienne, Elle distingue trois notions: la pression de gonflement, le gonflement libre et l'indice de gonflement.

Ces notions ne peuvent pas être considérées comme des caractéristiques intrinsèques du matériau gonflant et ne peuvent recevoir de définition objective, car elles dépendent des conditions dans lesquelles se déroule le gonflement. Elles sont néanmoins très largement utilisées et ont largement influé sur les procédures d'essais en laboratoire.

La pression de gonflement d'un élément de sol ou de roche, dont l'état physique initial est connu, peut être définie comme l'état de contraintes à exercer pour maintenir son volume constant pendant l'imbibition sans distorsion. Cette définition de la pression de gonflement est la plus usitée mais elle n'est pas la seule.

L'indice de gonflement traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un Déchargement par rapport à un état de contraintes donné. La déformation de gonflement est obtenue au bout d'un temps infini, déduction faite des déformations instantanées dues aux variations de charge.

1.5. Stabilisation des sols argileux

5.1. Introduction

Malgré leurs propriétés de résistance, les sols argileux naturels, lorsqu'ils sont simplement compactés, puis mis en oeuvre et soumis aux conditions extérieures, sont très sensibles aux variations de température et d'hygrométrie. La stabilisation des sols argileux a pour objet essentiel de rendre ce matériau moins sensible aux variations de teneur en eau et de l'empêcher à la fois de se transformer en boue ou de s'effriter sous l'action de l'humidité. D'après les conséquences des solsexpansifs, plusieurs chercheurs ont étudié la stabilisation des solsexpansifs. (Grim R.E. 1962)

Le gonflement des sols argileux est un phénomène très complexe qui fait intervenir un grand nombre de paramètres intrinsèques et environnants.

Cette complexité est due principalement à la structure minéralogique de l'argile.

5.2. But de la stabilization

La stabilisation des sols argileux vise à satisfaire les points énumérés ci -après :

- Rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requis es pour servir.
- Éviter le décapage et le remplissage par des matériaux d'apport.
- L'assèchement des sols permettent de les rendre praticables aux engins de chantiers.
- L'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable.
- Limiter la sensibilité des argiles à l'eau.

Introduction générale

- Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre particules (résistance mécanique).
- Chez les sols argileux une réduction instantanée de l'angulosité avec la floculation.
- Diminuer les variations de volume dans le cas des sols gonflants. (Grim R.E. 1962)

5.3. Techniques de stabilisations utilisées

La stabilisation des sols expansifs est souvent opérée pour augmenter leur résistance, ainsi que pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau.

Les techniques de stabilisation les plus utilisées sont :

- la stabilisation mécanique,
- la stabilisation chimique.

5.4. stabilisation mécanique (Grim R.E. 1962)

a) Substitution

C'est la suppression de la couche du sol gonflant. C'est la solution la plus évidente. Si la couche a une grande épaisseur, la suppression totale ne peut être envisagée. Elle consiste à excaver jusqu'à une certaine profondeur puis remblayer avec des sable ou autres matériaux graveleux. C'est une solution très coûteuse.

b) 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 la côte humide, Les argiles sont moins résistantes. Il faudrait donc retrouver un compromis.

c) 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:

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

5.5. Stabilisation chimique (par additifs)

Deux techniques de stabilisation chimique peuvent être effectuées :

a) Stabilisations chimiques par ajouts des matériaux inertes

Par exemple les sables, les graviers, utilisés en mélange avec les argiles gonflantes. Ces matériaux inertes réduisent le pourcentage global d'éléments actifs (inférieurs à 2 microns) et réduisent l'activité du gonflement de l'argile. L'efficacité de ce mode de traitement sera fonction du pourcentage d'éléments inertes, de leur granulométrie et du mode de mise en place du mélange.

b) Stabilisation chimique par additifs

Elle est employée surtout pour des sols contenant une certaine quantité d'argile. Ils ont pour effet de réagir avec la fraction argileuse et de modifier leur environnement chimique et sa structure minéralogique.

Parmi les stabilisations les plus couramment utilisées, on distingue :

- Stabilisation par ajout de chaux.

Introduction générale

- Stabilisation par ajout de ciment.
- Stabilisation mixte (ciment-chaux).

L'organigramme donné par la figure I.15, aide à choisir la stabilisation chimique appropriée pour un projet :

5.6. Stabilisation par ajout du ciment

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont a priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles, auxquels il apporte cohésion, résistance mécanique, stabilité à l'eau et au gel. Le ciment rigidifie rapidement le sol de manière irréversible mais s'il y a rupture de l'horizon traité (action mécanique) il n'y a pas de nouvelle prise.

La prise au ciment est plus rapide que celle à la chaux (qui évolue encore au bout d'un an) mais elle est stoppée par le gel. Les constituants hydratés du ciment relient les grains de sable entre eux en formant des sortes de ponts nombreux et solides, d'où l'augmentation de la portance, des résistances mécaniques et de la résistance au gel.

On utilise des ciments de classe 45 ; Les doses varient de 3,5 à 5 % du poids de sol sec à traiter. La réussite des opérations suivantes exige un mélange de sol et d'eau idéal pour la bonne prise du ciment.

5.7. Stabilisation par ajout de chaux

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente (Biczysko, 1996; Greaves, 1996; Kelley, 1988). Little (1995), rapporte qu'en général, un sol stabilisé à la chaux fournit une performance structurale équivalente à celle d'une fondation en gravier naturel ou en concassé.

Plusieurs réactions sont initiées lors de l'ajout de la chaux à un sol à granulométrie fine : l'échange cationique et la floculation modifient presque instantanément la plasticité, la maniabilité, la résistance et les propriétés de déformation sous charge d'un sol (Moore, 1987).

5.8. Stabilisation mixte chaux-ciment

L'ajout du ciment Portland conjointement avec la chaux aide à augmenter les propriétés mécaniques du sol traité. Généralement, le sol est traité dans un premier temps avec la chaux et en préparation à l'ajout du ciment. Cette première étape permet d'assécher le sol par absorption et évaporation de l'eau et nécessite seulement une faible application de chaux de l'ordre de 1 %. Ce processus de modification réduit considérablement l'indice de plasticité rendant le sol friable et donc plus maniable. L'ajout du ciment vient ensuite fournir au mélange les pouzzolanes nécessaires afin que le sol puisse gagner de la résistance mécanique dans le temps. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine, ont besoin de cet apport en ciment si les réactions pouzzolaniques (stabilisation) sont désirées. Prusinski et al. (1999) rapportent également que, contrairement à la croyance populaire, le ciment Portland peut stabiliser efficacement des sols ayant un I_p pouvant atteindre 50.

Enfin, Chaddock (1996) rapporte que de plus grandes résistances ont été atteintes après sept jours sur une argile sableuse et une argile silteuse avec un traitement de chaux-ciment comparativement à un traitement à la chaux seule.

Introduction générale

Il existe d'autres techniques de stabilisation tel que :

- Stabilisations par solutions salines.
- Stabilisation par ajout des cendres volantes .
- Drainage .
- Applications à forts pressions.

Tableau I.4.les avantages et les inconvénients des différentes techniques de stabilisation,
(MAHAMED I A., KHEMISSA M. 2013).

Technique	procédés	Avantages	Inconvénient
	compactage	-Le compactage est le plus économique. - Réduire le potentiel expansif	Il faut une grande quantité d'eau (compactage au-dessus de l'optimum avec une W_n élevée).
	Substitution		-L'épaisseur de la couche - La disponibilité du matériau

Introduction générale

Stabilisation mécanique	Préhumidification		Le temps de l'opération. La distribution uniforme de W_n
	Méthode de contrôle	Minimiser l'humidification ou dessèchement	La sensibilité à la variation de la teneur en eau
Stabilisation thermique	Augmenter la température	Réduire la répulsion électrique entre les particules	Très coûteuse
Stabilisation chimique (par ajout de matériaux)	Les Sels	Augmenter la concentration ionique de l'eau libre Réduire le phénomène d'échange	Le choix de type de dosage et de la méthode d'addition d'un produit (Valence et rayon du cation)
	Le ciment	Augmenter la résistance .Diminuer la plasticité Réduire le potentiel de variation de volume. Augmenter la limite de retrait.	Utilisation d'un dosage important.
	La chaux	Diminuer la plasticité la densité sèche et la pression du gonflement Augmenter la résistance et W_{opt} . Utilisation d'un faible dosage.	Carbonation de la chaux

I.6.CONCLUSIONS

Cette synthèse, qui n'est pas exhaustive, montre le grand nombre de méthodes et de lois différentes mises au point pour estimer le gonflement des sols de façon indirecte, c'est-à-dire sans effectuer d'essai de gonflement. Le plus souvent, ces méthodes restent grossières et différencient seulement les sols à fort potentiel de gonflement des sols à faible potentiel de gonflement. Les relations sont, en général, déterminées à partir d'échantillons remaniés dont le comportement n'est pas identique à celui du matériau dans son état naturel. De plus, il semble que les lois mathématiques citées, qui sont certes significatives quand elles sont appliquées à un grand nombre de sols très différents minéralogiquement et granulométriquement, doivent être utilisées avec beaucoup de précautions sur des sols de natures voisines.

L'évolution des procédures d'essais de gonflement a surtout été guidée par des objectifs pratiques, conditionnés par les problèmes posés et la nécessité d'aboutir sans trop de mal à

Introduction générale

une caractérisation des matériaux gonflants. Les méthodes indirectes de caractérisation inspirées des essais d'identification des matériaux sont très utiles à l'évaluation du potentiel de gonflement, mais ne peuvent pas remplacer les essais de laboratoire vis-à-vis de la détermination des paramètres de gonflement, la pression de gonflement et la déformation de gonflement.

Chapitre II:

Introduction générale

CHAPITRE II

Programme expérimental et procédures d'essais.

II.1 Introduction

Après présentation du protocole expérimental suivi et définition des propriétés physico-chimiques des stabilisants utilisés, ce chapitre donne la liste des essais d'identification et de caractérisation réalisée avec une description succincte des procédures expérimentales correspondantes en vigueur en Algérie et les paramètres d'interprétation des propriétés physico-chimiques et mécaniques des sols testés.

II. 2. Localisation

Le terrain se situe au centre-ville de Sidi-Hadjrès, sur la route nationale RN40 à 50 km à l'ouest de la ville de M'sila, exactement dans les bords du nouveau siège de l'Assemblée Populaire Communale (APC) de Sidi-Hadjrès.

Il est délimité par (figure II.1.):

- Au nord : par un terrain vague et le cimetière de Sidi Hadjrès.
- A l'est : par un terrain vague
- A l'ouest : par le CFPA et un terrain vague.
- Au Sud : par la route nationale 40.



Figure II.1. Le site urbain de Sidi-Hadjrès (wilaya de M'sila, Al



Figure II.2. Image satellite prise le 2017, (Source Google Earth)

Introduction générale

Le programme expérimental a été réalisé dans laboratoire du génie civil de l'université de M'sila.

Ce programme est réparti en deux parties :

a- Essais d'identifications

- L'analyse granulométrique (partamissage).
- Les limits d'Atterberg.
- L'essai au bleu deméthylène.

b- Essais mécaniques

- Essais Proctor modifier.

N.B : Les procédures expérimentales suivies dans chaque type d'essai ont été conformes au tant que possible aux méthodes d'essais en vigueur

II.3. Essais d'identifications

3.1.Teneur en eau naturel

3.1.1. Objectif del'essai :

Le test de la teneur en eau permet la détermination de la quantité d'eau existante dans le sol naturel (échantillon).

- $W = M_w/M_s \times 100$ (%)
- M_w : Masse de l'eau dans le sol (échantillon)
- M_s : Masse des particules solides du sol (échantillon)
- La teneur en eau est exprimée en pourcentage.

3.1.2.Equipements :

- Echantillon du sol
- Récipients
- -étuve
- Balance

3.2. Analyse granulométrique tamisage (NF P 94-056)

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,08et 5mm .On appelle :

/ REFUS sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.

/ TAMISAT (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

3.2.1.PRINCIPE DE L'ESSAI :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

Introduction générale

a) Définition:

L'analyse granulométrique se propose de définir la répartition des grains constitutifs d'un sol selon leurs dimensions. On étudie la granulométrie en tamisant le matériau sur une série normalisée de tamis à mailles carrées, les grains sont ainsi séparés selon leur taille.

b) Appareillage:

- Un dispositif de lavage avec arroseur et, éventuellement, de trempage et de malaxage;
- Un jeu de tamis emboîtables à mailles d'ouvertures carrées;

Couvercles et fonds de tamis de diamètre compatible avec celui des tamis;

- Récipients en matériau non altérable, brosse, pinceau,...etc.;
- Balances;
- Une enceinte thermique ou une étuve.



Figure II.3. Appareillage d'analyse granulométrique (tamisage).

c) Mode opératoire:

- Déverser, en une ou plusieurs fois, la totalité du matériau à analyser sur une colonne constituée de tamis d'ouverture de maille croissant de bas en haut et surmontée d'un dispositif arroseur avec:
 - Un tamis d'ouverture adapté à la dimension des plus gros éléments de la prise d'essai;
 - Un tamis inférieur d'ouverture de maille de 80 µm;
 - Le nombre des tamis intermédiaires et l'ouverture des mailles sont choisis de telle sorte qu'il n'y ait pas surcharge sur les tamis.

Introduction générale

- Séparer, par brassage manuel combiné à un arrosage, les éléments retenus sur le tamis d'ouverture de maille la plus grande. Lorsque le refus sur le tamis est propre, le tamis est retiré. L'opération est poursuivie sur le tamis inférieur jusqu'à ce que l'eau s'écoulant sous le dernier tamis soit pratiquement claire;
- Lorsque malgré le brassage et le brossage, des particules fines adhèrent aux grains, un trempage est nécessaire. Dans cette éventualité, verser la totalité du matériau dans un récipient et brasser avec une quantité d'eau;
- Peser le récipient contenant le refus sur le tamis d'ouverture la plus grande;
- Peser les refus cumulés successifs R;
- Enfin, placer les récipients contenant le refus obtenu sur chaque tamis dans une étuve.
- Calcul des facteurs de courbure et d'uniformité:

La forme générale et la pente de la courbe peuvent être décrites en fonction du coefficient d'uniformité «Cu» dit aussi coefficient de Hazen, ou bien le coefficient de courbure «Cc». Le facteur de courbure est calculé par la relation suivante:

$$= (d_{30})^2 / (d_{10} \cdot d_{60})$$

Granulométrie uniforme: grains à peu près de mêmes dimensions;

Granulométrie discontinue: pas de grains dans certains intervalles de dimension.

Le facteur d'uniformité est calculé à partir de:

$$= d_{60} / d_{10}$$

- D60: Diamètre correspondant à 60 % (tamisât);

- D10: Diamètre correspondant à 10% (tamisât), il est appelé aussi «diamètre efficace».

Tableau (II, 01): Description de sol en fonction du coefficient d'uniformité.

Coefficient d'uniformité (Cu)	Description de courbe
$Cu \leq 2$	Granulométrie très serrée
$2 < Cu \leq 5$	Granulométrie serrée
$5 < Cu \leq 20$	Granulométrie semi-étalée
$20 < Cu \leq 200$	Granulométrie étalée
$Cu < 200$	Granulométrie très étalée

3.3.Limites d'Atterberg:

La norme NF P 94-051 : détermination des limites d'Atterberg (limite de liquidité à la coupelle – limite de plasticité au rouleau).

3.3.1.Objet :

Caractériser ' l'argilosité' d'un sol.

Introduction générale

3.3.2.Principe de l'essai :

L'essai s'effectue sur la fraction 0/400 μm en 2 phases :

- Détermination de la teneur en eau W_L pour laquelle une rainure pratiquée dans une coupelle se ferme, suite à des chocs répétés pour un nombre de coups donnés (cette limite de liquidité correspond à une résistance à un cisaillement conventionnel) ;
- Détermination de la teneur en eau W_P pour laquelle un rouleau de sol se fissure (cette limite de plasticité correspond à une résistance à la traction conventionnelle).
-

3.3.3.Equipements :

- Pour la préparation du sol :
 - Tamis à mailles carrées de 400 μm d'ouverture.
 - Bac de manutention.
 - Dessiccateurs.
- Pour la détermination de W_L :
 - Appareil de Casagrande avec ses accessoires.
- Pour la détermination de W_P :
 - Une plaque lisse pour le malaxage du sol et la confection des rouleaux de sol.
 - Une règle pour l'évaluation du diamètre du rouleau de sol.

Pour la mesure des teneurs en eau W :

- Une étuve de dessiccation pouvant être réglée à 50°C.
- Une balance.
- Des spatules, pissette, récipients.



Figure II.4. Appareillage de limites d'Atterberg.

Introduction générale

3. 3. 4. Résultats et interprétations:

Le tableau (III, 07) présente les différentes classifications de sol selon l'indice de plasticité I_p .

Tableau (II, 02): Classification des sols.

Type du sol	Limite de liquidité W_L (%)	Indice de plasticité I_p (%)
Sable	$W_L < 35$	$I_p < 15$
Limon	$20 < W_L < 60$	$5 < I_p < 25$
Argile	$W_L > 30$	$I_p > 15$

Le tableau (III, 03) présente les différents degrés de plasticité du sol selon l'indice de plasticité I_p .

Indice de plasticité I_p (%)	Degré de plasticité
12	Non plastique
12-25	Peu plastique
25-40	Plastique
40	Très plastique

3.4. Essai au bleu de méthylène:

La valeur au bleu désigné par VBS est le nombre de grammes de bleu nécessaire pour saturer 100 g de fines inférieure à 0.08 mm. Cet essai est réalisé sur la fraction 0/2 mm ou 0/5mm, et ramené par une règle de proportionnalité à la fraction 0/50.

Introduction générale

3.4.1. But de l'essai:

Cet essai est utilisé pour déterminer l'argilosité d'un sol. Il consiste à déterminer la quantité de particules argileuses présentes dans l'échantillon. Pour cela on utilise le bleu deméthylène, substance adsorbée de préférence par les argiles.

3.4.2. Principe de l'essai:

L'essai au bleu de méthylène permet la détermination de l'activité, et de la quantité de la fraction argileuse d'un échantillon. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement des quantités de solution de «bleu» et en contrôlant l'adsorption au fur et à mesure. Une goutte de suspension est prélevée et est déposée sur un filtre. L'essai consiste à déterminer l'adsorption maximale obtenue lorsque la tâche est entourée d'une auréole bleu-clair persistante.

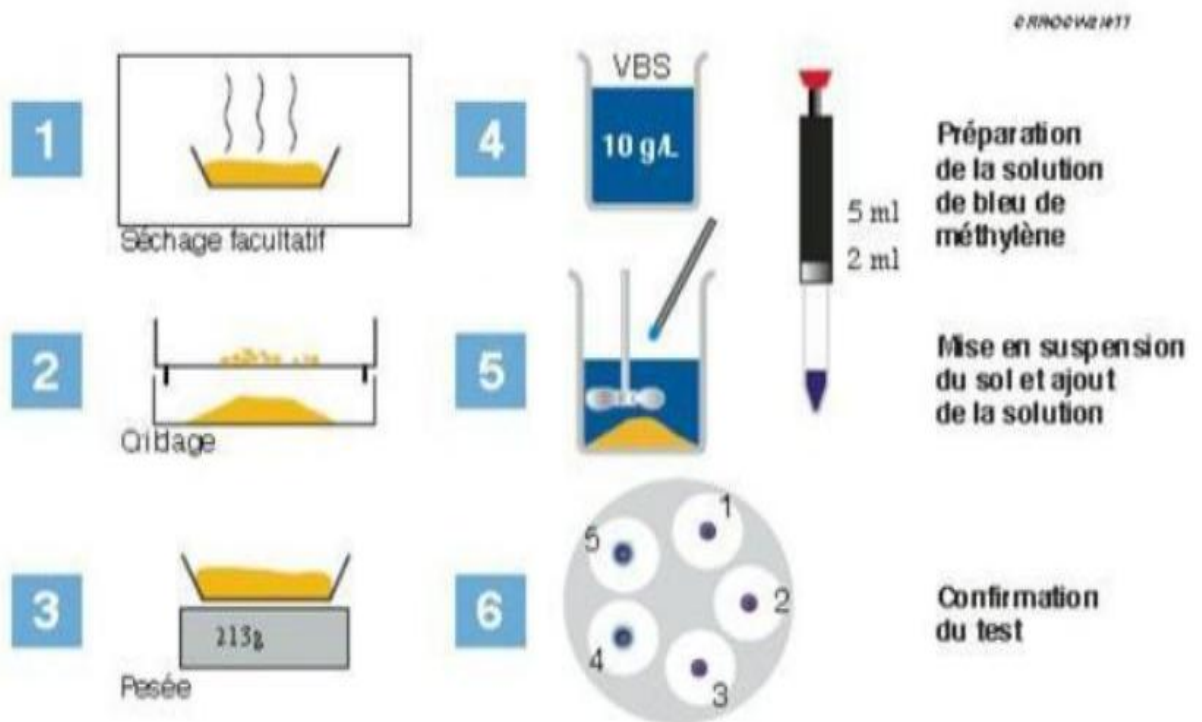


Figure II.5. Les étapes de l'essai au bleu de méthylène.

3.4.3. Appareillage:

- Balance;
- Chronomètre ou équivalente indiquant la seconde;
- Agitateur mécanique à ailettes ayant une vitesse de rotation couvrant au moins la plage de 400 tr/min à 700 tr/min;
- Un récipient cylindrique d'une capacité minimale de 3 000 cm³ ;
- Un tamis, Papier filtre blanc;
- Eau distillée + pissette;
- Bleu de méthylène;
- Dmax du matériau est égal à 5mm.

Introduction générale



Figure II.6. Essai au bleu de méthylène.

3.4.4. Mode opératoire:

On prépare 40 g de fraction 0/5 mm sèche, que l'on met à tremper dans 500 ml d'eau déminéralisé. Le tout est maintenu en agitation permanente au moyen de l'agitateur à ailettes.

3.4.5. Résultats obtenus:

Les résultats de l'essai au bleu méthylène sont calculés comme suit:

$$= B/M * 100$$

Avec :

$$\text{Masse de bleu introduite (solution à 10 g/l): } B = V \times 0.01$$

B: masse de bleu introduite dans le bêcher (en gr)

M: masse sèche de la prise d'essai (en gr)

A titre d'identification le tableau représente les valeurs de bleu de quelques sols.

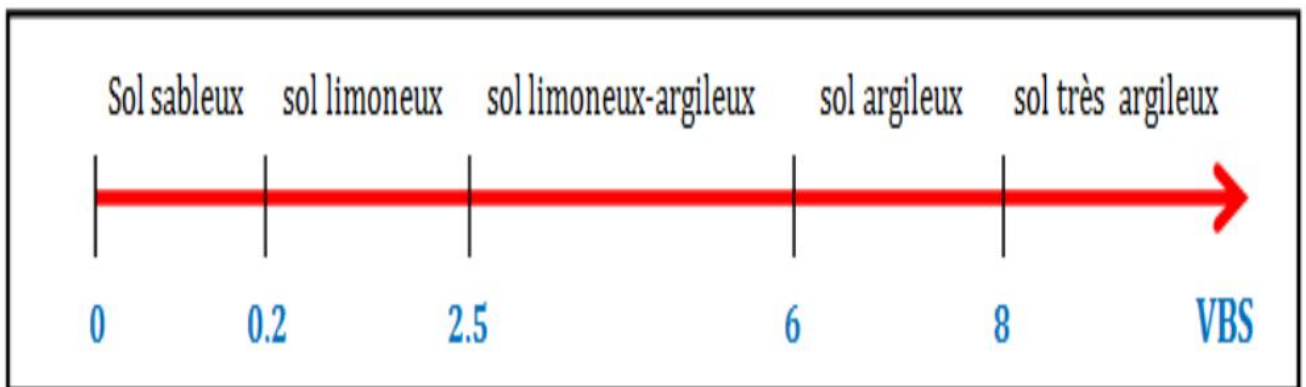


Figure II.7. Valeurs de bleu de quelques sols

Introduction générale

3.5. Essais mécaniques

3.5.1. Proctor

L'essai Proctor, mis au point par l'ingénieur R. Proctor (1933), est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire (ou non) par compactage à une énergie fixée. Les caractéristiques de compactage Proctor sont des paramètres très utilisés pour identifier les matériaux, et pour définir les spécifications de compactage qui leur sont applicables lorsqu'ils sont utilisés dans la construction des remblais, des couches de forme et des assises de chaussées.

3.5.2. But de l'essai:

Son but c'est la détermination de la teneur en eau optimale et la densité sèche optimale, pour un compactage bien défini.

3.5.3. Principe de l'essai:

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage.

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau.

Et aussi on définit plusieurs points d'une courbe (γ_d, ω); on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée de la densité sèche optimale

- **Essai Proctor modifié:**

Le compactage est beaucoup plus intense; il correspond en principe au compactage maximum que l'on peut obtenir sur chantier avec les rouleaux à pieds de mouton ou les rouleaux à pneus lourds modernes. Le compactage dans ce cas-là s'effectue en cinq couches successives avec «la dame Proctor modifiée» l'énergie de compactage est de:

- 55 coups de dame par couche dans le moule C.B.R;
- 25 coups par couche dans le moule Proctor.

3.5.4. Appareillage:

- Moule CBR (éventuellement Proctor);
- Dame Proctor normal, Règle à araser, disque d'espacement;
- Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau;
- Tamis 5 et 20 mm (contrôle et écrêtage le cas échéant de l'échantillon);
- Truelle, spatule, pinceau,....etc.
- Éprouvette graduée 150 ml environ;
- Petits récipients (mesures des teneurs en eau), balance, étuve.

Introduction générale



Figure. II.8. Appareillage de l'Essai Proctor modifié.

3.5.5. Mode opératoire:

- Le matériau à étudier est tamisé «granulométrie < 5mm»;
- Prendre environ 2,5Kg de matériau;
- Ajouter pour chacun une quantité d'eau;
- Placer la hausse sur le moule et donner 25 coups pour chaque couche;
- Compacter le sol en trois 03 couches d'argile à avoir la dernière débordant légèrement le haut de moule;
- Enlever la hausse et araser soigneusement le haut du moule;
- Peser le moule avec le sol;
- On prend de chaque cotés (au-dessus et au-dessous) de ce moule une quantité pour la détermination de la teneur en eau;
- Répéter l'essai pour des teneurs en eau croissante;
- Mettre les tares dans l'étuve pendant 24 heures

Chapitre III:

Introduction générale

Chapitre III

Présentation et analyses des résultats d'essais.

III.1. INTRODUCTION:

Ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats de l'essai réalisé sur le sol étudié et leur interprétation, il est organisé sous forme de deux parties : Une première partie concernant le sol non traité, qui comporte les essais d'identification (analyse granulométrique et, limites d'Atterberg) l'essai au bleu de méthylène, l'essai mécanique (Proctor modifié,)

Une deuxième partie portant sur le sol traité à différentes teneurs en ciment et différentes classes, qui regroupe des essais physiques et de essais mécaniques (Proctor modifié, Les interprétations des résultats seront décrites à la fin de chaque partie du sol traité.

III.2. Les essais d'identification :

❖ *Matériaux : argile de Sidi_Hadjres_M'sila*

2.1 Le calcul et les résultats

représentant les valeurs de teneur en eau.: Tableau.1

N° des essais	1	2	3
Masse humide	86.8	64.4	45.2
Masse sec	84	62.2	43.6
Teneur en eau %	3.33	3.53	3.66
Moyenne de teneur en eau %	3.44		

2.2. Analyse par tamisage :

La norme NF P 94-056 : analyse granulométrique par tamisage.

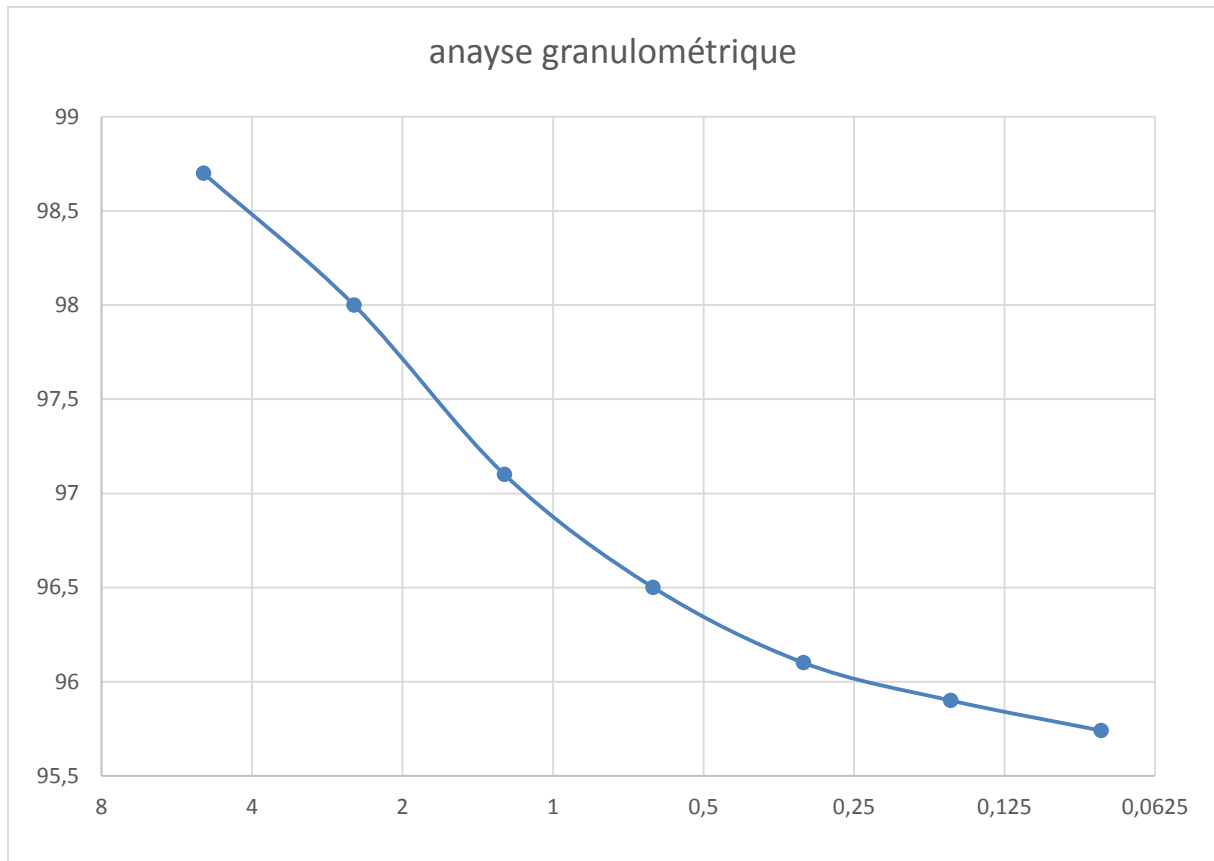
2.2.1. OBJECTIF :

➤ **Essai (01) :**

Tableau.2: granulométrie par tamisage de l'essai N:1.

Ouverture des tamis (mm)	Refus partiale (g)	Refus cumulés (g)	% de Refus cumulés	Tamisat cumulés (g)	% de tamisat cumulés
5	13	13	1.3	987	98.7
2.5	7	20	2	980	98
1.25	9	29	2.9	971	97.1
0.63	6	35	3.5	965	96.5
0.315	4	39	3.9	961	96.1
0.16	2	41	4.1	959	95.9
0.08	1.6	42.6	4.26	957.4	95.74
Fond	957.4	1000	100	-	-

Introduction générale



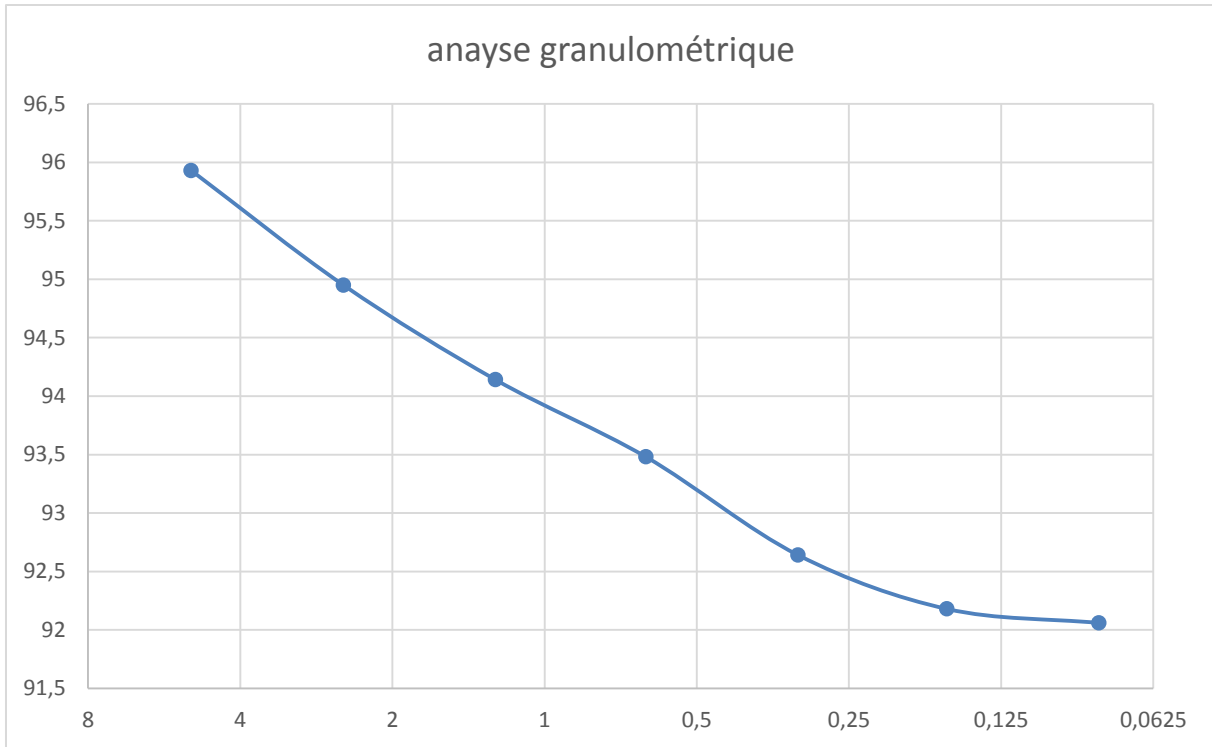
La courbe d'analyse granulométrique par tamisage essai N° 01

➤ **Essai (02) :**

Tableau.3: granulométrie par tamisage de l'essai N:2.

Ouverture des tamis (mm)	Refus partiale (g)	Refus cumulés (g)	% de Refus cumulés	Tamisat cumulés (g)	% de tamisat cumulés
5	40.7	40.7	4.07	959.3	95.93
2.5	9.8	50.5	5.05	949.5	94.95
1.25	8.1	58.6	5.86	941.4	94.14
0.63	6.6	65.2	6.52	934.8	93.48
0.315	8.4	73.6	7.36	926.4	92.64
0.16	4.6	78.2	7.82	921.8	92.18
0.08	1.2	79.4	7.94	920.6	92.06
Fond	920.6	1000	100	–	–

Introduction générale



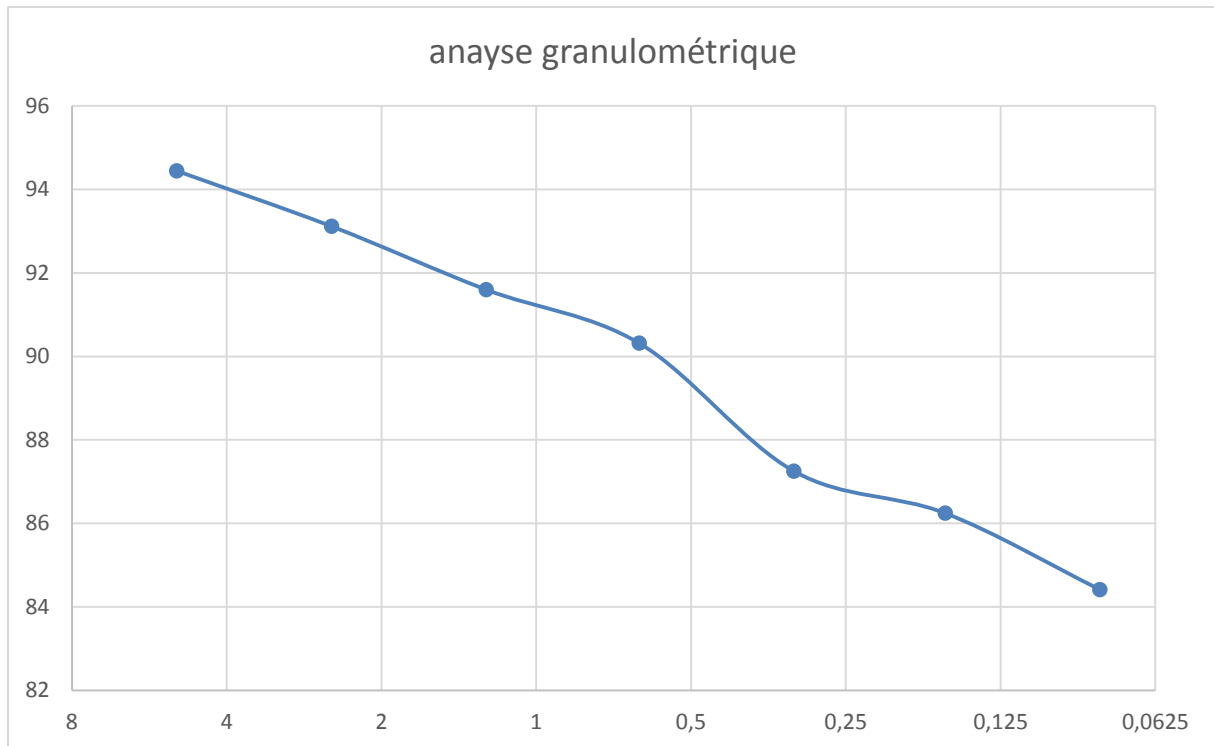
La courbe d'analyse granulométrique par tamisage essai N° 02

➤ **Essai (03) :**

Tableau.4: granulométrie par tamisage de l'essai N:3.

Ouverture des tamis (mm)	Refus partiale (g)	Refus cumulés (g)	% de Refus cumulés	Tamisat cumulés (g)	% de tamisat cumulés
5	83.37	83.37	5.55	1416.63	94.44
2.5	19.92	103.29	6.87	1396.71	93.11
1.25	22.76	126.05	8.38	1373.95	91.59
0.63	19.24	145.29	9.66	1354.71	90.31
0.315	45.99	191.28	12.72	1308.72	87.24
0.16	15.07	206.35	13.72	1293.65	86.24
0.08	27.46	233.81	15.55	1266.19	84.41
Fond	1266.19	1500	100	–	–

Introduction générale



La courbe d'analyse granulométrique par tamisage essai N° 03

2.2.2.Expression des résultats

➤ **Essai N 01 :**

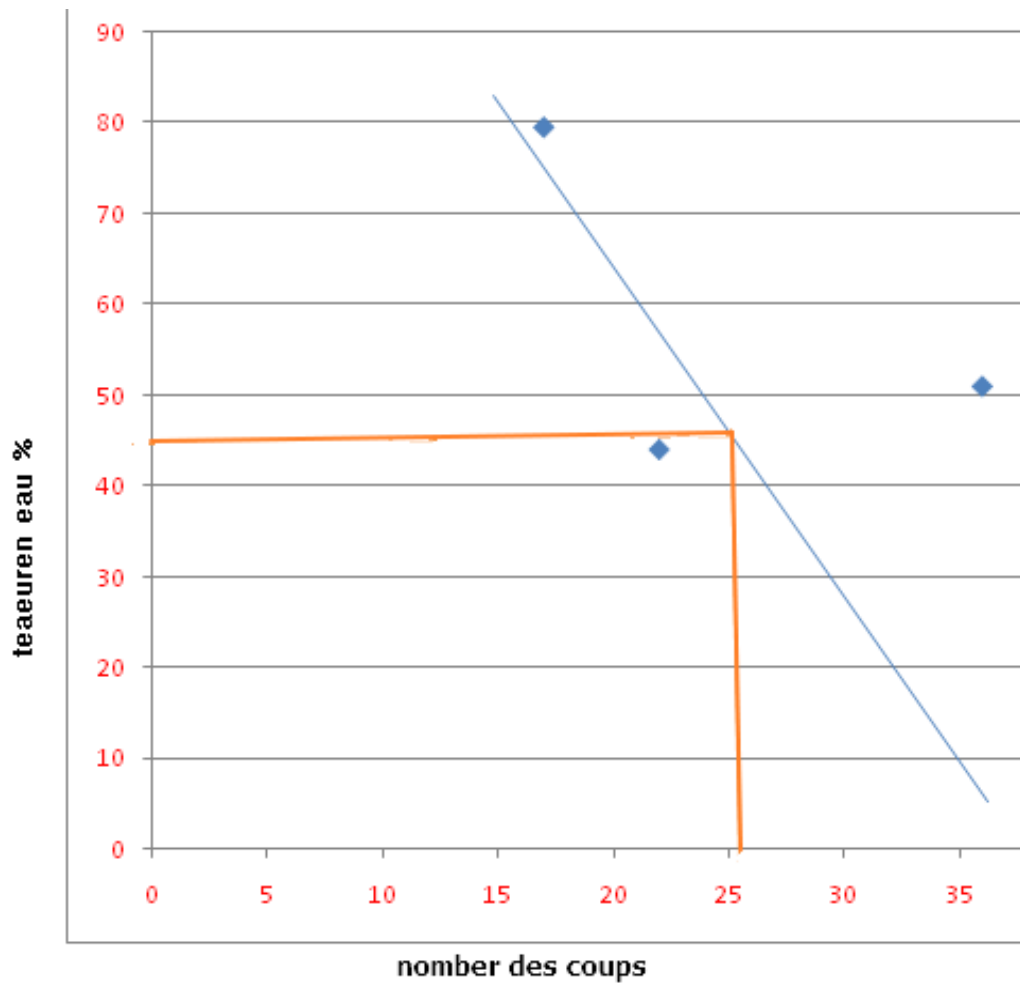
Limite de liquidité :

Les résultats de série d'essai 01 obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.5: Résultats de essais limite d'atterberg.

Mesures N° :	1	2	3
Nombre des coupes	20	23	33
Masse humide (g)	45.54	44.04	40.53
la masse sèche (g)	30.6	30	28
Teneur en eau %	48.82	46.8	44.75

Introduction générale



la courbe de limite de liquidité du sol naturel de essai N° 01

Nombre des coups 25

$W_L = 47.1$ gonflement très élevé

Limite de plasticité :

L'indice de plasticité.:Tableau.6

N° :	1	2
Masse humide (g)	1.83	2.07
Masse sèche (g)	1.44	1.57
Teneur en eau %	27.083	31.84
W_P %	29.46	

$$I_P = W_L - W_P = 47.1 - 29.46$$

L'indice de plasticité :

$$I_P = 17.64 \text{ peu plastique}$$

Introduction générale

➤ **Essai N 02 :**

Limite de liquidité

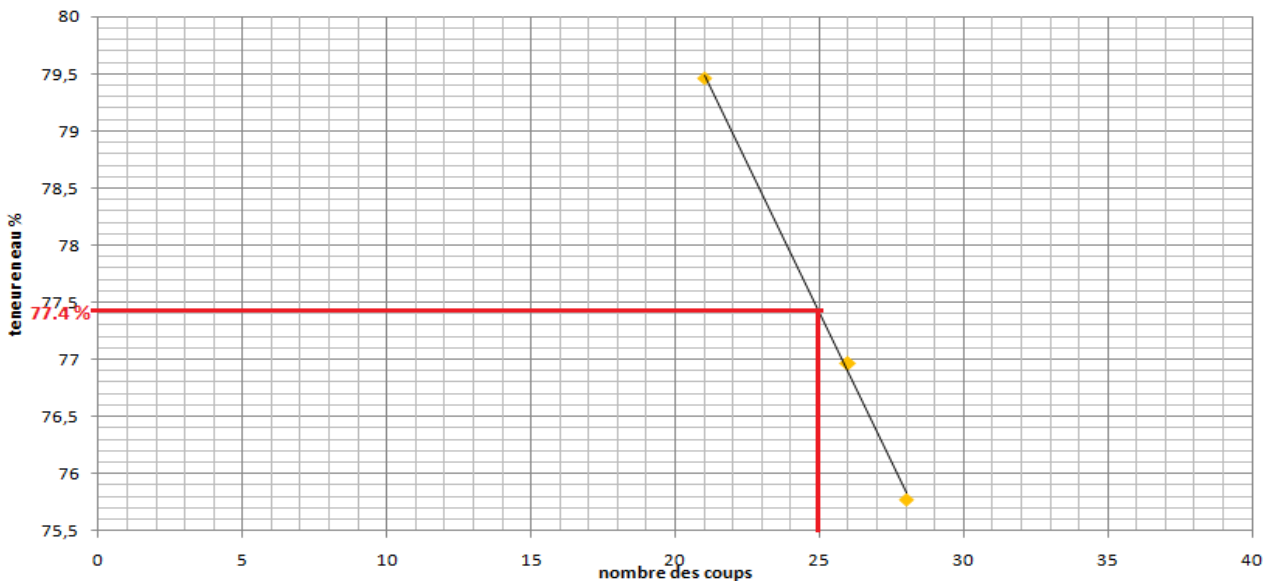
Les résultats de série d'essai 02 obtenus sont donnés dans le tableau suivant

L'indice de plasticité.:Tableau.7

Mesures N° :	1	2	3
Nombre des coupes	21	26	28
Masse humide (g)	62.92	43.94	51.96
la masse sèche (g)	35.06	24.83	29.56
Teneur en eau %	79.46	76.96	75.778

Nombre des coupes 25

$W_L = 73 \%$



la courbe de limite de liquidité du sol naturel de l'essai N° 02

Limite de plasticité :

Nombre des coupes 25

$W_L = 77.4 \%$

L'indice de plasticité.:Tableau.8

N° :	1	2	3
Masse humide (g)	1.73	1.39	1.57
Masse sèche (g)	1.35	0.95	1.19
Teneur en eau %	28.148	46.31	26.834
$W_P \%$	33.764		

➤ **L'indice de plasticité :**

➤ $I_P = W_L - W_P = 77.4 - 33.764$

$I_P = 43.636$ très plastique

Introduction générale

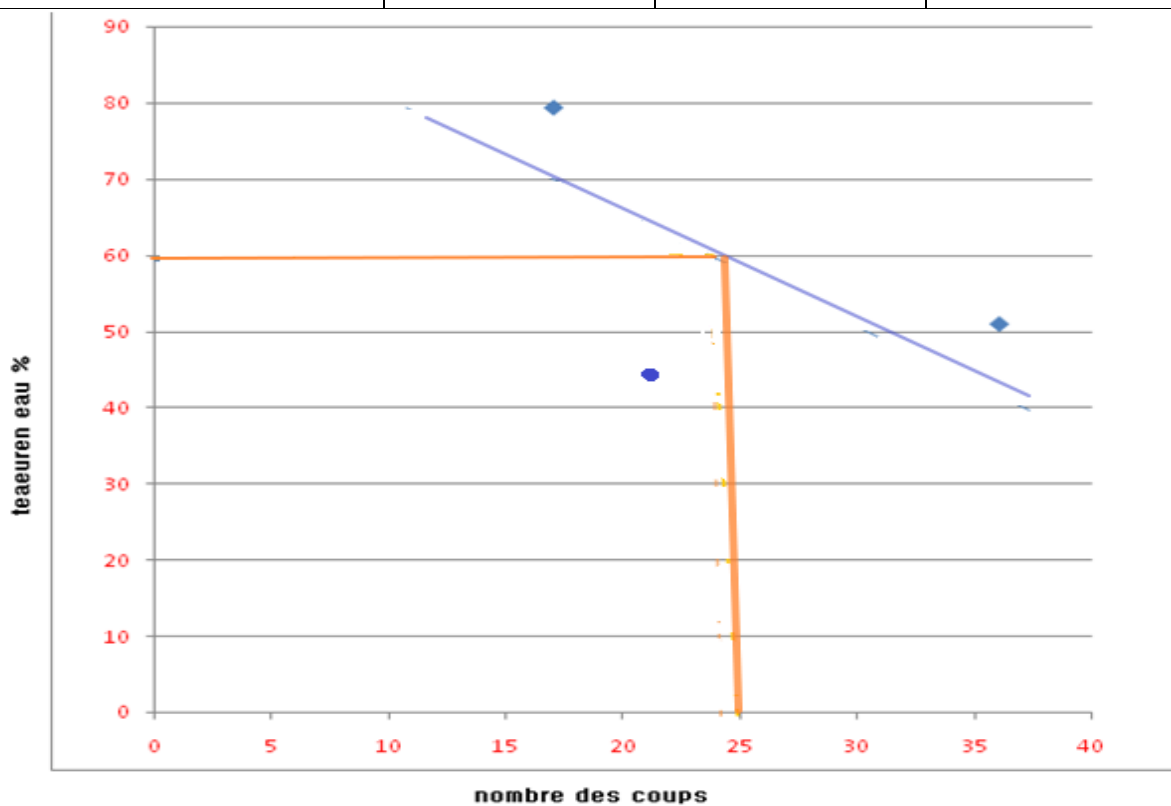
➤ Essai N 03 :

Limite de liquidité :

Les résultats de série d'essai 03 obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.9: Résultats de essais limite d'atterberg.

Mesures N° :	1	2	3
Nombre des coupes	17	22	36
Masse humide (g)	51.77	42.62	55.5
la masse sèche (g)	35.06	29.6	38.4
Teneur en eau %	79.46	43.98	50.93



la courbe de limite de liquidité du sol naturel de l'essai N° 03

Nombre des coupes 25

$W_L = 60 \%$

Introduction générale

Limite de plasticité :

Tableau.10: L'indice de plasticité.

N° :	1	2	3
Masse humide (g)	1.73	1.39	1.57
Masse sèche (g)	1.35	0.95	1.19
Teneur en eau %	28.148	46.31	26.834
W_P %	33.764		

L'indice de plasticité :

$$I_P = W_L - W_P = 60 - 33.764$$

$$I_P = 26.236 \text{ peu plastique}$$

2.3.L'essai au bleu de méthylène :

Tableau.11. Résultats des paramètres tirés de l'essai au bleu méthylène.

N° des essais	Masse de sol (g)	Volume de bleu	VBS (g/cm ³)	
1	30	475	16.95	>8 très argileux
2	30	395	14.99	>8 très argileux
3	30			
Moyenne				

Les résultats de l'essai au bleu de méthylène de l'argile sont regroupés D'après les résultats obtenus la valeur de bleu de méthylène est supérieure à 8, il s'agit d'un soi très argileux.

Tableau.12. Paramètres géotechnique d'argile de Sidi Hadjres_M'sila

Paramètres	Nombre des essais	Moyenne
Teneur en eau naturel (%)	3	2.62
Passant à 0.08 mm (%)	6	93.16
Limite de liquidité (W_L %)	4	74.775
Limite de plasticité (W_P %)	4	27.728
Indice de plasticité (I_P %)	4	47.116
Indice de consistance (I_C %)		
Valeur de bleu de méthylène		

Introduction générale

III.3.ESSAIS MECANQUES:

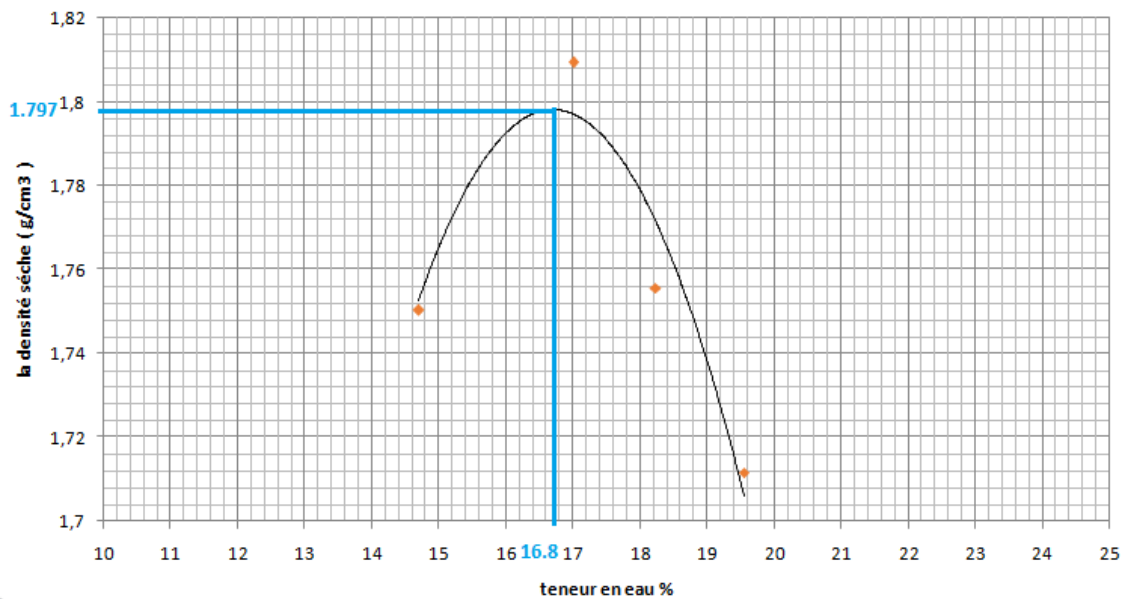
3.1.Proctor modifié

3.1.1.Sol naturel (0% ciment) :

Tableau.13. . Résultat de Proctor modifié (0% ciment)

Teneur en eau %	12 %	14%	16%	18%
Masse de sol (g)	1885.4	1988.4	1949.5	1921.8
Masse d'échantillon humide (g)	36.7	29.6	55.8	36.7
Masse d'échantillon sec (g)	32	25.3	47.2	30.7
Teneur en eau %	14.687	16.99	18.22	19.543
Yh	2.007	2.117	2.075	2.046
La densité sèche (g/cm ³) Yd	1.75	1.809	1.755	1.711

0%



Courbe de proctor modifié (sol naturel) : la densité sèche en fonction de teneur en eau

Introduction générale

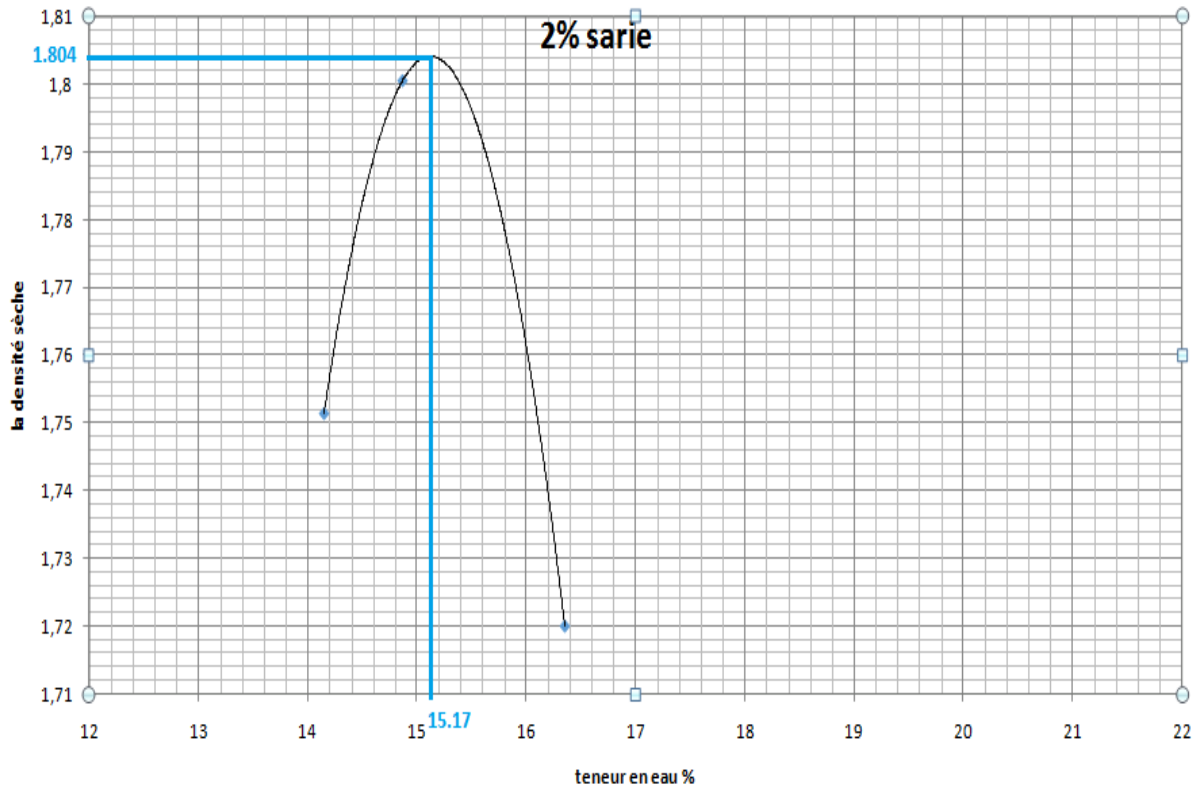
La densité maximale : **1.797 g/cm³**

La teneur en optimale : **16.8 %**

Tableau.14. Résultat de Proctor modifié (2% ciment) .

Teneur en eau %	12 %	14%	16%	18%
Masse de sol (g)	1877.7	1942.5	1879.7	
Masse d'échantillon humide (g)	35.5	30.9	31.3	
Masse d'échantillon sec (g)	31.1	26.9	26.9	
Teneur en eau %	14.147	14.869	16.356	
Yh	1.99	2.068	2.001	
La densité sèche (g/cm³)_{Yd}	1.751	1.8004	1.720	

3.1.2..Sol avec 2% sarie :



Courbe de proctor modifié (sol +2% ciment) : la densité sèche en fonction de teneur en eau

Introduction générale

La densité maximale : **1.804 g/cm³**

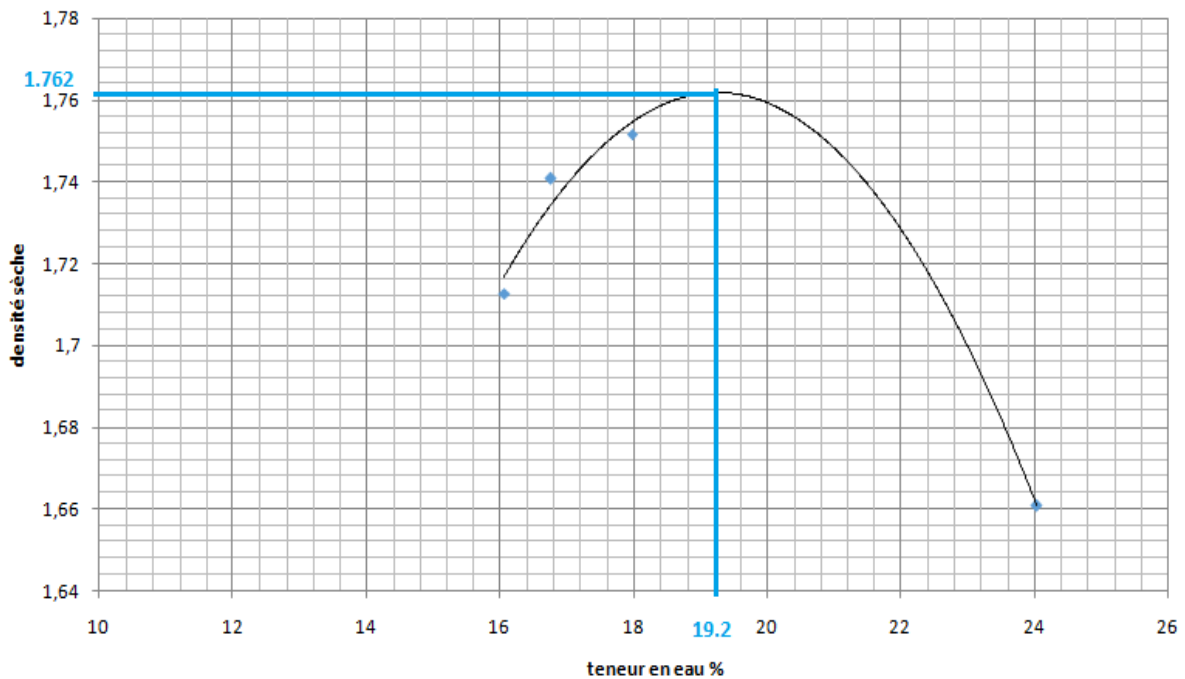
La teneur en optimale : **15.17 %**

3.1.3.Sol avec 4% sarie :

Tableau.15. .Résultat deProctor modifié (4% ciment) .

Teneur en eau %	12 %	14%	16%	18%
Masse de sol (g)	1867.2	1908.9	1940.9	1934.7
Masse d'échantillon humide (g)	45.5	43.2	61.7	36.6
Masse d'échantillon sec (g)	39.2	37	52.3	29.51
Teneur en eau %	16.071	16.756	17.973	24.025
Yh	1.988	2.032	2.066	2.059
La densité sèche (g/cm3)Yd	1.712	1.740	1.751	1.660

4%



Courbe de Proctor modifié (sol +4% ciment) : la densité sèche en fonction de teneur en eau

La densité maximale : **1.762 g/cm³**

La teneur en optimale : **19.2 %**

III.4.CONCLUSION

De l'analyse des résultats d'essais obtenus sur les sols prélevés sur le site de Sidi-Hadjres (wilaya de M'sila), on peut dégager les conclusions suivantes :

- les sols testés sont identifiés comme une argile marneuse très plastique. Les différentes classifications utilisées montrent que cette argile marneuse est caractérisée par un potentiel de gonflement très élevé;

Conclusion générale

Introduction générale

Conclusion générale

Au terme de ce mémoire, il serait bien évidemment illusoire de prétendre avoir traité de manière exhaustive tous les aspects du comportement des sols argileux expansifs.

La synthèse bibliographique effectuée à partir de nombreuses références nationales et internationales a permis de souligner quelques affirmations concluantes dont les plus importantes sont les suivantes :

- Les sols argileux contenant une plus ou moins forte proportion de montmorillonite peuvent être considérés comme expansifs susceptibles de gonfler lors des cycles d'humidification et de rétrécir lors des cycles de séchage. L'identification de ce type de sols en termes de potentiel de gonflement ou de retrait peut être faite de manière indirecte ou de manière directe. on peut simplement noter que contrairement aux méthodes d'identification indirecte basées sur des procédures d'essais normalisés, les méthodes de caractérisation directes font appel à des procédures d'essais normalisés et non normalisés.

L'emploi des sols expansifs après traitement spécifiques au ciment et à la chaux comme matériaux de remblais ou de couches de formes routières ou comme support de fondations des ouvrages géotechniques.

L'étude expérimentale avait pour finalité de vérifier les aspects physicomécaniques évoqués ci-dessus et de caractériser le comportement d'une argile naturelle prélevée sur le site urbain de Sidi-Hadjrès dans la wilaya de M'Sila vue de son utilisation en construction routière. Le choix de ce site a été motivé en raison de son extension vers des zones à risques, où des désordres apparaissent fréquemment dans les infrastructures routières, voies et réseaux divers et même dans les constructions civiles et industrielles de faible hauteur.

Les résultats obtenus ont permis de dégager les conclusions suivantes :

- Les échantillons prélevés sur le site de Sidi-Hadjrès ont été identifiés comme une argile marneuse très plastique. Les différentes classifications basées sur les caractéristiques géotechniques montrent que cette argile naturelle est caractérisée par des potentiels de gonflement très élevés.

Introduction générale

BIBLIOGRAPHIQUE :

[1] : Melbouci.B, « Etude comparative du traitement du sol marneux a la chaux et au ciment dans les couches de forme des chaussées », Laboratoire Géo matériaux, Environnement et Aménagement, Université Mouloud Mammeri, 2017.

[2] : GRUNBERGER D., (1995), étude expérimentale de l'évolution des microstructures et des propriétés physiques et mécaniques des argiles au cours de la compaction, thèse université de Montpellier ii, sciences et techniques du Languedoc, 20 décembre 1995.

[3] : Lakhdar MEKKI (2006) Méthodologie d'études et techniques d'identification des paramètres de comportement des sols fins soumis à des cycles de sécheresse prolongée (application aux argiles expansives de M'Sila). Mémoire de magister, Université de M'Sila.

[4] : Robert.D, williamd.k, Traduit par Jean.L : « Introduction à la géotechnique », 1991

[5] : Bouafia.A, «Mécanique des sols appliquée problèmes résolus», l'office des publications universitaires, Ben Aknoun- Alger, 1996.

[6] : Sadoun.A, Bechkit.O, «Etude géotechnique d'un tronçon autoroutière sur 12 Km de la pénétrante Sétif /Barika», mémoire de master, département d'hydraulique et génie civil, université de Jijel, 2015.

[7]: Marwana.A, Muangongo.I, «Influence de la présence de sulfates sur le traitement du sol argileux par des ajouts minéraux», mémoire de master, département des sciences de la terre, université de Khemis Miliana, 2015.

[8]: Portet, Noël, Nicaise, Portillo, Vermeulen, « La classification des sols », ente-Aix, 2011.

[9]: Harrat. M, «Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique Etude sur site: unité Maghreb céramique de Touggourt», mémoire de magistère, département de génie procédé, université d'Ouargla, 2007.

[10]:<https://www.upicardie.fr/beauchamp/mst/argiles.htm?fbclid=IwAR0V1oVq1V3rotSVHISScPKk8sXUmg74oUQAKCo40N3ZKe1Lo4n37aftYLY>

[11]: Tatiana. M, « Analyse à l'échelle microscopique des phénomènes d'humectation et de dessiccation des argiles », thèse de doctorat, école centrale paris, France, 2011

[12]: Grim R.E. (1962) *Clay mineralogy in relation to the Engineering properties of clay materials*. Mc Craw Hill, pp.204-277.

[13]: MAHAMED I A., KHEMISSA M. (2013). *Etude de l'évolutivité d'une argile expansive traitée aux liants hydrauliques. Communication à la 3ème Conférence Maghrébine en Ingénierie Géotechnique (3ème CMIG' 13), Alger, 18-19 Novembre 2013.*

[14]: François.S, « Elément de mécanique des sols », école Nationale des ponts et chaussées, 1997.

[15]: Delloum. I, « Caractérisation du fluage d'une argile expansive reconstituée à forte énergie de compactage » Mémoire de master, Département de Génie Civil, Université de M'sila 2016.

[16]: Bultel F. (2001) *Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement revêtements des tunnels*. Thèse docteur ENPC, 298 pages.

[17]: Lakhdar MEKKI (2018). « Comportement d'une argile expansive fortement sur consolidée », thèse de Doctorat, Université de m'sila,