



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

Département de Génie civil

MEMOIRE DE LICENCE (VOA)

Présenté par :

Dehane Mebarka et Djellal Abdelkader

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Travaux Publics

OPTION : Voies et Ouvrages d'Art

Thème

*Expertise géotechnique au niveau de la cité 30 logements
Ain Salah/ Tamanrasset/6 R.M*

Jury de soutenance :

Mr. Benguit Amar
Mr. Annane Abdellah
Mr. Ziregue Ahmed
M. Matallah Ali

MAA
MAA
MCA
Ingénieur

Président
Examinateur
Encadreur
Invité

Année Universitaire 2022-2023

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le Tout Puissant, pour le courage et la patience qu'il nous a offerte, afin de réaliser ce travail. à terme,

Nous remercions chaleureusement notre encadrant **Mr. Ziregue Ahmed** qui a accepté de nous diriger dans ce travail, de nous avoir tenu la main jusqu'aux dernières lignes de ce manuscrit à travers ses relectures minutieuses et enrichissantes, ainsi que ses suggestions toujours visées. Grâce à sa disponibilité, son soin et ses remarques, la réalisation de ce mémoire a abouti à sa fin. Nous le remercions également de nous avoir accompagnés dans notre parcours universitaire jusqu'à cette heure, car il a été comme un père pour nous, et nous le remercions beaucoup.

Nos vifs remerciements vont aux membres du jury le Président **MR. BENGUIT AMAR** et L'Examinateur **MR. ANNANE ABDELLAH** qui nous ont fait l'honneur de lire et d'évaluer ce travail. et dont les observations et les corrections auront sans aucun doute un grand impact sur la qualité de cette recherche

Nous exprimons également notre grande gratitude au personnel du Laboratoire des Travaux Publics du Sud à Laghouat LTPs en particulier : **M. Matallah Ali** pour sa disponibilité pour son aide précieuse et inestimable ainsi que pour l'inspiration et le temps qu'il a bien voulu consacrer à l'élaboration de ce travail

Nous adressons également nos sincères remerciements au personnel du Laboratoire des Travaux Publics du Sud à Ghardaïa LTPs et pour leur responsable est le Directeur Technique : **M. AMIEUR Abdenacer**

Il nous est agréable de remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin, directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Un merci spécial à notre Université de Laghouat Nous saisissons également cette opportunité pour remercier l'ensemble des enseignants, que contribué à notre formation, notre Département des Génie civil

Nous adressons également nos remerciements au personnel du laboratoire de génie civil de l'université qui a grandement facilité le travail au sein du laboratoire pédagogique.



DEDICACE

Je dédie cet humble travail à tous mes chers particulièrement qui m'ont toujours poussée, encouragée et aimé voir ma réussite ; à mon honorable famille.

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Je tiens à remercier également tous mes enseignants de l'école primaire à l'université, parce qu'ils ont rendu l'impossible possible.

A mes amis et à tous les étudiants en génie civil et travaux publics, Promotion 2020/2021.

A tous mes amis de Géotechnique et à tous les autres qui ont été là pour moi et tous les autres que je connais si bien.

Merci d'être toujours là pour moi.

DEHANE MEBARKA

Au sens de gratitude et d'amour je dédie ce travail à Dieu tout puissant

Allah qui m'a donné la volonté et la puissance pour réaliser cette étude dont

Je souhaiterai qu'elle soit acceptée par lui sobhanaho et qu'il m'aide à continuer inchaallah.

A ma famille : Avec une profonde reconnaissance et toute ma gratitude, grâce et remerciement vont aussi à MES PARENTS pour ses tendresses, amours, ses encouragements, et surtout de tous ses sacrifices, pour avoir sacrifié ses plus belles années pour moi pour que je puisse mon arriver là où je suis, c'est grâce à eux ; et aussi pour mes frères, ainsi à ma famille que je n'oublierai jamais ses encouragements et ses conseils aussi.

A mes amis : A tous mes meilleurs amis : Abdel HAMID, BELKACEM, ANWER, MOAD, Khaled, ABDELKADER et MOHAMED et les autres.

A mon binôme : DEHANE MEBARKA

A mon Tous ce qui m'aime et que j'aime

DJELLAL ABDELKADER

Résumé :

La compréhension du sol est en effet cruciale pour la réussite des projets de construction. Une étude géotechnique approfondie, elle permet d'identifier les caractéristiques et les propriétés du sol, ainsi que les contraintes auxquelles il peut être soumis. Cela aide à prévenir les problèmes potentiels tels que les fissures, les affaissements ou les compressions qui pourraient survenir pendant ou après la construction. Dans le cas où ces problèmes se manifestent malgré les précautions prises, une expertise géotechnique devient nécessaire. Ce travail a pour objectif la réalisation d'une étude d'expertise géotechnique sur le sol de la cité de 30 logements à In Salah qui ont fait l'objet d'un certain nombre de pathologies et de déterminer les causes des problèmes rencontrés. Elle permet de mieux comprendre les interactions entre le sol, la structure et les contraintes appliquées, et d'identifier les solutions appropriées pour résoudre ces problèmes.

Parmi les résultats obtenus au cours de l'étude d'expertise réalisé dans ce mémoire :

Les coupes lithologiques des sondages réalisés sur une profondeur de 08 m ont montré que le sol est formé essentiellement d'une couche d'argile atteints les 03.0m de profondeur repose sur une couche épaisse de sable moyen a grossier.

A partir des résultats de l'essai œdométrique et d'après G. Sanglerat cette argile possède une compressibilité moyenne ($C_c = 0.18$) et peu gonflante ($C_g = 5.06$).

Pour une profondeur de 3.0 m et une contrainte de service σ_s de 1.0 bars, les tassements obtenus sont d'ordre de 1.38 cm pour une semelle filante, cette valeur est admissible.

Mots clés : mécanique des sols, l'étude du sol, d'expertise géotechnique

المخلص

إن فهم التربة أمر بالغ الأهمية لنجاح مشاريع البناء. تتيج الدراسة الجيوتقنية الشاملة تحديد خصائص وخصائص التربة، وكذلك الضغوط التي قد تتعرض لها. هذا يساعد على منع المشاكل المحتملة مثل الشقوق أو الترهل أو الضغط التي يمكن أن تحدث أثناء أو بعد البناء. في حالة ظهور هذه المشاكل على الرغم من الاحتياطات المتخذة، تصبح الخبرة الجيوتقنية ضرورية. تتكون هذه الخبرة من إعادة دراسة مجال المشروع من أجل تحديد أسباب المشاكل التي تمت مواجهتها. إنه يجعل من الممكن فهم التفاعلات بين التربة والبنية والقيود المطبقة بشكل أفضل، وتحديد الحلول المناسبة لحل هذه المشكلات.

من بين النتائج التي تم الحصول عليها خلال دراسة الخبراء التي أجريت في هذه الأطروحة: أظهرت المقاطع الحجرية من السير التي أجريت على عمق 08 مترا أن التربة تتكون أساسا من طبقة من الطين تصل إلى عمق 03.0 مترا وتنتند إلى طبقة سميكة من الرمل المتوسط.

استنادا إلى نتائج اختبار أويديوميتريك ووفقا ل غ. سانجيرار، هذا الطين لديه متوسط الانضغاطية ($C_c = 0.18$) وتورم قليلا ($C_g = 5.06$) بالنسبة لعمق 3.0 متر وضغط الخدمة من 1.0 بار، فإن المستوطنات التي تم الحصول عليها هي من أجل 1.38 سم لنعل الغزل، هذه القيمة مقبولة. الكلمات المفتاحية: ميكانيكا التربة، دراسة التربة، الخبرة الجيوتقنية..

Abstract:

Understanding the soil is indeed crucial for the success of construction projects. A thorough geotechnical study makes it possible to identify the characteristics and properties of the soil, as well as the stresses to which it may be subjected. This helps to prevent potential problems such as cracks, sagging or compressions that could occur during or after construction.

In the event that these problems manifest themselves despite the precautions taken, geotechnical expertise becomes necessary. This expertise consists of a re-study of the project field in order to determine the causes of the problems encountered. It makes it possible to better understand the interactions between the soil, the structure and the applied constraints, and to identify the appropriate solutions to solve these problems.

Among the results obtained during the expert study carried out in this thesis:

The lithological sections of the soundings carried out on a depth of 08 m showed that the soil is formed essentially of a layer of clay reaching the 03.0m depth and rests on a thick layer of medium sand has coarsened.

Based on the results of the oedometric test and according to G. Sanglerat, this clay has an average compressibility ($C_c = 0.18$) and little swelling ($C_g = 5.06$).

For a depth of 3.0 m and a service stress σ_s of 1.0 bars, the settlements obtained are of the order of 1.38 cm for a spinning sole, this value is admissible.

Keywords: soil mechanics, soil study, geotechnical expertise.

Liste des figures

Figure I-1: Exemple -1- des constructions géotechniques.....	7
Figure I-2: Exemple -2- des constructions géotechniques.....	8
Figure II-1: Caractéristique et paramètre de sol.....	15
Figure II-2: Paramètre dimensionnel.....	15
Figure II-3: Paramètre sans dimension.....	15
Figure II-4: courbe granulométrique.....	20
Figure II-5: Opération d'analyse granulométrique par tamisage	21
Figure II-6: Représentation des limites d'Atterberg.....	23
Figure II-7: Matériels utiliser dans l'essai de limite d Atterberg	23
Figure II-8: Classification des sols par la valeur au bleu méthylène.....	25
Figure II-9: Essai au bleu méthylène.....	26
Figure II-10: Essai d'équivalent sable.....	27
Figure II-11: Appareil de cisaillement	28
Figure II-12: appareil œdométrique	30
Figure III-1: La carte de zonage de l'Algérie et la position de la région d'étude, (RPOA 2008).	37
Figure III-2: Carte géologique de la région d'INSALAH	37
Figure III-3: Situation du site et implantation des sondages	39
Figure III-5: Fissure incliné entre le poteau de rive et la fenêtre.....	39
Figure III-4 : Fissure vertical au niveau du poteau de rive.	39
Figure III-6: Fissure verticale au niveau d'une clôture en parpaing.	40
Figure III-7: Fissure inclinée entre le poteau de rive et les fenêtres plus décollement de l'enduit sur le mur.....	40
Figure III-3 : Caisse de sondage N°01	41
Figure III-9: Caisse de sondage N°02.....	41
Figure III-10 : Caisse de sondage N°03	41
Figure III-11 : Examen du puits de reconnaissance	42

Liste des tableaux

Tableau I-1: La mécanique des sols à travers ses grandes théories.....	6
Tableau I-2: La mécanique des sols à travers ses grandes théories.....	10
Tableau II-1: Masse volumique apparente de quelques matériaux (Cousent, 2005).	17
Tableau II-2: Etat hydrique des sols selon leur teneur en eau.....	18
Tableau II-3: Classification des sols selon γ_h et γ_d	19
Tableau II-4: Qualité de sable selon le « Es ».....	27
Tableau II-5: Classification du sol selon Cc.	30
Tableau II-6 Masse moléculaire du sulfate de baryum BaSO ₄ :	33
Tableau II-7 Masse de SO ₃	33
Tableau III-1: Données climatiques à In Salah climat désertique chaud - zone saharienne hyperarid.....	36
Tableau III-2 : Analyse granulométrique	42
Tableau III-3 : Limite d'Atterberg.....	43
Tableau III-4 : Cisaillement rectiligne (UU)	43
Tableau III-5 : résultats d'essai œnométrique.....	44
Tableau III-6 : Analyse chimique sommaire	44
Tableau III-7 : Analyse granulométrique :	44
Tableau III-8 : Analyse granulométrique.....	44
Tableau III-9 : Cisaillement rectiligne (UU)	45
Tableau III-10 : Analyse chimique sommaire	45
Tableau III-11 : calcul de tassement	46

TABLE DES MATIERES

I.	Généralité sur le génie civil :	4
I.1	Le génie civil :.....	4
I.2	La mécanique des sols :	5
I.3	La mécanique des roches :	5
I.4	La géologie de l'ingénieur :.....	5
I.5	L'Objet de la mécanique des sols :	5
I.6	Histoire de la mécanique des sols :	6
I.7	Domaine d'application :	6
I.8	Le sol et la construction :.....	8
I.9	Les pathologies rencontrées sur les bâtiments :.....	9
I.10	L'expertise géotechnique :	11
I.11	Discipline de L'expertise géotechnique :	11
I.12	La différence entre L'expertise géotechnique et l'étude géotechnique :	11
II.	L'étude de sol :	14
II.1	Introduction.....	14
II.2	Les étapes de l'étude de sol :	14
II.3	Les paramètres principaux de ce sol :	15
II.4	Essai au laboratoire :	16
III.	Définition du projet d'expertise géotechnique dans la cité de 30 logements à Ain Salah.....	36
III.1	Généralités :	36
III.2	Description de l'ouvrage :.....	38
III.3	Caractéristique géotechnique du sol :.....	42
III.4	ESTIMATION DE TASSEMENT :.....	45
III.5	Conclusion :	46

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les ouvrages géotechniques peuvent effectivement faire partie intégrante d'une structure.

Les ouvrages géotechniques sont des éléments de construction spécifiquement conçus pour résoudre des problèmes géotechniques liés au sol et au sous-sol d'un site. Ils sont utilisés pour améliorer les caractéristiques du sol ou pour fournir un support stable à une structure.

Voici quelques exemples d'ouvrages géotechniques qui font partie intégrante d'une structure
Fondations, Soutènements, Pieux et micropieux, et Barrières anti-inondations

Ces exemples montrent comment les ouvrages géotechniques sont utilisés pour renforcer la stabilité et la sécurité des structures. Ils sont conçus en tenant compte des caractéristiques du sol et des contraintes géotechniques du site afin d'assurer la performance et la durabilité de la structure dans son environnement géologique.

Le comportement géotechnique des sols peut être complexe et difficile à modéliser de manière simple. Les sols sont des matériaux naturels hétérogènes et anisotropes, et leur comportement dépend de nombreux facteurs tels que leur composition, leur densité, leur humidité, leur structure et leur histoire de contrainte

Lorsque des ouvrages géotechniques sont conçus, il est essentiel de prendre en compte cette complexité pour garantir leur stabilité et leur performance. Les ingénieurs géotechniciens utilisent des méthodes d'analyse et de conception avancées basées sur des principes de mécanique des sols et de la géotechnique pour évaluer le comportement du sol et dimensionner les ouvrages en conséquence.

Cependant, en raison de la complexité inhérente du comportement des sols, il est souvent nécessaire de recourir à des modèles et des méthodes d'analyse plus avancés, tels que les méthodes numériques (comme la méthode des éléments finis) et les essais en laboratoire et sur le terrain, pour mieux comprendre et prédire le comportement des sols dans des situations spécifiques.

Il convient également de noter que la géotechnique est une discipline qui repose souvent sur l'expérience et l'expertise des ingénieurs géotechniciens, car chaque site et chaque projet présente des caractéristiques géotechniques uniques qui nécessitent une approche adaptée.

En résumé, la complexité du comportement géotechnique des sols nécessite une approche rigoureuse et une compréhension approfondie des principes de la géotechnique pour concevoir et réaliser des ouvrages géotechniques sûrs et fiables.

L'étude des sols est essentielle pour la réussite des projets de construction. Elle permet d'identifier les risques, de concevoir de manière appropriée, d'optimiser les coûts et de respecter les réglementations en vigueur. Investir dans une étude géotechnique de qualité peut aider à prévenir les problèmes coûteux et les risques associés, assurant ainsi la durabilité et la sécurité des ouvrages.

Il est louable de réaliser une étude de sol pour **un projet d'expertise géotechnique dans la cité de 30 logements à Ain Salah, Tamanrasset, en Algérie**. Une étude géotechnique approfondie vous

permettra d'obtenir des informations précieuses sur les caractéristiques du sol dans la région spécifique du projet. Voici quelques étapes que vous pouvez suivre pour mener à bien cette étude de sol

Collecte des données existantes, Reconnaissance du site, Forages et prélèvements d'échantillons essais géotechniques en laboratoire, Analyse et interprétation des données, Rédaction du rapport d'étude géotechnique.

Ce mémoire a été divisé en trois chapitres :

Tout d'abord une introduction générale.

- Le premier chapitre : Généralités sur la mécanique de sol.
- Le deuxième chapitre : Essai au laboratoire d'une étude de sol.
- Le troisième chapitre : la définition du projet d'expertise géotechnique dans la cité de 30 logements à Ain Salah, Tamanrasset.

En dernier, on présente les conclusions générales.

CHAPITRE I

Généralité sur le génie civil

I. Généralité sur le génie civil

I.1 Le génie civil

Le **génie civil** est une branche de l'ingénierie qui se concentre sur la conception, la construction et la maintenance des infrastructures physiques et naturelles qui sont essentielles pour la vie en société. Cela comprend la construction de routes, de ponts, de barrages, de tunnels, de canaux, de ports, d'aéroports, de bâtiments, de systèmes d'approvisionnement en eau et d'assainissement, de systèmes de transport en commun, de structures côtières, de systèmes de gestion des déchets, et plus encore. [7]

Le travail des ingénieurs civils implique souvent la conception de structures qui doivent résister à des forces importantes, comme les forces de la nature, les forces de la gravité ou les forces du vent. Les ingénieurs civils doivent également s'assurer que leurs conceptions respectent les normes de sécurité et les réglementations gouvernementales. [7]

Le **génie civil** est un domaine très important pour le développement économique et social, car les infrastructures qu'il construit sont essentielles pour la croissance économique, le développement des communautés, la protection de l'environnement et la qualité de vie des gens. [7]

Le **génie civil** est un domaine très vaste qui se divise en plusieurs sous-domaines, chacun avec ses propres spécialisations et applications pratiques. Voici quelques-uns des principaux domaines du génie civil :

Génie des structures : se concentre sur la conception et la construction de structures telles que les ponts, les bâtiments, les tours, les stades et les tours de transmission. [7]

Génie géotechnique : se concentre sur les caractéristiques et les comportements des sols et des roches, et sur la manière de les utiliser pour construire des fondations solides et durables pour les structures. [07]

Génie hydraulique : se concentre sur la conception et la construction de barrages, de canaux, de réservoirs, de stations de traitement de l'eau et d'autres systèmes hydrauliques pour la gestion de l'eau.

Génie des transports : se concentre sur la conception et la construction de routes, de ponts, de tunnels, de voies ferrées, de ports et d'aéroports pour assurer la circulation des personnes et des marchandises. [7]

Génie de l'environnement : se concentre sur la conception et la construction de systèmes de gestion des déchets, de systèmes d'assainissement, de systèmes de traitement de l'eau et d'autres systèmes pour protéger l'environnement. [7]

Génie de la construction : se concentre sur la planification et la gestion de la construction de projets de génie civil, y compris l'estimation des coûts, la gestion des ressources humaines et la coordination des travaux de construction. [7]

Ces sous-domaines du génie civil sont souvent interdépendants, et les ingénieurs civils peuvent travailler sur des projets qui impliquent plusieurs domaines. Dans notre cas, nous aborderons l'ingénierie des sols.

I.1.1 La géotechnique

La géotechnique : est l'ensemble des activités liées aux applications de la mécanique des sols, de la mécanique des roches et de la géologie de l'ingénieur. [2]

I.1.2 Terrain

Sol, roche ou remblai en place avant l'exécution des travaux de construction. [2]

I.1.3 Les sols

Sont des agrégats minéraux qui peuvent se désagréger en éléments de dimensions plus ou moins grandes sans nécessiter un effort considérable. Ils résultent de l'altération chimique (oxydation, ...), physique (variation de température, gel, ...) ou mécanique (érosions, vagues, ...) des roches. [2]

I.1.4 Les roches : (silice, calcaire, feldspath, ...)

Sont des matériaux durs qui ne peuvent être fragmentés qu'aux prix de gros efforts mécaniques.

I.2 La mécanique des sols

La mécanique des sols est l'application des lois mécaniques et hydrauliques au matériau sol. Comparé aux nombreux autres matériaux étudiés en mécanique, les bétons, les aciers, les plastiques, le bois..., le sol présente deux originalités. [2]

C'est tout d'abord un milieu discontinu qu'il faudra donc étudié à la fois dans sa globalité et dans sa composition élémentaire. D'autre part, c'est un matériau Tri phasique formé de grains solides, d'eau et d'air. Les phases non- solides jouent un rôle fondamental. [10]

I.3 La mécanique des roches

La mécanique des roches est la science qui étudie et modélise le comportement des roches et qui appliquent les lois et les principes de la mécanique et de l'hydraulique au terrain considéré comme matériau d'ingénierie. [5]

I.4 La géologie de l'ingénieur

Appelée aussi dans un sens restrictif géologie du génie civil, applique les principes et les méthodes des sciences minérales et connexes aux travaux de l'ingénieur. Ce dernier ne peut en effet négliger ni les caractéristiques des sols, des roches, de massifs rocheux et des eaux souterraines, ni le rôle éventuel des processus géologiques en action ou potentiels. [5]

I.5 L'Objet de la mécanique des sols

La mécanique des sols est une discipline faisant partie des techniques de génie civil qui a pour objet l'étude des matériaux constitués de particules solides, liquides, et gazeuses qui forment les terrains meubles, et ce en préambule au calcul de fondations pour la construction de bâtiment ou tout autre

ouvrage de génie civil (pont, route, tunnel, barrage,...). La mécanique des sols (et des roches) est la science qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques qui permettent :

- ✓ D'identifier les caractéristiques qui régissent le comportement mécanique du sol.
- ✓ L'analyse de l'interaction sol-structure
- ✓ La réalisation correcte des ouvrages enterrés.

À titre indicatif, la mécanique des sols traite les problèmes relatifs aux fondations diverses, ouvrages de soutènement, remblais et structures en terre, stabilité des pentes et talus, route, piste d'atterrissage, tunnels, mines. [2]

I.6 Histoire de la mécanique des sols

La mécanique des sols moderne est née pendant les années 1910 à 1930, en grande partie à la suite des travaux de Terzaghi (Bjerrum, Casagrande, Peck et Skempton, 1960) et de Fellenius ainsi que des collègues de celui-ci en Suède (Bjerrum et Flodin, 1960). Le terme de mécanique des sols a été utilisé d'une façon générale après une série d'articles publiés par Terzaghi dans l'Engineering News Record (Terzaghi, 1925). On peut suivre l'évolution de la mécanique. Des sols à travers son apparition autant qu'une science à part entière et le développement de ses grandes théories (voir le tableau ci-contre). [2]

Tableau I-1:La mécanique des sols à travers ses grandes théories. [2]

Siècle	Auteur	Théorie
18ème	Coulomb	Résistance au cisaillement.
19ème	Collin	Rupture dans les talus d'argile.
	Darcy	Ecoulement de l'eau à l'intérieur du sable
	Rankine	Pression des terres sur les murs de soutènement
	Gregory	Drainage horizontal, remblai compacte avec contrefort pour stabiliser la pente des tranchées de voies ferrées
20ème	Atterberg	Limites de consistance de l'argile
	Terzaghi	Premier manuel moderne de mécanique des sols
	Casagrande	Essais sur la limite de liquidité

I.7 Domaine d'application

La géotechnique est une discipline que l'on peut intégrer dans le génie civil au sens large, elle étudie les caractéristiques des terrains (sol et roche) en vue de leur utilisation dans divers domaines, savoir, le métier du bâtiment et des travaux publics, comme matériaux de construction ou support d'assise. [2]

Les sols peuvent :

- ✓ Supporter les ouvrages : fondations superficielles, fondations profondes, ...etc.

- ✓ Etre supportés : murs de soutènement, rideaux de palplanches, ... etc.
- ✓ Constituer l'ouvrage lui-même : remblais, digues, barrages en terre, ... etc.

On peut citer par exemple :

- Les fondations des bâtiments, des ouvrages d'art, des ensembles industriels ...
- Les ouvrages de soutènement (murs, rideaux de palplanches, ...),
- Les tunnels et travaux souterrains dans les sols,
- Les barrages et digues en terre,
- La stabilité des pentes naturelles et des talus et les travaux de stabilisation,
- Les ouvrages portuaires et maritimes (fondations de quais, ...),
- Les terrassements des routes, autoroutes, voies ferrées,
- L'amélioration et le renforcement des sols, □ La protection de l'environnement.



Figure I-1: Exemple -1- des constructions géotechniques. [2]



Figure I-2: Exemple -2- des constructions géotechniques. [2]

I.8 Le sol et la construction

A la différence des autres matériaux du génie civil et du bâtiment, les sols et les roches préexistent sur le site des travaux, et la première phase de toute étude géotechnique consiste à définir la nature et l'état de ces terrains.

Les ouvrages utilisent le sol autant qu'un élément de l'infrastructure qui transmet la charge globale de l'ouvrage vers une couche du sol suffisamment stable et résistante. Selon le type de l'ouvrage et son mode de conception, le sol peut constituer une base d'appuis pour l'ensemble de l'ouvrage tel que la route, le tunnel, le barrage poids, ou un point d'appuis pour quelques éléments seulement tels que le bâtiment, le pont, le barrage en arc.

On peut dire alors que pour faire un ouvrage, il faut d'abord étudier le sol qui tient l'ouvrage, c'est-à-dire étudier les comportements de ce sol.

Et comme mentionné précédemment, la relation entre le sol et la construction est étroite car le sol est une base de support pour la structure et pour cela il doit pouvoir supporter le poids de la structure. Le choix du type de fondation, qui est la partie de la structure qui transfère la charge du bâtiment au sol, dépend de la capacité portante du sol et des caractéristiques de construction, il est donc important d'effectuer une analyse du sol avant de construire la structure. Cette analyse permet de déterminer la capacité portante du sol, la présence de strates de sol instables, et la présence de niveaux d'eau, entre autres. En fonction des résultats de cette analyse, le type de fondation le plus approprié peut être choisi. Après l'achèvement du projet de construction de la structure, des problèmes de sol et des perturbations peuvent survenir.

Par exemple, nous mentionnons certains problèmes de revêtement de sol les plus courants dans la construction :

I.8.1 Les problèmes courants liés au sol

Glissement de terrain : si l'ouvrage est construit sur une pente ou à proximité d'une pente, un glissement de terrain peut se produire, ce qui peut causer des dommages graves à la structure et même mettre en danger la vie des occupants. [9]

Affaissement du sol : si le sol sous l'ouvrage n'est pas assez solide, il peut s'affaisser, ce qui peut causer des dommages aux fondations et aux structures. [9]

Érosion : si l'ouvrage est construit sur un sol qui est facilement érodé, cela peut entraîner des problèmes de stabilité à long terme. [9]

Inondation : si l'ouvrage est construit dans une zone inondable, il peut être sujet à des inondations, ce qui peut causer des dommages importants. [9]

Tassement : le tassement se produit lorsque le sol sous l'ouvrage s'affaisse et que le bâtiments' enfonce de manière inégale. Cela peut entraîner des fissures dans les murs, des portes qui ne se ferment plus correctement et d'autres problèmes structurels. [9]

Il est important de s'assurer que les sols sont correctement évalués et préparés avant la construction, et que les mesures appropriées sont prises pour éviter ces problèmes. Si des problèmes de sol surviennent après la construction, il est important de les traiter rapidement pour éviter des dommages plus importants à l'ouvrage et à ses occupants.

I.9 Les pathologies rencontrées sur les bâtiments

Nous rencontrons au cours de nos visites, de nos voyages, en milieu urbain ou en milieu rural, quelques désordres sur des bâtiments, des ouvrages anciens ou plus récents.

Il est important de traiter et de savoir traiter toutes ces pathologies afin d'éviter la ruine complète du bâtiment ou de l'ouvrage.

On peut citer par exemple

Tableau I-2: La mécanique des sols à travers ses grandes théories [8]

Exemple (photo)	Le Pathologie :	Les Causes (probables):
	<p>Désolidarisation d'un mur de refend avec un mur Périphérique.</p>	<p>Tassement différentiel des fondations.</p>
	<p>Fissure d'angle.</p>	<p>Ce tassement résulte de la combinaison du poids Considérable de la structure et des réactions du sol en fonction de l'alternance des périodes humides, des sécheresses et du gel</p>
	<p>Fissures en moustache.</p>	<p>Tassement du mur qui se fissure à l'endroit le plus Vulnérable (poinçonnement au niveau des appuis).</p>
	<p>Fissuration importante de l'angle du mur de Soubassement.</p>	<p>Dans ce cas, absence de raidisseur vertical. Il n'y a donc pas de liaisonnement entre le poteau et le chaînage. Le bâtiment résiste mal aux mouvements et au tassement différentiel du sol.</p>

I.10 L'expertise géotechnique

L'expertise géotechnique consiste à réaliser des études de sol et de roche en utilisant des méthodes géophysiques, géochimiques et géologiques pour caractériser la composition, la structure et les propriétés des matériaux. Ces études permettent de déterminer les risques potentiels associés à la construction ou à l'exploitation d'une structure, ainsi que les mesures de sécurité et les techniques de construction à utiliser. L'expertise géotechnique est donc un domaine important du génie civil et de la géologie, car elle aide à assurer la sécurité des structures et à minimiser les risques de défaillance ou d'accident. Les experts géotechniciens travaillent en étroite collaboration avec les ingénieurs, les architectes et les autres professionnels de la construction pour garantir que les projets sont construits de manière sûre et efficace.

I.11 Discipline de L'expertise géotechnique

L'expertise géotechnique est une discipline qui concerne l'étude des sols et des roches afin de comprendre leur comportement mécanique et leur réaction à des contraintes et des charges. Cette expertise est essentielle dans de nombreux domaines, tels que la construction de bâtiments, de ponts et d'infrastructures, l'exploitation minière, la recherche pétrolière et gazière, l'agriculture et la protection de l'environnement.

I.12 La différence entre L'expertise géotechnique et l'étude géotechnique

L'expertise géotechnique et l'étude géotechnique sont deux concepts différents, bien qu'ils soient étroitement liés.

L'étude géotechnique est une étape préliminaire essentielle dans la conception et la construction de toute infrastructure ou ouvrage de génie civil. Elle consiste à collecter des données sur les propriétés et les caractéristiques du sol ou de la roche dans une zone spécifique. Cette étude est réalisée par des professionnels de l'ingénierie géotechnique et peut inclure des forages, des essais en laboratoire, des analyses géophysiques et géologiques, ainsi que des modélisations numériques pour évaluer la stabilité du sol ou de la roche dans la zone étudiée.

L'expertise géotechnique, consiste en une ré-étude du terrain du projet afin de déterminer les causes des problèmes rencontrés, qui a pour but de fournir une évaluation précise des risques géotechniques associés à un projet spécifique. Cette expertise peut inclure une analyse des risques de glissement de terrain, d'affaissement du sol, de liquéfaction du sol, ou de tout autre phénomène géotechnique potentiellement dangereux.

En d'autres termes, l'étude géotechnique est une étape préliminaire nécessaire pour comprendre les propriétés et les caractéristiques du sol ou de la roche dans une zone donnée, tandis que l'expertise géotechnique est une analyse plus approfondie et spécialisée qui vise à évaluer les risques spécifiques liés à un projet de construction ou d'infrastructure. Les deux étapes sont importantes pour garantir la sécurité et la stabilité des structures à construire et pour minimiser les risques de défaillance ou d'accident

Les essais de l'expertise géotechnique sont des tests pratiqués sur des échantillons de sol afin d'en déterminer les caractéristiques.

- Essai de pénétration statique : cet essai consiste à enfoncer une pointe ou un cône dans le sol pour mesurer la résistance de celui-ci à la pénétration. Cette mesure permet d'évaluer la densité et la compacité du sol.
- Essai de perméabilité : cet essai consiste à mesurer la vitesse à laquelle l'eau s'infiltré dans le sol. Cette mesure permet de déterminer la capacité du sol à laisser passer l'eau, ce qui est important pour la conception de fondations.
- Essai de cisaillement direct : cet essai permet de mesurer la résistance du sol à la rupture. Il est effectué en appliquant une charge sur un échantillon de sol et en mesurant la force nécessaire pour le rompre.
- Essai de compactage : cet essai permet de déterminer la densité maximale qu'un sol peut atteindre en fonction de la teneur en eau. Cette mesure est importante pour évaluer la qualité des remblais et des terrassements.
- Essai de charge axiale : cet essai consiste à appliquer une charge verticale sur une fondation ou un pieu pour évaluer la capacité portante du sol.
- Essai de pressiomètre : cet essai permet de mesurer la déformation du sol sous une charge et d'en déduire les paramètres de résistance du sol.
- Essai au laboratoire : cet essai consiste à prélever un échantillon de sol pour effectuer des tests en laboratoire, tels que la granulométrie, l'analyse minéralogique ou la résistance à la compression.
- Essai de résistance en pointe : cet essai consiste à enfoncer une pointe dans le sol pour mesurer la résistance de celui-ci à la pénétration.
- Essai de dilatomètre : cet essai permet de mesurer les variations de volume du sol sous une charge.
- Essai de sonde à prosimètre : cet essai permet de mesurer la résistance en déformation du sol en utilisant une sonde à prosimètre gonflable.

Ces essais sont pratiqués par des ingénieurs géotechniciens pour évaluer les caractéristiques du sol en vue de la conception de fondations solides et durables pour les infrastructures. Le choix des essais dépendra du type de projet et des caractéristiques du sol étudié.

CHAPITRE II

L'étude de sol

II. L'étude de sol

II.1 Introduction

Dans chaque étude de construction il faut faire une étude de sol, pour choisir le type de fondation et le type de ciment à utiliser. L'étude de sol a une grande importance dans notre domaine.

L'importance de l'étude des propriétés des sols doit s'imposer à l'esprit de celui qui est responsable de la conception ou de la construction d'un ouvrage quelconque impliquant l'utilisation de sols. Cette étude nécessitera généralement beaucoup plus d'efforts et de temps de la part de l'ingénieur et du technicien que ceux-ci devront en consacrer à l'étude des autres matériaux habituellement employés en génie civil, tels que l'acier et le béton.

L'étude de sol est une étape essentielle dans tout projet de construction, car elle permet de déterminer le type de fondation et le type de ciment adaptés au terrain. L'étude de sol a une grande importance dans notre domaine, car elle permet d'évaluer les propriétés des sols et leur comportement sous les charges. L'étude de sol nécessite souvent plus d'efforts et de temps que l'étude des autres matériaux utilisés en génie civil, comme l'acier et le béton.

Enfin, afin de réaliser l'étude géotechniques du sol, et d'établir le rapport de ce projet, nous vous présentons les étapes de l'étude de sol.

II.2 Les étapes de l'étude de sol

Ces étapes concernent le laboratoire de mécanique des sols qui doit procéder à un certain nombre d'investigations lui permettant d'établir un rapport d'étude de sol du site du projet et comportant les informations nécessaires pour le dimensionnement des fondations supportant l'ouvrage envisagé, à savoir : [13]

- La nature et la disposition des différentes couches constituant le sol de fondation
- La variation du niveau de l'eau souterraine entre la saison hivernale et estivale (si celle-ci existe)
- L'identification physico-chimique et mécanique du sol en question,
- La détermination du niveau du bon sol
- La détermination de la capacité portante du sol
- Le comportement du sol vis-à-vis des charges et vis-à-vis de l'eau

Le rapport de l'étude de sol doit être terminé par une série de recommandations proposant par Exemple :

- ✓ Le type de fondations qui conviendra le mieux,
- ✓ Le type de liant à utiliser pour les fondations,
- ✓ La profondeur des fouilles, etc...

Toutes ces données permettront à l'ingénieur chargé de dimensionner les fondations et de prendre toutes les dispositions possibles pour la bonne tenue de l'ouvrage.

Par conséquent, afin d'étudier le sol, les paramètres principaux de ce sol doivent être déterminés.

II.3 Les paramètres principaux de ce sol :



Figure II-1: Caractéristique et paramètre de sol[1]

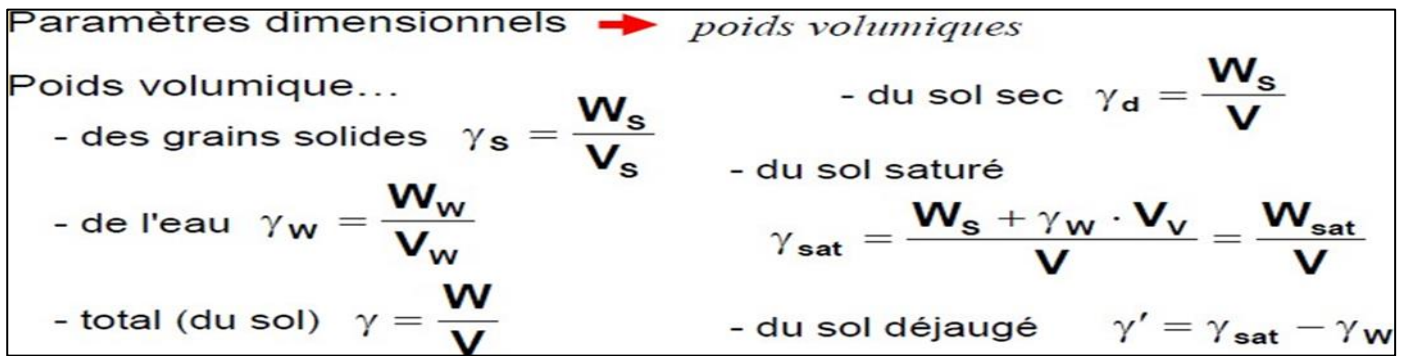


Figure II-2: Paramètre dimensionnel[1]

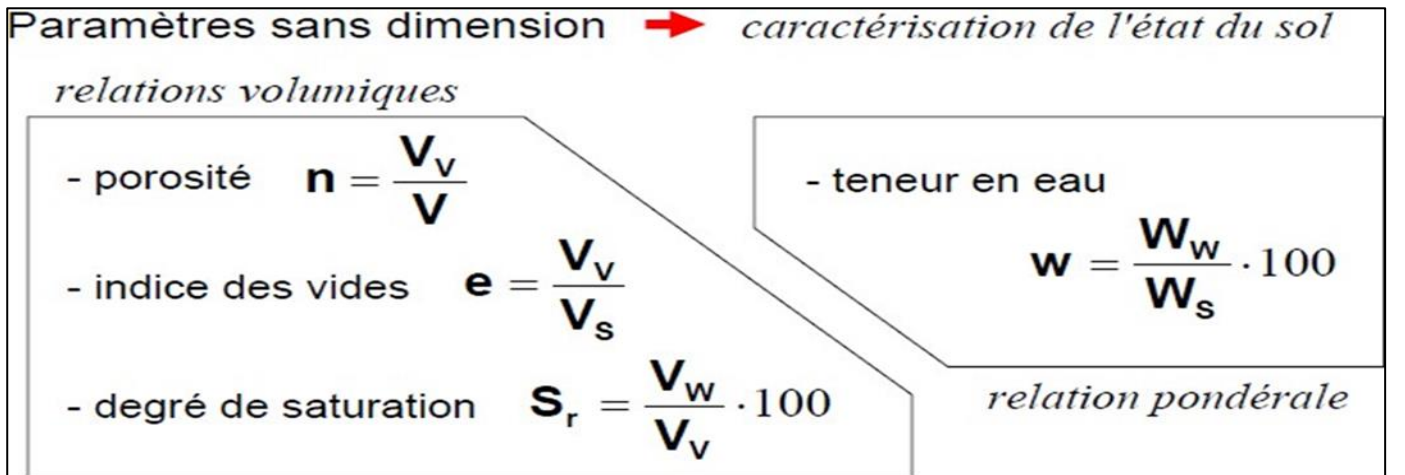


Figure II-3: Paramètre sans dimension [1]

II.4 Essai au laboratoire

Les essais de laboratoire ont pour but de déterminer les paramètres physique et mécanique du sol en vue d'estimer son état naturel. Les échantillons prélevés à partir (puits de reconnaissance, sondage carotté ...) ont été acheminés au laboratoire en vue de subir les essais suivants :

- ✓ Essai d'identification.
- ✓ Essai de mécanique de sol.
- ✓ Essai chimique.

II.4.1 Essai d'identification

Il est habituel de caractériser les sols à l'aide d'essais relativement simples. Ils nous permettent de déterminer la nature du sol, sa structure et ses propriétés physico-chimiques, Ces essais sont [4] :

1. La masses volumique (apparent/absolue).
2. La tenure en eau.
3. La densité.
4. L'analyse granulométriques.
5. Limites d'Atterberg.
6. Bleu de méthylène.
7. L'équivalent de sable «ES ».

II.4.1.1 La masse volumique

La masse volumique d'un matériau est la masse de l'unité de son volume, soit le volume apparent ou le volume absolu, on distingue alors la masse volumique absolue et la masse volumique apparente. [08]

a. La masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. [8]

La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté. [8]

C'est la masse M de l'unité du volume apparent V_{app} du matériau, c.-à-d. le volume de la matière qui constitue le matériau y compris le volume de vide qu'elle contient : [8]

- Principe de l'essai

Il suffit de remplir un récipient, dont on connaît le volume, en prenant de grandes précautions pour éviter tous les phénomènes parasites que pouvait provoquer le tassement, en effet un tassement trop important ou trop faible donnerait des résultats erronés. Pour limiter ce risque

d'erreurs, l'essai se fera sur plusieurs pesées (généralement 5 pesées), avec lesquelles on fera la moyenne. On pèse l'échantillon en prenant le soin de déduire la masse du récipient. Enfin, la masse de l'échantillon est divisée par le volume du récipient. Le résultat final nous donne la valeur de la masse volumique apparente du matériau [10]

$$\rho = \frac{M}{V} \dots\dots\dots(\text{II-1}) [08]$$

ρ : Masse volumique apparente

M : est la masse du matériau étudié (t, kg, g)

V : Volume du récipient (m³, dm³, cm³)

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs la masse volumique apparente de quelques matériaux :

Tableau II-1: Masse volumique apparente de quelques matériaux (Cousent, 2005). [8]

Matériau	Masse volumique apparente (g/cm ³)
Gravier	1.70
Sable	1.70-1.90
Plâtre	1.00
Verre	2.50
Acier	7.85

b. La masse volumique absolue

La masse volumique absolue ρ_{abs} est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains [5]

La masse spécifique est la masse de granulats secs (M) rapportée au volume absolu (uniquement volume de solides) [2]

C'est la masse M de l'unité du volume absolu V_{abs} du matériau sans vide (seul le volume de la matière qui constitue le matériau est pris en compte) [2] :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_{\text{abs}}} \dots\dots\dots(\text{II-2}) [8]$$

II.4.1.2 La teneur en eau norme NFP 94-050 (Septembre 95)

Elle définit le rapport en pourcentage (%) du poids d'eau W_w que le sol contient, au poids W_s de ses éléments secs, on a [8]:

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \dots\dots\dots(\text{II-3}) [8]$$

Avec :

W_w : Poids de l'eau dans l'échantillon

W_s : Poids des grains solide dans l'échantillon.

La teneur en eau est le paramètre le plus important, sa variation modifie toutes les propriétés physiques du sol. Connaissant la valeur de la teneur en eau on peut avoir l'état dans lequel le sol se trouve, à titre d'exemple le tableau donne une classification adoptée.

▪ **Mode opératoire [11]**

1. Préparer un échantillon représentatif de telle façon que l'essai sera réalisé sur des échantillons dont les poids varient en fonction de la granulométrie (voir tableau en annexe).

2. peser l'échantillon, noter mh.

3. sécher l'échantillon dans une étuve, jusqu' au poids constant.

- à 105° C pour les matériaux insensibles à la chaleur.

- à 50°C pour les matériaux sensibles à la chaleur (débris organiques ou gypse).

4. Peser l'échantillon à nouveau, noter ms.

La teneur en eau est déterminée par la formule suivante :

$$W(\%) = \frac{\text{poids de l'eau}}{\text{poids du sol sec}} \times 100 \dots \dots \dots \text{(II-4) [11]}$$

Tableau II-2: Etat hydrique des sols selon leur teneur en eau. [8]

Teneur en eau %	Etat
01-25 %	Légèrement humide
25-50%	Humide
50-75%	Mouillé
75-90%	Détrempe
100%	Saturé

II.4.1.3 Les densités

L'essai de densité permet d'obtenir les caractéristiques physiques du sol sous plusieurs formes (densité sèche, densité humide, densité apparente et densité déjàugée).

a- La densité humide γ_h : C'est le poids volumique du sol à l'état humide [8]:

$$\gamma_h = W/V \dots \dots \dots \text{(II-5) [8]}$$

Avec :

W : poids de l'échantillon humide

V : volume total.

b- La densité sèche γ_d : C'est le poids volumique du sol à l'état sec [08]:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \dots \dots \dots (II-6) [08]$$

Avec :

WS : poids des grains solides

V : volume total.

Le tableau ci – après donne une classification du sol selon ces deux paramètres.

Tableau II-3: Classification des sols selon γ_h et γ_d [8]

Nature du Sol	γ_h	γ_d
Sable	17 à 20 KN/m ³	14 à 18 KN/m ³
Argile	16 à 22 KN/m ³	10 à 20 KN/m ³
Tourbe	13 à 17 KN/m ³	03 à 10 KN/m ³

II.4.1.4 L'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, ...) Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres ; cette analyse peut se faire aussi bien par **tamissage** que par **sédimentations** ; En fonction de la dimension et du nombre des grains.

Composant un granulat, on dénomme les granulats, fines, sables, gravillons ou Caillou.

Cependant, pour un granulat donné. [14]

En général, Les résultats sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique. Cette courbe contribue à l'identification du matériau et permet de prévoir certaines de ses propriétés. Elle est utilisée pour la classification des sols grenus, qui nécessite le calcul de deux coefficients :

Coefficient d'uniformité : Il est noté par C_u tel que [5]:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots \dots \dots (II-7)$$

Avec :

D_{60} est le diamètre du tamis qui laisse passer 60% de l'échantillon.

D_{10} est le diamètre du tamis qui laisse passer 10% de l'échantillon.

Coefficient de courbure : Il est noté par C_c tel que :

$$c = \frac{D_{60}^2}{D_{30} \times D_{10}} \dots \dots \dots (II - 8)$$

Avec :

D_{30} Est le diamètre du tamis qui laisse passer 30% de l'échantillon.

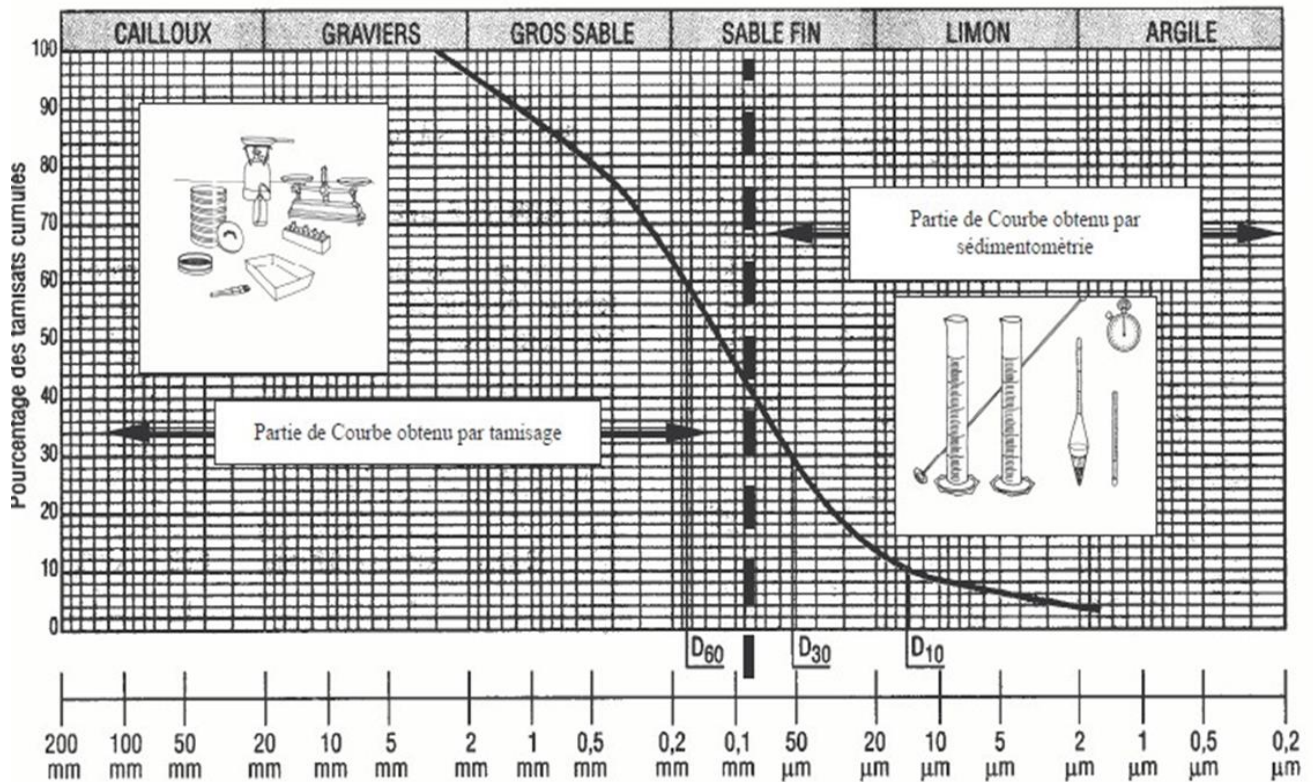


Figure II-4: courbe granulométrique [01]

a- L'analyse granulométrique par tamisage Norme NF P 94-056

Le sol en génie civil n'est pas servi homogène, il est constitué de grains de démentions différentes. Il est utile de connaître la distribution en pourcentage des différentes particules soit pour leur utilisation en teint que matériau de construction soit pour leur utilisation en teint que support de construction. [14]

L'analyse granulométrique par tamisage L'essai consiste à faire passer un échantillon repère sen tarif de sol à travers des tamis superposes dont l'ouverture vont en décroissant du haut vers le bas les particules les plus grosses sont donc retenue sur les tamis les plus hauts, tandis que les particules plus fines se dirigent vers les tamis inferieurs. [5]

Le but de l'essai granulométrique par tamisage est de connaître la répartition des différentes tailles : gravier, caillons, gros sable, sable fin, limon et argile. Le plus petit diamètre du matériau testé doit être supérieur à 80 miserons.

▪ Mode opératoire [10]

Le tamisage peut être effectué soit manuellement soit à l'aide d'un vibor-tamis.

1-Procéder à un quartage afin que l'échantillon soit représentatif, ensuite procéder à une prise d'essai conformément à la formule : $200D < P < 600D$, avec D : diamètre moyen estimé du plus gros grain.

2-Peser l'échantillon,

3-Imbiber l'échantillon dans un récipient,

4-Eliminer les fines par lavage continu (tamis 0.08 mm) jusqu'à ce qu'il ne reste que les éléments propres,

5-Sécher le matériau dans une étuve réglée à 105° C, pour les matériaux non gypseux, et 55 °C, pour les matériaux aux hautes températures.

6-Tamiser l'échantillon en versant ce dernier au sommet d'une série de tamis et en les agitant,

7-Recueillir le refus de chaque tamis et le peser dans une balance de portée pesant au g près,

8-Rapporter les poids des différents refus poids initiaux du matériau,

9-Calculer le pourcentage des tamisas,

10-Etablir la courbe granulométrique.

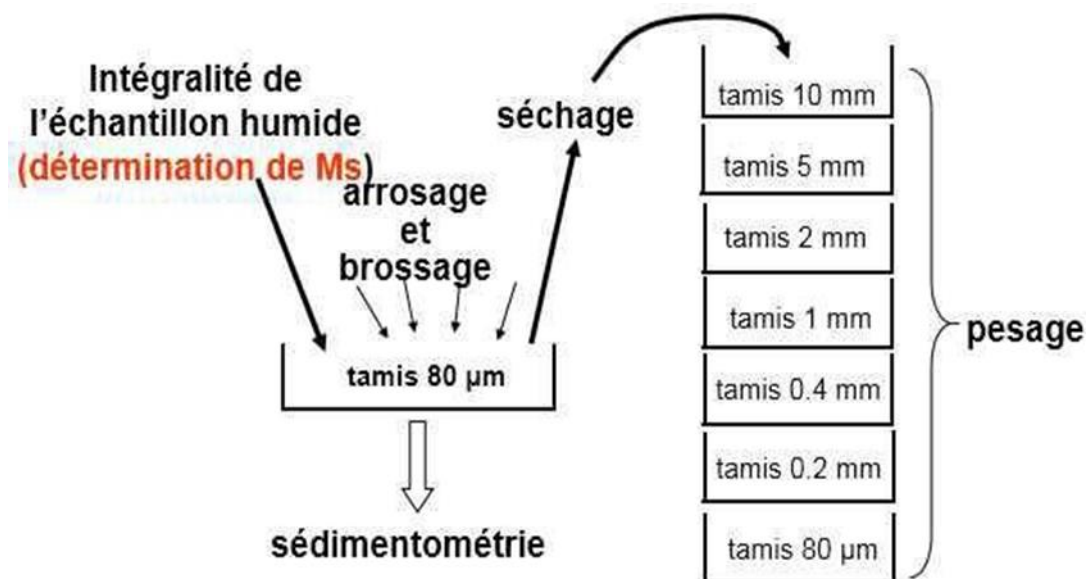


Figure II-5: Opération d'analyse granulométrique par tamisage [01]

b- Analyse granulométrique par sédimentation norme : NFP 94-057

L'Analyse granulométrique par sédimentation c'est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol (Norme NFP94-056) et qui peut être nécessaire à sa description et à sa classification. [10]

L'analyse granulométrique d'un sol par la méthode de sédimentation a pour objet de déterminer la distribution pondérale de la taille des particules d'un sol fin. [6]

Cet essai s'applique sur les particules passant au travers d'un tamis maille carré de 0.080 mm, cependant les particules d'une taille inférieure à 0.001 mm ne peuvent être différenciées, par cet essai.

▪ Mode opératoire [10]

1. Tamiser l'échantillon de sol par lavage (passant au tamis 0.08 mm), et récupérer le tamisât,
2. Sécher l'échantillon dans une étuve jusqu'au poids constant,
3. Préparer la prise d'essai de 80g+ 10g de tamisât sec,

4. Pilonner l'échantillon, et le tamiser au 0.08 mm, puis prendre 80g,
5. Imbiber la prise d'essai dans une éprouvette cylindrique en verre de 2 litre contenant un mélange d'eau distillée ou déminéralisée et une solution à 5% d'hexa métaphosphate de sodium ($\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
6. Laisser imbiber pendant au moins 15 heures à température ambiante,
7. Agiter vigoureusement la suspension au moyen d'un agitateur manuel,
8. Retirer l'agitateur manuel et déclencher au même instant le chronomètre (début de l'essai),
9. Plonger le thermomètre et le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre ;
10. 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 ;
11. Calculer le pourcentage des tamisas et compléter la courbe granulométrique.

II.4.1.5 Limite d'Atterberg norme NF P 94-051

En mécanique des sols, on distingue différentes classes de sols ; c'est ainsi, les sols pulvérulents sont les sables fins qui se présentent sous l'aspect de poudre. [2]

Les argiles par contre, se forment les pâtes dans lesquelles chaque grain est relié aux grains voisins par des forces de cohésions dues à la présence des couches absorbées.

On appelle cohésion, l'aptitude que possède le sol à maintenir ses grains reliés les uns aux autres. Les sols doués de cohésion sont appelés sols cohérents, on distingue le cas de l'argile. Les sols qui n'ont pas de cohésion ou qui ont très peu de cohésion entre les grains sont appelés grenus ou pulvérulents, on distingue le cas du sable. [2]

Le comportement des sols pulvérulents est quasi- indépendant de leur teneur en eau. Ce dernier, par contre, joue un rôle fondamental dans le comportement des sols cohérents. Les sols cohérents auront une consistance liquide si la teneur de l'eau est élevée, pâtes si la teneur de l'eau est modérée, et solide si la teneur de l'eau est très faible. [2]

- A l'état liquide, les grains de sol sont indépendants et ne se touchent pas. Leurs mouvements relatifs sont très aisés.
- A l'état plastique (pâtes) les grains sont rapprochés et ont mis en commun l'eau absorbée qui agit comme un sachet en plastique dans lequel les grains peuvent se mouvoir sans s'écarter.
- A l'état solide, les grains se sont encore plus près les uns des autres, ils arrivent même au contact en quelques points en chassant l'eau absorbée. Les frottements internes sont alors importants.

Par humidification (augmentation de la teneur de l'eau) ou par séchage (diminution de la teneur de l'eau) le sol cohérent passera d'un état de consistance à un autre de manière progressive. Néanmoins Atterberg,

ingénieur agronome suédois, a défini en 1911, des teneurs en eau limites qui séparent le passage du sol d'un état de consistance à un autre. Ces teneurs en eau particulière sont appelées limites de consistance ou **limites d'Atterberg**. [2]

Les limites d'Atterberg : sont des teneurs en eau pondérales, caractéristiques du sol. Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action des variations de la teneur en eau. Ces limites sont déterminées sur la fraction de sol passant au travers du tamis 400 μ m. On note:

a- La limite de liquidité (wl) : est une valeur de teneur en eau qui indique le passage du sol à l'état liquide, elle est obtenue théoriquement par une fermeture correspondant à N=25chocs.

b- La limite de plasticité (wp):teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide - le sol est durcit et se fissure.

c- Indice de plasticité (Ip): est une caractéristique du sol, indépendante de sa teneur en eau (cet indice définit l'étude du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité). [2]

$$I_p = W_L - W_P \dots\dots\dots(8)$$

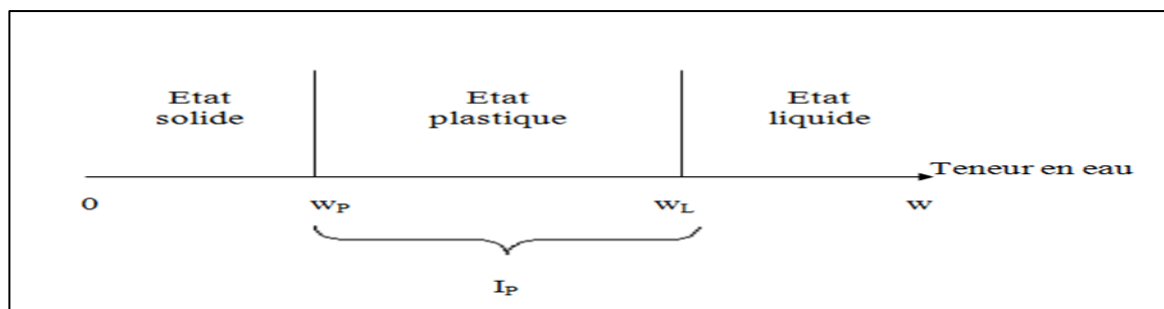


Figure II-6: Représentation des limites d'Atterberg. . [2]

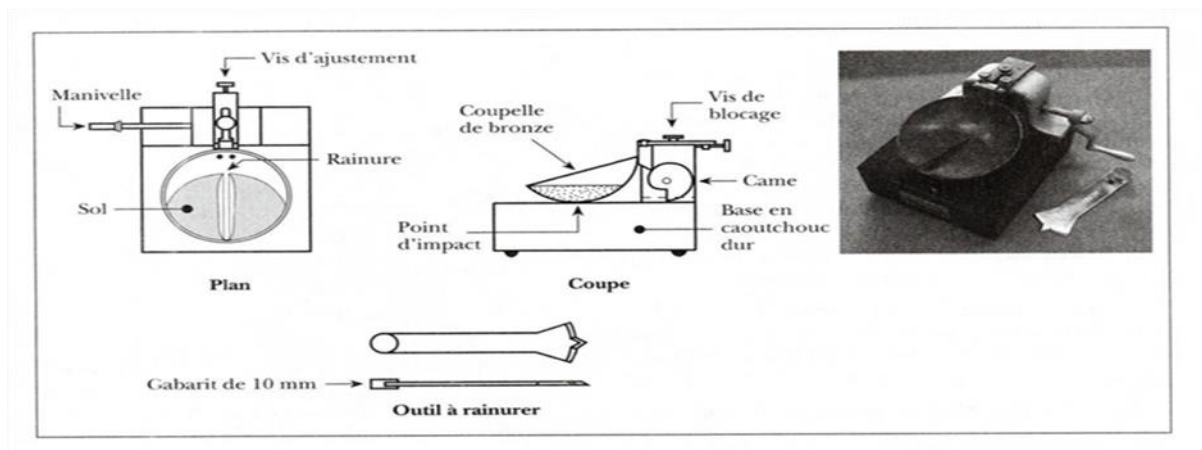


Figure II-7: Matériels utiliser dans l'essai de limite d Atterberg. [5]

Cet essai permet de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau. [2]

Cet essai se fait uniquement sur les éléments fins du sol et il consiste à faire varier la teneur en eau de l'élément en observant sa consistance. [2]

L'essai permet aussi de faire une classification du sol (notamment avec le classement du LCPC).

L'essai s'effectue en 2 phases

1) recherche de la teneur en eau W_L pour laquelle une rainure de dimension normalisée, pratiquée dans le sol disposé dans la coupelle de Casagrande, se ferme sous l'action de 25 chocs appliqués de manière normalisée.

2) Recherche de la teneur en eau W_P pour laquelle un cylindre de sol de diamètre 3 à 4mm, confectionné manuellement, se fissure lorsqu'on le soulève. [2]

▪ Mode opératoire [10]

1-Procéder à un quartage afin que l'échantillon soit représentatif.

2-Imbiber l'échantillon dans un récipient.

3-Tamiser l'échantillon au tamis de 0.40 mm (passant 0.40 mm), et récupérer le tamisassent.

4-Sécher le matériau dans une étuve réglée à 105 °C pour les sols non gypseux et à 55°C pour les sols gypseux.

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 fermeture de 1 cm des lèvres de la rainure après 25 chocs.

6-Prélever à l'aide d'une spatule deux échantillons des lèvres de la rainure dans des godets qu'on pèse puis les porters à l'étuve.

7-Calculer la limite de liquidité.

8-Limite de plasticité p :

A partir d'une boulette qu'on roule, sur un marbre, à la main, en forme un rouleau aminci jusqu'à 3mm de diamètre sur une longueur de 10 à 15 cm.

La limite de plasticité est atteinte lorsque le rouleau soulevé par le milieu de 1 à 2 cm se fissure.

-prélever les échantillons qu'on pèse puis on les porte à l'étuve

-Peser les échantillons après séchage

-Déterminer la limite de plasticité $W_p = W / 3$

-Calculer l'indice de plasticité : $IP = W_L - W_p$

II.4.1.6 Essais au Bleu De Méthylène norme NF P 94-068

La valeur de bleu « V_B » est la masse de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir d'une couche mono moléculaire de ce colorant la surface de toutes les particules de sol incluses dans une masse de 100 grammes du sol étudié.

Essais au Bleu De Méthylène permet de mesurer la capacité des éléments fins à absorber du bleu de méthylène. Cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments. (Le bleu de méthylène étant absorbé préférentiellement par les argiles, les matière organiques et hydroxydes de fer).

[15]

Cet essai est applicable pour tous les sols ainsi pour certains matériaux rocheux. On utilise cet essai en Géotechnique pour déterminer l'argilosité d'un sol.

La surface spécifique totale de la prise d'essai est donnée par : $SST (m^2/g) = 20,93 \times vbs$

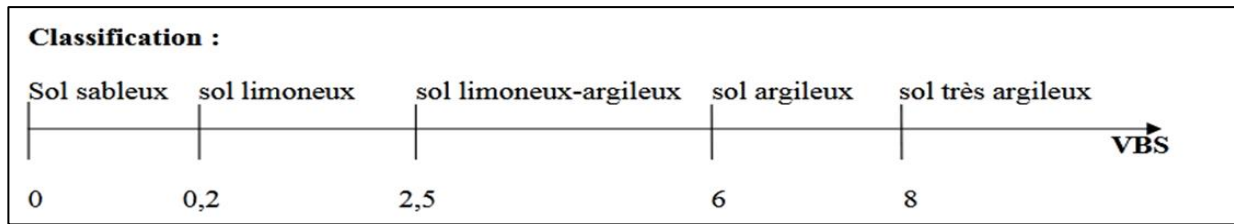


Figure II-8: Classification des sols par la valeur au bleu méthylène [2]

▪ **Mode opératoire : [11]**

La prise d'essai étant mise en suspension comme décrit précédemment, procéder au dosage de bleu de méthylène comme indiqué ci-après.

Pendant toute la durée du dosage, l'agitation permanente (vitesse 400 tr/min \pm 100 tr/min) doit être telle que toutes les particules de sol en suspension soient mises en mouvement.

À l'aide du dispositif de dosage, introduire dans la suspension 5 cm³ à 10 cm³ de solution de bleu selon l'argilosité estimée du matériau (10 cm³ pour les matériaux les plus argileux) ; au bout de 1 min \pm 10 s, procéder à l'essai de la tache sur papier filtre de la manière suivante :

- Poser le papier filtre sur un support adapté non absorbant ;
- Prélever à l'aide de la baguette de verre une goutte de suspension et la déposer sur le papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau coloré bleu sombre entouré d'une zone humide incolore ;
- La goutte prélevée doit former un dépôt central compris entre 8 mm et 12 mm de diamètre.

Procéder à des injections successives par pas de 5 cm³ à 10 cm³ (selon l'argilosité du matériau) de solution de bleu jusqu'à ce qu'apparaisse une auréole périphérique bleu clair, de largeur millimétrique, dans la zone humide de la tâche. L'essai est dit alors positif. À partir de ce moment, laisser se poursuivre l'adsorption du bleu dans la solution et effectuer des taches, de minute en minute, sans ajout de solution. Si l'essai redevient négatif à la cinquième tache ou avant, procéder à de nouvelles injections de bleu avec des pas de 2 cm³ à 5 cm³, selon l'argilosité du matériau, en lieu et place des pas de 5 cm³ à 10 cm³ introduits précédemment. En effet, il est nécessaire de réduire les quantités injectées, car à ce stade de l'essai la suspension est en voie de saturation.

Chaque addition est suivie des taches effectuées de minute en minute. Ces opérations sont renouvelées jusqu'à ce que l'essai reste positif pour cinq taches consécutives. Le dosage est alors terminé et l'on détermine le volume total (V) de la solution de bleu qui a été nécessaire pour atteindre l'adsorption totale.

Dans tous les cas, le volume V doit être supérieur à 10 cm^3 . Si le volume V est inférieur à 10 cm^3 , l'essai doit être recommencé avec une prise d'essai de masse supérieure.

Le récipient et les accessoires en contact avec la suspension de sol et de bleu sont lavés et abondamment rincés à l'eau claire.

Si en vidant le récipient sur le tamis de $80 \mu\text{m}$, on observe des agglomérats de particules non colorés on recommencera l'essai avec la troisième prise d'essai en augmentant la durée de mise en suspension du sol ou en adoptant toute disposition permettant de minimiser la formation de ces agglomérats (exemple : séchage à $50 \text{ }^\circ\text{C}$ maximum, émiettement manuel, puis imbibition de durée suffisante pour favoriser le délitage des éléments argileux).

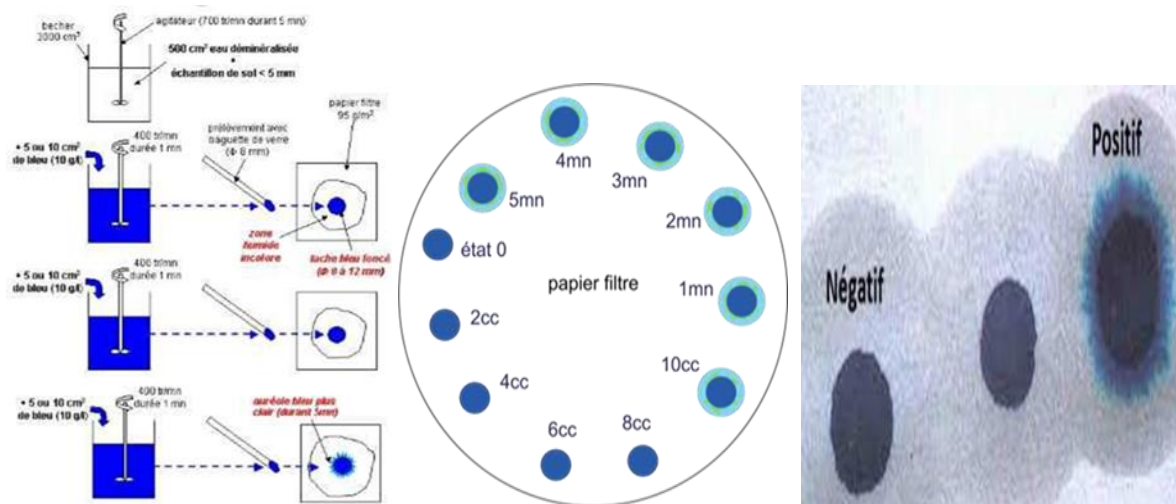


Figure II-9: Essai au bleu méthylène[14]

II.4.1.7 L'équivalent de sable «ES » norme NFP 18-598

L'essai d'équivalent de sable est un essai simple, est destiné à déterminer selon un mode opératoire précis la proportion relative d'éléments fins flocculés dans la fraction d'éléments de dimensions inférieures à 5 mm d'un sol granulaire fin. [3]

L'équivalent de sable «ES » est le rapport en % de la hauteur de sable sédimenté à la hauteur totale du sable et du flocculat. [3]

On doit indiquer la méthode de lecture de la hauteur du sable (visuelle ou au piston).

Cet essai, extrêmement sensible à la présence d'éléments fins, traduit le fait que le comportement et la perméabilité d'un sol granulaire sont très influencés par un pourcentage, même faible, de fines. [3]

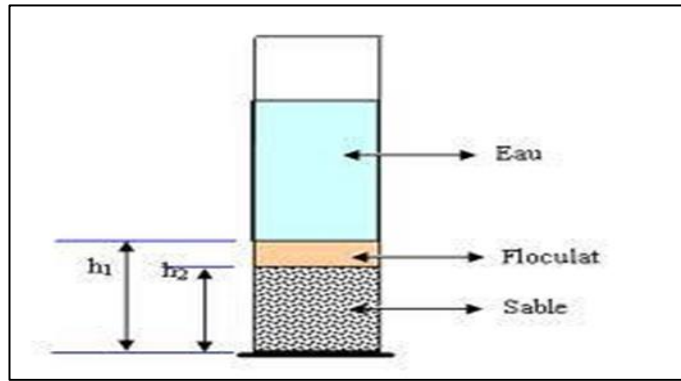


Figure II-10: Essai d'équivalent sable [17]

▪ **Mode opératoire [10]**

- 1- Procéder à un quartage afin que l'échantillon soit représentatif.
- 2- Tamiser l'échantillon au tamis de 5 mm (passant).
- 3- Verser une prise d'essai de 120 + 1 g dans chacune des deux éprouvettes contenant une solution lavante et les laisser au repos 10mn.
- 4- Boucher l'éprouvette puis la fixer sur le dispositif d'agitation se sorte qu'elle subisse 90 cycles + 1 cycle en 30 s+ 1 s.
- 5- Laver le mélange jusqu' à ce que le niveau atteigne le deuxième trait (repère).
- 6- Laisser reposer pendant 20mn +10 s.
- 7- Procéder aux mesures à l'aide d'une règle la hauteur h1 du niveau supérieur du floculat ; et à l'aide d'un piston descendu jusqu' à ce qu'il repose sur le sédiment h2.

L'équivalent de sable est donné par la formule : $ES = (h2/h1) \times 100 \dots \dots \dots (II-8)$

Tableau II-4: Qualité de sable selon le « Es ». [16]

ESV (%)	ES (%)	Qualité de Sale
ESV <65	ES <60	Sable argileux : risque de gonflement à rejeter pour des bétons de qualités.
$65 \leq ESV < 75$	$60 \leq ES < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 \leq ESV < 85$	$65 \leq ES \leq 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileux convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$ESV \geq 85$	$ES > 80$	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuse risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

II.4.2 Les essais de mécanique de sol

Les essais de résistance mécanique ont pour objet de déterminer la résistance des sols au cisaillement les essais les plus utilisés sont : [4]

- c- L'essai de cisaillement rectiligne à la boîte de Casa grande.
- d- L'essai de compressibilité essai œdométrique.

II.4.2.1 Essai cisaillement a la boîte norme NF P 94-071-1

Dans toute étude géotechnique, on doit déterminer les caractéristiques de cisaillement (c , ϕ) qui permettant de calculer le coefficient de sécurité pour la stabilité de terrain étudié ces caractéristiques peuvent être déduire des essais suivants : [15]

- ❖ Pour les calculs à court terme, on utilise les essais de type UU ou CU (essai non drainé) qui nous donne les valeurs C_u et ϕ_u ;
- ❖ Pour les calculs à long terme, on utilise les essais de type CD (essai drainé) qui nous donne les valeurs C' et ϕ'

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans un bâti de cisaillement constitué de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. [15]

L'essai consiste à :

- Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical(N) maintenu constante durant la durée de l'essai ($\sigma=N/s$).
- Produire, après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (N), un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontale de glissement des deux demi-bottes l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif σ_1 à vitesse constante.
- Mesurer l'effort (T) correspondant ($\tau =T/s$).



Figure II-11: Appareil de cisaillement [17]

▪ Mode opératoire : [10]

Découpage des éprouvettes soumises à l'essai.

Il s'agit d'obtenir des parallélépipèdes rectangles ou des cylindres s'ajustant parfaitement dans les 2 demi-bottes.

Dresser les 2 faces du cylindre planes et parallèles, la hauteur du cylindre étant ramenée à 4 cm environ.

A l'aide du calibre, tracer le contour 6x6 ensuite dresser les 4 faces latérales bien perpendiculaires aux 2 faces horizontales.

Pour les sols limoneux ou limoneux sableux, éviter l'épauffrement de coins par une taille méticuleuse.

Mise en place de boîte sur la machine de cisaillement.

1. placer l'étrier de charge sur le piston de la boîte. Placer le comparateur vertical et le mettre à zéro.
2. Monter l'anneau dynamométrique sur la machine, le relier à la boîte et compenser les jeux en mettant l'anneau légèrement en traction et ramenant lentement le comparateur de l'anneau à zéro.
3. Appliquer sur l'éprouvette, la charge désirée, les pressions normales peuvent être les suivants :
 - Sol pulvérulent : 1-2-3 bars.
 - Sol cohérent : Essai non consolidé, non drainé (0.5-1-2-3)

Appliquer les mêmes pressions que pour la consolidation de l'éprouvette.

Pour appliquer cette charge normale, placer sans choc des poids convenables sur le plateau de la machine et s'assurer que la barre du levier est horizontale à l'aide du niveau prévu à cet effet.

4. Mettre à zéro le comparateur du dispositif de compensation de déformation de l'anneau, si l'appareil est muni d'un tel dispositif.
5. Désolidariser les deux demi-bottes en enlevant les goupilles.
6. Mettre en route à la vitesse désirée pour sols pulvérulents, sols cohérents, UU-CU (essai rapide); CD (essai lent).
7. noter les indications du comparateur de l'anneau (déplacement). Arrêter l'essai lorsque la contrainte de cisaillement est devenue constante, ou si elle continue à croître, lorsqu'on a une déformation relative d'environ 10%.
 - Enlever les poids du plateau de charge
 - Débloquer l'anneau dynamométrique
 - Enlever la boîte du chariot de la machine
 - Sortir l'éprouvette de la boîte
 - Mesurer le poids spécifique final
 - Noter les particularités
 - Prendre le cœur de l'échantillon aux alentours du plan de rupture
 - Détermination de la teneur en eau
 - o Peser cet échantillon humide
 - o Le mettre à l'étuve 55°C (48h)
 - o Peser l'échantillon sec
 - Nettoyer soigneusement les pierres poreuses ainsi que les boîtes de cisaillement.
8. Tracer les courbes contrainte-déformation.

9. Tracer la courbe intrinsèque.

II.4.2.2 Essai œdométrique norme xp 94-090-1

Essai œdométrique, c'est un essai de mesure des déformations à charge constante d'une éprouvette cylindrique avec déformation latérale nulle et drainage sur les deux faces (inf. et sup.). [14]

L'essai de compressibilité à l'œdomètre a pour but d'étudier la consolidation d'échantillon de sol intacts, soumis à des charges verticale, drainés suivant cette direction et maintenus latéralement par une paroi rigide. Il permet de suivre la consolidation au cours du temps et de déterminer les relations entre les charges et les déformations obtenues sous ces charges après consolidation.



Figure II-12: appareil œdométrique [17]

Cet essai permet d'établir, pour un échantillon donné, deux types de courbes :

- ✓ La courbe de compressibilité, qui indique le tassement total en fonction du logarithme de la contrainte appliquée ;
- ✓ La courbe de consolidation, qui donne le tassement d'échantillon en fonction du temps sous l'application d'une contrainte constante au début.

A partir de la courbe œdométrique (indice de vide en fonction du logarithme décimale de la contrainte verticale appliquée), on peut déduire plusieurs paramètres nécessaires pour le calcul du tassement ou pour la classification des sols : l'indice de compressibilité C_c et l'indice de gonflement C_g et la contrainte de pré consolidation σ'_p . [13]

On représente ci-après une classification des sols selon l'indice de compressibilité.

Tableau II-5: Classification du sol selon C_c . [16]

$C_c < 0.020$	Sol Incompressible
$0.020 < C_c < 0.050$	Sol très peu compressible
$0.050 < C_c < 0.100$	Sol peu compressible
$0.100 < C_c < 0.200$	Sol moyennement compressible
$0.200 < C_c < 0.300$	Sol assez fortement compressible
$0.300 < C_c < 0.500$	Sol très compressible
$C_c > 0.500$	Sol extrêmement compressible

- **Mode opératoire [10]**

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 à la dimension exacte 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).

II.4.3 Essai chimique

Les essais chimiques appliqués au sol dans le domaine du génie civil sont cruciaux pour évaluer les caractéristiques physiques et chimiques du sol, sa résistance et sa capacité à supporter des charges. Ces essais garantissent des fondations solides et durables, minimisent les risques de défaillance structurelle et assurent la sécurité des infrastructures [4]

Les essais chimiques sont :

- 1- Détermination des Insolubles.
- 2- Détermination des Sulfates.
- 3- Détermination Du Taux Des Carbonates D'un Sol.
- 4- Détermination des chlorures.
- 5- Détermination du taux de matière organique.

1- Détermination des Insolubles : norme (NFP 15-461)

Les insolubles sont des corps insolubles dans l'acide chlorhydrique et ce sont des silicates. Cet essai pour Déterminer conventionnellement la fraction du bitume communément désignée sous le nom d'asphaltées.

L'essai consiste à bouillir l'échantillon avec l'acide chlorhydrique et filtrer le mélange pour déterminer les corps qui ne sont pas solubles dans l'acide chlorhydrique.

- **Mode opératoire : [10]**

1. Opérer sur 2 g d'échantillon.
2. Dans un bécher de 250 ml, délayer la prise d'essai avec 10 ml d'eau froide.
3. Ajouter en remuant constamment 25 ml d'un mélange à volumes égaux d'acide chlorhydrique (d=1.19) et d'eau.
4. Chauffer rapidement pendant quelques instants jusqu'à ce que le liquide soit juste jaune clair.
5. Filtrer immédiatement la liqueur chaude sur filtre sans cendres.
6. Laver à l'eau bouillante jusque disparition des ions Cl⁻.
7. Réserver le filtrat qui servira à la détermination de la teneur des ions SO₄²⁻.
8. Mettre le filtre et son contenu dans une capsule de 250 ml et recouvrir avec 100 ml de solution Na₂CO₃ à 5%.
9. Faire bouillir pendant une quarte heure puis filtrer.
10. Laver à l'eau bouillante puis avec HCl à 1/2, enfin avec de l'eau distillée.
11. Calciner et peser.

2. Détermination des Sulfates

Les sulfates solubles dans l'eau, généralement trouvés dans les sols, sont le sulfate de sodium Na₂SO₄ et le sulfate de magnésium MgSO₄. Le sulfate de calcium CaSO₄, communément trouvé sous forme de gypse, est faiblement soluble dans l'eau mais il est promptement soluble dans l'acide chlorhydrique dilué. Le traitement à l'acide chlorhydrique est ainsi nécessaire si la quantité totale des sulfates est exigée.

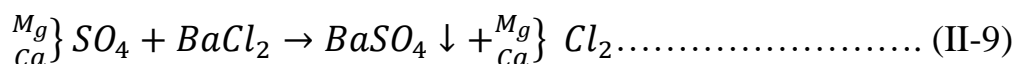
Les solubilités maximales approximatives dans l'eau des 3 sels mentionnés, exprimées en terme SO₃ par litre à environ 20°C, sont les suivantes :

Sulfate de sodium : 240 g/l

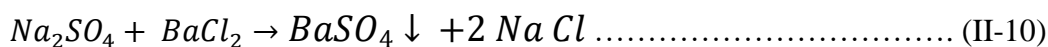
Sulfate de magnésium : 180 g/l

Sulfate de calcium : 1.2 g/l

Dans les méthodes gravimétriques décrites au 1.6.5, les sulfates dissous sont précipités sous forme de sulfate de baryum insoluble comme résultat d'une réaction avec le chlorure de baryum dans des conditions légèrement acides. La réaction chimique avec le sulfate de magnésium et le sulfate de calcium peut être représentée par l'équation :



La réaction est similaire avec le sulfate de sodium, mais l'équation est:



Le précipité de sulfate de baryum est filtré, séché et posé. A partir des masses atomiques, le pourcentage équivalent de SO_3 dans l'échantillon original est calculé :

Tableau II-6 Masse moléculaire du sulfate de baryum $BaSO_4$: [11]

Elément	Masse atomique (approx)	Nombre d'atome	
Ba	137	×1	=137
S	32	×1	=32
O	16	×4	=64
		Masse moléculaire	233

Tableau II-7 Masse de SO_3 [11]

Elément	Masse atomique (approx)	Nombre d'atome	
S	32	x1	32
O	16	x 3	48
		Masse SO_3	80

Ainsi la masse de SO_3 sera de $80 / 233 = 0.343$ fois la masse du sulfate de baryum précipité. Si la masse du précipité est m_4 et la masse du sol utilisé est m_3 , le % de SO_3 dans le sol utilisé est donné par

$$(m_4 / m_3) \times 0.343 \times 100 \% = 34.3 \times (m_4 / m_3)$$

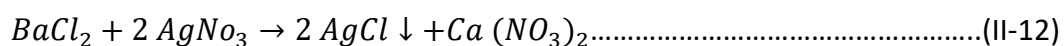
Si la masse m_3 n'était pas prise de l'échantillon original, mais de la fraction des passants à 2mm, le % calculé doit être multiplié par m_2 / m_1 pour le convertir en % de l'échantillon original, où m_1 = masse de l'échantillon avant tamisage, et m_2 = masse de l'échantillon passant au tamis de 2 mm.

Il est d'usage d'exprimer les sulfates en SO_3 . Le BRE DIGEST 174 (1975) et d'autres références qui donnent des conseils pratiques pour la mise en œuvre du béton dans les sols où les sulfates sont présents, basent leur recommandation sur l'ion SO_3 .

L'addition de l'eau de brome durant l'étape de l'extraction de l'acide oxyde quelques éléments métalliques qui peuvent être présents et qui peuvent d'une certaine manière contaminer le sulfate de baryum.

Les oxydes sont insolubles dans une solution alcaline, et l'addition de l'ammoniac les fait précipiter, ainsi ils peuvent être enlevés avant la réaction avec le chlorure de baryum.

Durant la filtration finale, la présence de chlorure soluble restant est indiquée par la turbidité quand une goutte de l'eau de lavage est testée avec une solution de nitrate d'argent.



Le lavage doit continuer jusqu'à ce qu'il n'y ait pas de turbidité.

Sécher, incinérer, calciner à $900^\circ C$ pendant 15 minutes, passer au dessiccateur et peser : m_4 .

3. Détermination Du Taux Des Carbonates D'un Sol

On détermine le taux de carbonates d'un sol pour déterminer le taux de calcaire. Une teneur en carbonate élevée signifie une faible teneur en minéraux argileux et généralement indique une résistance au cisaillement relativement élevée. [11]

On applique sur l'échantillon de sol un excès d'acide chlorhydrique et l'excès est dosé en retour par une solution d'hydroxyde de sodium d'où on détermine exactement le taux de carbonates existant dans le sol.

4. Détermination du taux de matière organique : NORME BS 1377

La matière organique dans le sol provient des restes d'animaux et de plantes. Les composés organiques peuvent avoir des effets indésirables dans le comportement du sol lors des travaux de construction, ces effets sont résumés comme suit : la portance est réduite, la compressibilité est augmentée, le gonflement et le retrait dus aux variations de la teneur en eau et la présence de gaz dans le sol peut causer des tassements importants. [11]

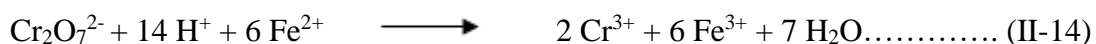
La présence de matière organique est généralement associée avec une acidité (PH faible), donc des effets nuisibles sur les fondations peuvent en résulter si les précautions relatives ne sont pas prises.

▪ Mode opératoire : [11]

- Si le sol contient des sulfates ou des chlorures, il faut les éliminer par des traitements appropriés car ils faussent les résultats du dosage.
- Pulvériser et passer au tamis 425 μm .
- Subdiviser l'échantillon et en prendre 5 g.
- Transférer ces 5 g dans un ballon de 500 ml sans perdre de fines.
- Oxyder le carbone organique d'un échantillon avec du bichromate de potassium en excès en milieu acide.



- L'excès du bichromate non réduit par le carbone organique est alors titré par la solution de sel de Mohr.



- Ce titrage se fait en présence d'un indicateur coloré: le diphénylamine.

CHAPITRE III

Définition du projet d'expertise géotechnique dans la cité de 30 logements à Ain Salah

III. Définition du projet d'expertise géotechnique dans la cité de 30 logements à Ain Salah.

III.1 Généralités

III.1.1 Présentation de la zone d'étude

Ain Salah (en arabe : صالح عين,) est une ville du Centre de l'Algérie, au cœur du Sahara.

Elle dépend administrativement de la wilaya de Tamanrasset dont elle est une deux des communes les plus septentrionales. Avant la désertification du Sahara, ce site était entouré d'une grande forêt, aujourd'hui pétrifiée.

Ain Salah culminant à 265 mètres d'altitude, est située dans le Centre du Sahara algérien, le plus vaste désert du monde, dans la dépression du Tidikelt, Elle est distante d'ALGER de 1062 km.

Ain Salah est desservie par un aéroport situé à 7 km au nord-est de la ville.

III.1.2 Climatologie de la région

Ain SALAH a un climat désertique chaud typique du Sahara avec des étés très longs et extrêmement chauds et des hivers courts et modérément chauds. Le climat y est largement hyperaride et extrêmement sec toute l'année puisque les précipitations annuelles moyennes sont environ de 16 mm La sécheresse y est encore plus accentuée durant l'été où l'on enregistre 0 mm de précipitations entre mai et septembre. A des occasions exceptionnelles, des orages violents peuvent se produire à cause de masses d'air plus frais venant du Nord qui rencontre les masses d'air brûlant venues directement du désert surchauffé pendant la journée. En été, la chaleur est extrême et prend un caractère persistant : les températures moyennes maximales sont supérieures à 46 °C en juillet (le mois le plus chaud) mais tournent plutôt autour de 50 °C entre juin et septembre. Les températures sont très agréables et élevées en hiver mais seulement la journée car dans les étendues désertiques, il n'y a rien pour retenir la chaleur et températures minimales moyennes avoisinent 7 °C. Le ciel est dégagé et clair toute l'année et les journées couvertes restent très rares, si existantes. De ce fait, l'irradiation solaire figure parmi les plus élevées au monde et la durée d'ensoleillement annuelle y est estimée entre 3 700 et 4 000 h. La température moyenne journalière annuelle avoisine 26 °C à In Salah. L'humidité relative y est exceptionnellement faible toute l'année avec une moyenne annuelle d'environ 27 %, et particulièrement en saison chaude où le degré hygrométrique de l'air descend souvent en-dessous de 5 %.

Tableau III-1: Données climatiques à In Salah climat désertique chaud - zone saharienne hyperarid

Mois	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	jui.	août	sep.	oct.	nov.	déc.	année
Température minimale moyenne (39°C)	7,2	9,6	14,2	18,1	23,3	27,5	30,6	30,2	26,7	21,3	13,1	8,9	19,28
Température moyenne (°C)	14,7	17,2	22,4	26,6	31,4	35,7	38,5	37,8	34,3	28,8	20,6	16	27,05
Température maximale moyenne (°C)	22,2	24,9	30,5	35,2	39,6	43,8	46,4	45,3	41,9	36,2	28	23,2	34,83
Précipitations (38mm)	3,1	0	6,2	9	3,1	3	0	3,1	3	3,1	0	0	14,1

Humidité relative (%)	41,3	35	27,2	22,8	17,9	13,1	11,9	12,4	16,2	23,5	30,9	41,9	24,51
-----------------------	------	----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

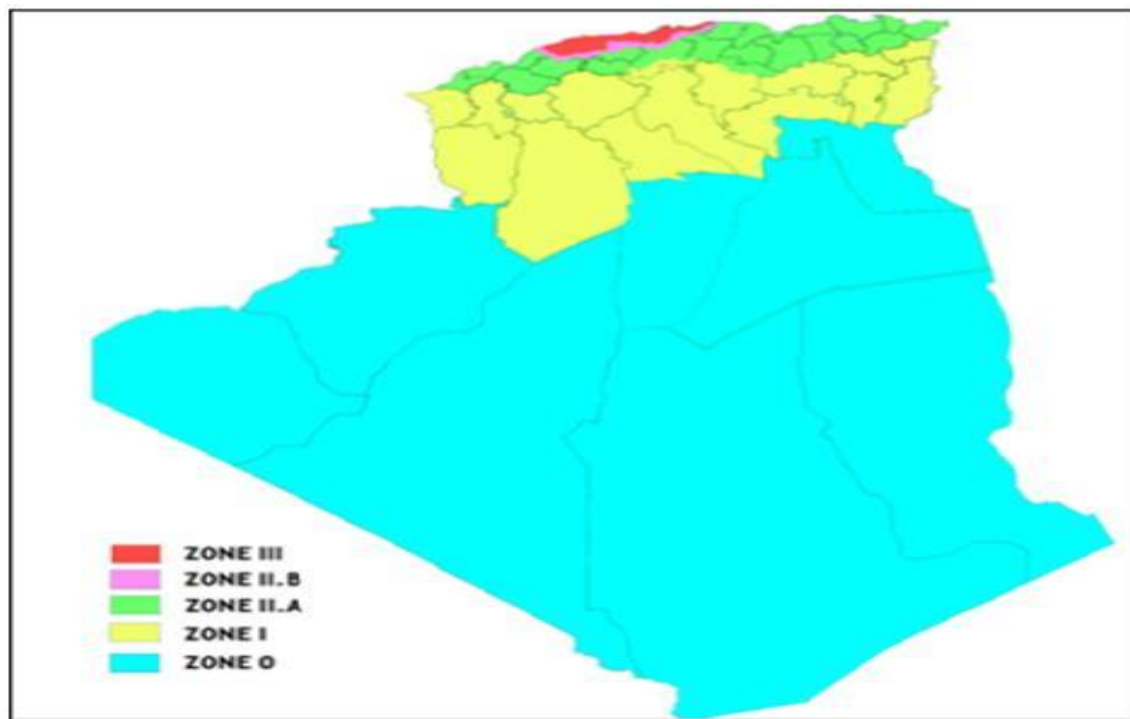


Figure III-1: La carte de zonage de l’Algérie et la position de la région d’étude, (RPOA 2008). La ville d’Ain SALAH est classée dans la zone 0 selon le classement du centre de génie Parasismique (CGS 2003).

❖ Aspect géologique

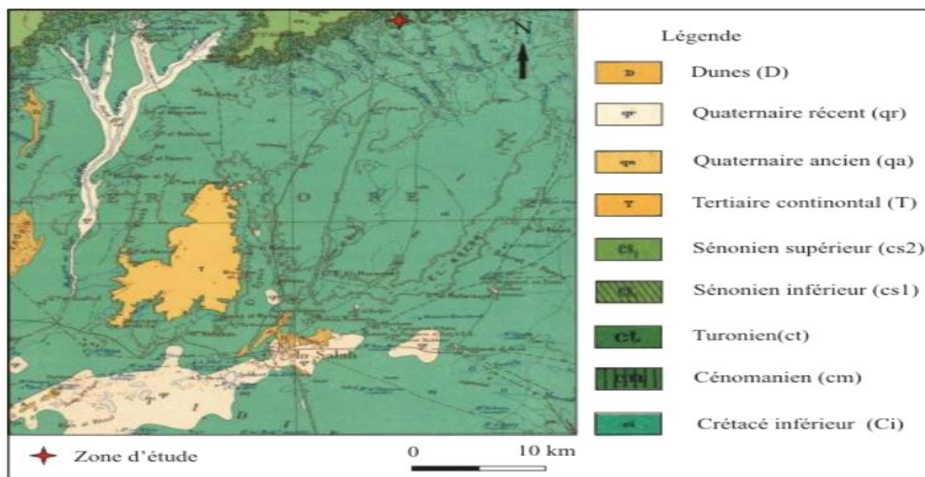


Figure III-2: Carte géologique de la région d’INSALAH

La région d’In-Salah est caractérisée par des dépôts Quaternaire, constitué de sable de dune, dépôts de sel, Sebka, dépôts alluvionnaires et des monticules d’argiles. Ces formations reposent sur le Secondaire (Continental intercalaire) constitué d’alternance de grès variés et d’argiles versicolores.

Le Tertiaire étant la plupart du temps absent et n'apparaît qu'au Nord de la région d'In-Salah, constitué essentiellement de dépôts lacustres variés, croûte calcaire est des sables. Pour la mémoire nous donne l'aperçu géologique ci-dessous :

Le Secondaire

Crétacé Supérieur : constitué essentiellement de calcaires marin, ces formations surmontent les argiles versicolores à filons de gypse, des marnes vertes et des calcaires dolomitiques.

Crétacé inférieur : C'est la période géologique qui a recouvert les 2/3 de la région d'In-Salah. Il s'agit du continental intercalaire caractérisé par l'importance frappante des apports détritiques indiquant une véritable transgression à matériel terrigène qui s'étend sur le Sahara cachant les formations Précambrienne. Il s'agit essentiellement de :

- Argiles rouges bariolées à passées grossièrement détritiques.
- Grés tendres grossiers souvent à ciment calcaire.
- Grés en bancs massifs à stratification oblique entre croisée.
- Grés variés en alternance avec des marnes et des argiles.

Le Tertiaire Constitué essentiellement de :

- Croûte calcaire et curasse férigineuse.
- Dépôts lacustres variés.
- Sable et gravier à stratification oblique.

Le Quaternaire

Le Quaternaire ancien : constitué essentiellement de dépôts alluvionnaires (alluvions, cailloux, gravillon de nature, forme et taille variés, et des monticules d'argiles.

Le Quaternaire récent : constitué essentiellement de dunes de sable, dépôts de sel et de Sebka.

III.2 Description de l'ouvrage

III.2.1 Nature et localisation du Projet

L'ouvrage objet de cette expertise correspond à des logements de fonctions situé dans la cité 30 logements militaires qui se trouvent dans le centre de ville d'IN SALAH.

D'après les informations transmises par les citoyens, la cité a été réalisé dans les années quatre-vingts.



Figure III-3: Situation du site et implantation des sondages

III.2.2 Etat des lieux

D'après notre auscultation visuelle ainsi que le puits de reconnaissance réalisé à l'aide d'une pelle mécanique sous les fondations d'un logement il a été constaté.

Des fissures verticales et horizontales au niveau des poteaux et des murs (voir photo) :



Figure III-5 : Fissure vertical au niveau du poteau de rive.



Figure III-4: Fissure incliné entre le poteau de rive et la fenêtre.



Figure III-6: Fissure verticale au niveau d'une clôture en parpaing.



Figure III-7: Fissure inclinée entre le poteau de rive et les fenêtres plus décollement de l'enduit sur le mur

III.2.3 Intervention de laboratoire

Afin de vérifier l'infrastructure de l'ouvrage (30 logements) une campagne géotechnique a été mise en place pour une meilleure reconnaissance géologique et géotechnique sur place et dans le laboratoire, il s'agit de :

- Réalisation de 03 sondages carottés de 08 m de profondeur avec mesure de niveau statique de la nappe.
- Réalisation d'un puits de reconnaissance au-dessous de fondation des logements.
- Evaluation de formation du sol par des essais de gonflement libre et essais œnométrique.

III.2.4 Géologie du site

La reconnaissance géologique du site a été faite par l'identification des affleurements superficiels, complétée par l'implantation et la réalisation de trois (03) sondages carottés, implantés sur le site.

Sondage N°01 : (31R 449280 E 3008814 N).

0.00-0.10 m : Remblais (plateforme en béton).

0.10-2.50 m : Argile plastique marron.

2.50-8.00m : Sable moyen à grossier peu graveleux à caillouteux devenant compact en profondeur.



Figure III-8 : Caisse de sondage N°01

Sondage N°02 : (31R 449229 E 3008794 N).

0.00-0.10 m : Remblais (plateforme en béton).

0.10-3.00 m : Argile plastique marron.

3.00-8.00 : Sable moyen à grossier.



Figure III-9: Caisse de sondage N°02

Sondage N°03 : (31R 449308 E 3008751 N).

0.00-0.10 m : Remblais (plateforme en béton).

0.10-2.20 m : Argile plastique marron.

2.20-3.00 m : Grés friable marron.

3.00- 8.00 m : Sable moyen à grossier graveleux à peu caillouteux rougeâtre.



Figure III-10 :Caisse de sondage N°03

III.2.5 Conclusion sur la géologie du site

Les résultats obtenus à partir de l'opération de sondage montrent que le terrain dans l'ensemble est formé essentiellement d'une couche d'argile atteint les 3.00m de profondeur suivie d'une couche de sable moyen à grossier peu graveleux à caillouteux.

III.2.6 Puits de reconnaissance

L'examen du puits de reconnaissance réalisé à l'aide d'une pelle mécanique a permis de tirer les informations suivantes :

Les logements ont été posés sur des fondations superficielles type semelles isolées
Aucune humidité n'a été observée sur le puits de reconnaissance.



Figure III-11 : Examen du puits de reconnaissance

III.3 Caractéristique géotechnique du sol

Les coupes lithologiques des sondages ont montré que le terrain est formé essentiellement de deux couches, une couche d'argile atteint les 3.00m de profondeur suivie d'une couche de sable moyen à grossier jusqu'à 8.00m de profondeur.

Afin de déterminer les caractéristiques géotechniques du terrain étudié, des essais en laboratoire ont été effectués sur les échantillons prélevés des différents sondages.

III.3.1 Argile

III.3.1.1 Essais d'identifications

- **Analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique a été effectuée sur des échantillons prélevés du faciès sableux, elle a donné les répartitions granulaires suivantes :

Tableau III-2 : Analyse granulométrique

N° SONDAGE	Prof (m)	% Gravieres	% Gros sable	% Sable fin	% Limon	% Argile
PS 01	0.05-2.50	04	10	22	54	10
PS 02	0.10-3.00	01	07	30	46	16
PS 03	0.10-2.20	02	06	14	62	16

D'après ces résultats, on déduit qu'il s'agit d'un limon sablo-argileux. Il est considéré comme sol fin d'après le LCPC

- **Limite d'Atterberg**

Les mesures des limites d'Atterberg effectuées sur la fraction fine (éléments <0.4mm) du faciès marneux, ont donné les valeurs suivantes :

Tableau III-3 : Limite d'Atterberg

N° SONDAGE	Prof (m)	Limite de Liquidité (LL%)	Limite de plasticité (PL%)	Indice de Plasticité (IP %)
PS 01	0.05-2.50	54.45	34.50	19.96
PS 02	0.10-3.00	59.52	25.58	33.94
PS 03	0.10-2.20	53.84	34.67	19.17

D'après l'abaque de CASAGRANDE on remarque que la fraction fine est une argile très plastique

Le sol représenté par les échantillons en question est de la classe **A2** selon **NF P 11-300 GTR**

III.3.1.2 Essais mécaniques

- **Essai cisaillement rectiligne (UU)**

Les essais cisaillement rectiligne, non consolidé non drainé (UU) sont pour but de déterminer les caractéristiques intrinsèques du sol exprimées par son angle de

Frottement (Φ) et sa cohésion (C).

Tableau III-4 : Cisaillement rectiligne (UU)

N° SONDAGE	Echantillon	L'angle de frottement interne (u u)	Cohésion (Cuu) (bars)
PS 01	0.05-2.50	27.1	0.57
PS 01	1.00-1.30	18.9	0.47
PS 02	1.00-1.25	35	0.38
PS 02	1.50-1.85	25.3	0.30
PS 03	0.10-2.20	32.5	0.12
PS 03	0.30-0.55	18.4	0.47

Les résultats obtenus montrent que le sol travaille plus en frottement qu'à la cohésion.

- **Essai Œdomètre**

L'essai œnométrique permet de mesurer le tassement au cours du temps d'une éprouvette cylindrique (intacte) type galette placée dans une enceinte sans déformation latérale possible au fur et à mesure de l'application de différentes charges verticales constantes.

L'éprouvette est saturée d'eau au préalable au premier chargement et étant drainée en haut et en bas, elle est maintenue saturée pendant l'essai.

Cet essai permet d'établir, pour un échantillon donné, deux types de courbes :

- Les courbes de consolidation, qui donnent le tassement de l'échantillon en fonction du temps sous application d'une contrainte constante.
- La courbe de compressibilité, qui indique le tassement total en fonction du logarithme de la contrainte appliquée (les courbes sont jointes en annexe).

Tableau III-5 : résultats d'essai œnométrique

N° SONDAGE	Prof (m)	Pg (bars)	Pc (bars)	Cc (%)	Cg (%)
PS 01	1.00-1.30	/	0.59	18.57	3.25
Ps 02	1.50-1.85	0.64	1.87	14.95	5.06

A partir de ces résultats et d'après G.Sanglerat le sol est moyennement compressible ($C_c=0.18$) avec un gonflement faible $P_g=0.64$ bars.

➤ Essais chimiques sommaires

Les essais chimiques effectués sur des échantillons prélevés des profondeurs susceptibles d'être en contacts directs avec le béton de l'infrastructure.

Tableau III-6 : Analyse chimique sommaire

N° SONDAGE	Prof (m)	% Insolubles	%Sulfates	%carbonates
PS 01	0.10-2.50	81.7	1.13	10
PS 02	0.10-3.00	78	1.20	15
PS 03	0.10-2.20	82.5	1.20	09

L'analyse chimique sommaire confirme l'auscultation visuelle des sondages, il s'agit d'une argile.

III.3.2 Sable

III.3.2.1 Essais d'identifications

▪ Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été effectuée sur des échantillons prélevés du faciès sableux, elle a donné les répartitions granulaires suivantes :

Tableau III-7 : Analyse granulométrique :

N° SONDAGE	Prof (m)	% Gravieres	%Gros sable	%Sable fin	%<80 μ m
PS 01	2.50-8.00	00	90	04	06
PS 02	3.00-8.00	01	89	03	07

D'après ces résultats, on déduit qu'il s'agit d'un sable grossier à fin, Il est considéré comme un sol pulvérulent d'après le LCPC.

▪ Limite d'Atterberg

Les mesures des limites d'Atterberg effectuées sur la fraction fine (éléments <0.4mm) du faciès marneux, ont donné les valeurs suivantes :

Tableau III-8 : Analyse granulométrique

N° SONDAGE	Prof (m)	Limite de Liquidité (LL%)	Limite de plasticité (PL%)	Indice de Plasticité (IP %)
PS 01	2.50-8.00	24.47	NM	NM
PS 02	3.00-8.00	24.22	NM	NM

D'après l'abaque de CASAGRANDE on remarque que la fraction fine dans le sable est nom mesurable.

Le sol représenté par les échantillons en question est de la classe B1 selon NF P 11-300 GTR.

III.3.2.2 Essais mécaniques

▪ Essai cisaillement rectiligne (UU)

Les essais cisaillement rectiligne, non consolidé non drainé (UU) sont pour but de déterminer les caractéristiques intrinsèques du sol exprimées par son angle de Frottement (Φ) et sa cohésion (C).

Tableau III-9 : Cisaillement rectiligne (UU)

N° SONDAGE	Echantillon	L'angle de frottement interne (uu)	Cohésion (Cuu) (bars)
PS 01	2.50-8.00	31.8	0.09
PS 03	2.20-3.00	25.4	0.10

Les résultats obtenus montrent que le sol travaille plus en frottement qu'à la cohésion

➤ Essais chimiques sommaires

Les essais chimiques effectués sur des échantillons prélevés des profondeurs susceptibles d'être en contacts directs avec le béton de l'infrastructure.

Tableau III-10 : Analyse chimique sommaire

N° SONDAGE	Prof (m)	% Insolubles	% Sulfates	% carbonates	Facies
PS 01	2.50-8.00	96.4	/	00	Sableux
PS 02	3.00-8.00	94.9	/	01	Sableux

L'analyse chimique sommaire confirme l'auscultation visuelle des sondages, il s'agit d'un sable dépourvu de sulfates.

III.4 ESTIMATION DE TASSEMENT

L'estimation des tassements se fera suivant la méthode d'intégration par tranche de Bousines qui repose sur les résultats d'essai de compressibilité à l'odomètre. Le tassement d'une couche i sera estimé par la formule suivante :

$$\Delta H_i = \frac{H_i \cdot \Delta e}{1 + e_0} \dots \dots \dots (III-1)$$

Les tassements totales ($\Sigma \Delta H_i$) est la somme des tassements de toutes les couches.

Les calculs intermédiaires aboutissant à la formule précédente sont consignés dans le tableau ci-après.

L'hypothèse de calcul est :

Une semelle isolée de largeur B = 1.00 mètres et longueur b=1.00 mètre

Contrainte de service $\sigma_s = 1$ bars

Profondeur d'ancrage $D = 1.00$ mètres

Les courbes œnométriques (jointes en annexes).

Tableau III-11 : calcul de tassement

z	Z	I	4,I	σ_z	σ_o (bar)	σ_f (bar)	eo	ef	Δe	Δh
0	0	0.2500	1.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.501	0.480	0.0212	0.7068
0.5	0.5	0.1760	0.7040	0.7040	0.1080	0.8120	0.499	0.484	0.0150	0.4990
1	1	0.0850	0.3400	0.3400	0.2160	0.5560	0.497	0.489	0.0072	0.2418
1.5	1.5	0.0450	0.1800	0.1800	0.3240	0.5040	0.494	0.490	0.0038	0.1281
2	2	0.0250	0.1000	0.1000	0.4320	0.5320	0.492	0.490	0.0021	0.0712
2.5	2.5	0.0180	0.0720	0.0720	0.5400	0.6120	0.490	0.488	0.0015	0.0512
3	3	0.0100	0.0400	0.0400	0.6480	0.6880	0.487	0.487	0.0008	0.0285

$$\Sigma \Delta H_i = 1.726 \text{ cm}$$

Pour une profondeur de 3.0 m et une contrainte de service σ_s de 1.0 bars, les tassements obtenus sont d'ordre de 1.7 cm pour une semelle isolé, cette valeur est admissible.

III.5 Conclusion

En ce qui concerne l'étude du projet d'expertise géotechnique dans la cité de 30 logements à Ain Salah, Tamanrasset, objet de notre thèse, il a été constaté :

Apparition de fissures inclinées, verticales et horizontales au niveau des poteaux de rive et entre poteaux et fenêtres ainsi qu'au niveau des murs de clôtures en parpaing.

Décollement de l'enduit sur les murs dans plusieurs endroits dans des différentes maisons.

La réalisation d'un puits de reconnaissance à l'aide d'une pelle mécanique au-dessous d'une fondation à montrer que la fondation est posée sur la couche d'argile sur une profondeur a environ 1.50m.

Aucune humidité n'a été détectée lors de la réalisation du puits de reconnaissance

Les coupes lithologiques des sondages réalisés sur une profondeur de 08 m ont montré que le sol est formé essentiellement d'une couche d'argile atteins les 03m de profondeur repose sur une couche épaisse de sable moyen a grossie.

Les essais au niveau de laboratoire ont montré que la couche d'argile est de la classe A2 selon le NF P11-300 GTR.

A partir des résultats de l'essai œdométrique et d'après G.Sanglerat cette argile possède une compressibilité moyenne ($C_c = 0.18$) et peu gonflante ($C_g = 5.06\%$).

Les logements de la cité militaire notamment les logements N° 13, 21 et 29 ont montré l'apparition des fissures inclinées, verticales et horizontales ainsi que des phénomènes de décollement de l'enduit au niveau des murs.

L'étude de d'expertise géotechnique que nous avons menée nous a permis d'extraire les causes probables, qui sont :

- Causes ayant rapport avec la reconnaissance du sol de fondation (type et dimension de fondation)
- Causes ayant rapport avec l'état du sol de fondation tel que la stabilité du sol
- Causes dues aux insuffisances au niveau de l'étude technique tel que les erreurs de conception
- Causes dues aux fautes d'exécution
- Causes liées aux insuffisances au niveau du contrôle technique
- Causes liées à la mise en service de la construction.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude des sols est effectivement essentielle pour garantir la réussite des projets de construction. Voici quelques raisons pour lesquelles une étude géotechnique de qualité est cruciale

1- Identification des risques : étude des sols permet d'identifier les risques géotechniques potentiels tels que la présence de sols instables, l'existence de nappes phréatiques élevées, les problèmes de tassement ou de glissement de terrain. Cela permet de prendre les mesures appropriées pour prévenir ces risques et garantir la sécurité des structures

2- Conception appropriée : Les résultats de l'étude géotechnique fournissent des informations précieuses pour la conception des fondations et des structures. Ils permettent de déterminer les caractéristiques du sol, sa capacité portante, sa compressibilité et sa stabilité, ce qui est essentiel pour dimensionner correctement les fondations et assurer la stabilité des bâtiments

3- Optimisation des coûts : Une étude géotechnique approfondie peut aider à optimiser les coûts de construction en fournissant des informations sur les méthodes de construction les plus appropriées en fonction des caractéristiques du sol. Cela permet de choisir les fondations et les techniques de construction les plus efficaces, évitant ainsi les dépenses inutiles

4- Respect des réglementations : Les réglementations en vigueur exigent souvent la réalisation; une étude géotechnique pour les projets de construction. Investir dans une étude de sol de qualité garantit la conformité aux réglementations locales et assure la sécurité des occupants et des utilisateurs des bâtiments

5- Durabilité des ouvrages : Une étude géotechnique solide permet de construire des ouvrages durables et résistants aux contraintes du sol. Cela assure une longévité accrue des bâtiments, réduisant ainsi les coûts de maintenance et les risques de défaillance prématurée

6- En somme, une étude géotechnique de qualité est un investissement judicieux pour garantir la durabilité, la sécurité et la réussite des projets de construction. Elle permet de prendre des décisions éclairées, d'anticiper les risques potentiels et de concevoir de manière appropriée, contribuant ainsi à la réalisation d'ouvrages solides et pérennes

Il est essentiel de respecter les normes et les réglementations en vigueur dans votre pays ou votre région lors de la réalisation d'une étude de sol. Cela garantit que les méthodes utilisées, les protocoles d'échantillonnage et les analyses effectuées sont conformes aux normes de l'industrie et; elles fournissent des résultats fiables et précis

En collaborant avec des experts géotechniciens qualifiés, vous pouvez obtenir une évaluation détaillée et approfondie du sol spécifique à votre projet, ainsi que des recommandations appropriées pour la conception, la construction et la sécurité des bâtiments.

N'hésitez pas à consulter des professionnels spécialisés pour obtenir des conseils adaptés à la situation particulière

Références Bibliographiques

- [1]ahmed ziregue, cours de mécanique des sols (mds), - 2eme tp mcil - universite amar thelidji-laghouat
- [2]ahmed ziregue, «étude de sol», universite amar thelidji- laghouat
- [3]ahmed ziregue et mr.dasvantoai, «polycope des travaux pratiques de mécanique des sols», universite amar thelidji- laghouat, 1992
- [4]achir farida et medjoudj maliza, memoire de «étude geotechnique d'un tronçon de la penetrante autoroutiere reliant le port de bejaia a l'autoroute est-ouest au niveau d'ahnif de pk35+000 au pk36+800 », universite a. Mira-bejaia, 2016/2017.
- [5]bouallaoui abdelkader et merabet rania, memoire de «étude de sol d'un projet de realisations des panneaux solaire 300 mw hassi delaa wilaya de laghouat», universite amar thelidji- laghouat, 2022.
- [6]dada sylvano manace, rapport de stage de theme «d'initiation a la geotechnique », universite d'antananarivo, 2016.
- [7] gerard philtapponarat et bertrand hubert, le livre de fondation et ouvrages en terra 2007
- [8]khadra bendjillali, polycopie de cours materiaux de construction mdc, - 2eme tp mcil - universite amar thelidji- laghouat, 2017.
- [9] le livre de pathologies des constructions
- [10]luc sibille. «bases de la geotechnique module mxg4 iut» genie civil et construction durable. Licence. France. 2018. Cel-01784530v1.
- [11] norme de l'essai, «mode opératoire simplifié», laboratoire des travaux publics du sud.
- [12]rachid tahar et bekhouti mourad, rapport de stage de theme «rapport explicatif étude pour la réalisation d'un tronçon de route de 175 km reliant adrar – aoulef», universite d'adrar, 2013/2014.
- [13]tayebi abdellah et triki toufik, memoire de «theme etude geotechnique d'une structure routiere a base des materiaux locaux entre tsabit et bouda», universite ahmed draia adrar 2018/2019.
- [14]ali dehane et abdeldjalil lakehal et rania imane merabte, rapport de stage de theme «caracterisation des sols au laboratoire pour elaborer une etude de sol», universite d'ghardaïa, 2019/2020
- [15] luc sibille. Tp - essai de cisaillement direct a la boite de casagrande / essai triaxial. Licence. France. 2011. Cel-01795697
- [16] ahmed ziregue, «polycope des tp mécanique des sols (mds) », universite amar thelidji- laghouat
- [17] ali bouafia, le livre d'introduction au calcul des fondations