REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie civil
Spécialité : Géotechnique

Thème :

Analyse numérique du comportement des sols argileux lors d'un essai oedométrique

---

Présenté par :

ZOULIKHA Amina .

BENATALLAH Abdelraouf .

Proposé et Dirigé par :

Dr. AMRI Salima.

Promotion Juin 2021

REMERCIMENTS

En premier lieu, nous tenons d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier et à exprimer nos gratitudes à notre encadreuse Madame. AMRI.SALIMA qui nous a orienté et nous a soutenu durant notre projet de fin d'études .

En fin nous remercions tous ceux qui ont contribué de loin a de prés à la réalisation de ce modeste travail.



Dédicace

« Nous tenons à remercier notre dieu **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage ».

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce travail fruit De mes études :

A Ma chère mère :Naima Moussaoui

Pour toute l'affection qu'elle m'a donnée, la source de la tendresse,

A mon cher père :Benatallah Abedelkrim

Qui a veillé sur moi, qui se suis inquiété pour que je sois tranquille et s'est Privé pour me satisfaire

A mon oncle : Djelil

A mon frère :Zinneddine

A mes sœurs :Fatima elzohra et Imane

A tous mes amis (es)

A ma collègue et binôme : Amina.

A Toute la promo de master 2 géotechnique 2020-2021

« A toute personne qui m'aime »

Benatallah Abdebraouf



Dédicace

« Nous tenons à remercier notre dieu **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage ».

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce travail fruit De mes études : **A Ma chère mère**

Pour toute l'affection qu'elle m'a donnée, la source de la tendresse,

A mon cher père

Qui a veillé sur moi, qui se suis inquiété pour que je sois tranquille et s'est Privé pour me satisfaire.

A mes sœurs : Khadidja et Mimi.

A tous mes amis(es)

A mon collègue et binôme :Abdelraouf.

A Toute la promo de master 2 géotechnique 2020-2021.

« A toute personne qui m'aime »

ZOULIKHA AMINA

rawpixel

RÉSUMÉ

L'essai œdométrique est un essai largement utilisé dans le domaine génie civil, il permet de mesure le tassement et gonflement des sols argileux . L'objectif de ce travail est de proposer des modèles numériques réalisés par éléments finis l'aide de code de calcul Plaxis 2D en vue d'étude du comportement de consolidation primaire d'un échantillon de sol intacts provenant de la region de Médéa , donc nous avons simulé les tassements de consolidation sous l'oedomètre, et en confrontant les résultats obtenus aux expérimentations et aux theories fondamentales de la consolidation.

Mots clés : Oedomètre , tassement, élément finis, Plaxis, comportement.

ABSTRACT

The oedometric test is a test widely used in the civil engineering field, it measures the settlement and swelling of clay soils. The objective of this work is to propose numerical models carried out by finite elements using PlAXIS2D computer code in order to study the primary consolidation behavior of a sample of intact soil coming from the region of Médéa therefore we have simulated consolidation settlements under the oedometer, and by comparing the results obtained with experiments and fundamental theories of consolidation.

Key words: Oedometer, settlement, finite element, Plaxis, behavior.

الملخص

اختبار اودومتريك هو اختبار يستخدم على نطاق واسع في مجال الهندسة المدنية ، فهو يقيس استقرار وانتفاخ التربة الطينية. الهدف من هذا العمل هو اقتراح نماذج عددية تنتجها عناصر محدودة باستخدام برنامج الحساب Plaxis 2Dمن أجل دراسة سلوك الهبوط الاولي لعينة تربة سليمة من منطقة ولاية المدية، لذلك قمنا بمحاكاة الهبوط وقمنا باستخراج النتائج و مقارنتها مع النتائج التي تم الحصول عليها من خلال التجارب والنظريات الأساسية.

الكلمات المفتاحية: عداد الخطى ، التسوية ، العنصر المحدود ، Plaxis 2D ، السلوك.

SOMMAIRE

Introduction Général……..……..……...……02

Chapitre I Généralités sur les argiles

I .1.Introduction……..……..……...2
I .2.Définition……..……..……...2
a-Définition granulométrique……..……2
b-Définition minéralogique……..……..2
I. 3.Structure minéralogique des agriles……..……3
I.3.1.Minéraux argileux……..……...……3
I.3.2. Elément tétraédrique……..……...3
I.3.3. Elément octaédrique……..……..……3
I.4. Les différentes familles de minéraux argileux……..……4
I.4.1.La kaolinite……..……..……5
I.4. 2.Smectite……..……..……5
I.4. 3.L'illite ……..……..……6
I.4. 4 Montmorillonite ……..……...….6
I.4. 5.Les chlorites ……..……..….8
I.4.6.Interstratifiés ……..……..……..8
I.5.Texture des sols argileux…..……..……...9
I.6. L'eau et les argiles ……..……..……10
I.6.1. Les différents types d'eau ……..……...….10
I.7. principaux caractéristiques des minéraux argileux et l'eau ……..11
1.7.1.Attraction entre les minéraux argileux et l'eau ……..11
a-.Activité électrochimique à la surface des minéraux argileux ……11
b-Polarité de l'eau ……..……12
c-Capacité d'échange cationique CEC……..……..12
d-La surface spécifique……..……13
f- Densité de charge spécifique……..……..……14
Conclusion……..……..……..……15

Chapitre II comportement des argiles

II.1.Introduction……..……..……..……16
II.2.Tassement ……..……..…….....16
II.2.1. Définition le tassement ……..……...……17
II.2.2.Méthodes de calcul de tassement des fondations superficielles : ……..……17
II.3.gonflement des argile ……..……..……..……18
II.3.1.Types de gonflement ……..……..……18
II.3.1.1.Gonflement interfoliaire ……..……...……19
II.3.1.2.Gonflement interparticulaire ……..……..……20
II.4.Définition des paramètres de gonflement ……..……..……21
II.4.1. La pression de gonflement……..……...21
II.4. 2. L'amplitude du gonflement (ou gonflement libre) : ……..……21
II.4. 3.Le potentiel de gonflement (εg) ……..……..21
II.4.4.L'indice de gonflement (Cg) ……..……...21
II.5.Caractérisation des sols argileux à l'aide des essais au laboratoire ……..….21
II.5.1.oedométriques……..……...21

II.5.2. Courbes de l'essai oedométrique……..……..……..22
II.5.2.1.Courbe et caractéristiques de compressibilité : …….……22
II. 5.2.2. Caractéristique de compressibilité: …….……..……...23
II.5.2.3.Courbe de consolidation ……..……..……..25
II.5.3.Essai de gonflement libre …….……..……26
II.5.4.Essais de gonflement parallèle …….……..……27
II.5.5.Essai de gonflement a volume constant…….……..……27
Conclusion…….……..……..……....28

Chapitre III Présentation du site

III.1. Introduction …….……..……..……..29
III .2. Situation géographique: …….……..……...29
III.2.1. Situation géographique de wilaya : …….……..……..…....29
III.2.2. Situation géographique de site: …….……..……29
III.3. La géologie de la région…….……..……30
II.3.1. Hydrologie de la région: …….……..……...…..30
III.4. Caractéristique chimique et géotechnique …….……..……30
III.4.1 .Les essais chimique…….……..……..……...30
III.4.3.Essais de laboratoire…….……..……31
III.4.3.1. Les essais physiques …….……..……...…...31
III.4.3.2 Les essais mécaniques …….…….....36
III.4.2. Essais in-situ : …….……..……...41
Conclusion…….……..……..……..42

Chapitre IV Analyse numerique du tassement d'une argile sous l'oedometre

IV.1.Introduction…….……..……..……43
IV.1.1 Les points forts de Plaxis.…….……..……43
IV.1.2 Présentation du cas …….……..……43
IV.2.La géométrie du modèle …….……..……44
IV.3.Maillage…….……..……..……45
IV.4.Génération des contraintes initiales…….……..……46
IV.5.Résultats et discussion …….……..……...……48
IV.6. Méthode numérique de calcule de indice des vides : …….……51
Conclusion…….……..……..……..……55

Conclusion générale……..56

LISTE DES FIGURES

Figure N° **Page**

Figure I.1 : Couche tétraédrique des phyllosilicates ……3

Figure I.2 : Couche octaédrique des phyllosilicates…….....4

Figure I.3 : Schéma de la particule de kaolinite (Mitchell, 1976)…….5

Figure 1.4 : Structure des smectites (OH)4 Si8 (Al10/3 Mg2/3)O20, nH2O……....6

Figure I.5 : Schéma de la particule d'illite (Mitchell,1976)……..6

Figure I.6 : Schéma de la particule de montmorillonite (Mitchell, 1976)…….7

Figure I.7 : Vue insométrique de la structure atomique de la montmorillonite (Gueddouda 2011)……...7

Figure I.8 : Schéma de la particule de chlorite (Mitchell, 1976)…….....8

Figure I.9 : (a et b) : Minéraux interstratifiés…….....9

Figure I.10 : Différents niveaux structuraux des sols gonflants (Gens et Alonso, 1992)……10

Figure I.11 : Schéma de molécule d'eau ……12

Figure II.1 : Schéma d'un gonflement interfoliaire (Mitchell,1976)……...19

Figure II.2 : Obsevation au MEB d'une texture argileuse (Troalen et al,1984)……..20

Figure II.3 : Gonflement des argiles par hydration..……...20

Figure II.4 : Courbe de l'essai oedométrique indice des vides e-Contrainte normale applique Coordonnées semi-logarithme …….……..23

Figure II.5 : Courbe oedométrique tassement $\frac{\Delta H}{H}$ contrainte normale appliquée…..……24

Figure II.6 : Courbe de consolidation…….…….26

Figure III.1 : Situation géographique de Draà Essamar……..……...29

Figure III.2 : Granulométrie par tamisage série tamis…….……...……32

Figure III.3 : l'analyse granulométrique par sédimentométrie……33

Figure III.4 : la courbe d' analyses granulométrique de l'échantillon étudié……33

Figure III.5 : l'essai des limites d'Atterberg……..……..…35

Figure III.6 : Les limite d'atterberge du matériaux argileux……...……35

Figure III.7 : Abaque de Casagrande…….....36

Figure III.8 : Essai de cisaillement rectiligne à la boite…….....37

Figure III.9 : La courbe contrainte normale en fonction de contrainte au cisaillement……..38

Figure III.10 : courbe decompressibilité…..……..……..……...40

Figure III.11: Graphe de pénétromètre dynamique lourd……..……..42
Figure.IV.1: Représentation schématique de la bague……...……...44
Figure IV.2 : Modélisation de la géométrie (consolidation unidimensionnelle)……..……..45
Figure IV.3 : Maillage du modèle. ……..46
Figure IV.4 : Condition aux limites en la nappe phréatique et d'échappement d'eau. ……..47
Figure IV.5 : génération des pressions interstitielles …….……..……47
Figure IV.6 : génération des contraintes effectives initiales ……..……48
Figure IV.7 : le déplacement …….……48
Figure IV.8 : le déplacement totale de sol …….……49
Figure IV.9 : le déplacement totale de sol …….……..49
Figure IV.10 : le déplacement totale de sol …….…….……50
Figure IV.11 : le déplacement totale de sol …….…….…..……50
Figure IV.12 : courbe oedometrique (d'après les résulta de laboratoire) …….……..…..…53
Figure IV.13 : courbe oedometrique (a partir de logiciel plaxis) ……...…..…53
Figure IV.14 : courbe oedometrique (plaxis + labo) ……..…45

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU N° **Page**

Tableau I.1 : Valeurs de CEC pour quelques minéraux argileux (en meq par 100 g)……12
Tableau I.1 : Surface spécifique et C.E.C de quelques minéraux argileux…….13
Tableau III.1 : Résultats des analyses chimique…….31
Tableau III.2 : Résultat de l'essai limites d'Atterberg……36
Tableau III.3 : Résultats des Cisaillement……37
Tableau IV.1 : des caractéristiques physique et mécanique ……...…44
Tableau IV.2 : les déplacement numérique et expérimentale de sol sous effet des charge applique ….……...……51
tableau IV.3 : la variation de l'indice des vides……...……..52

Liste des symboles

CEC : La capacité d'échange cationique (meq /g)

***Cg* :** Coefficient de gonflement

ε g : Amplitude de gonflement

H : Épaisseur initial de l'échantillon

***E0* :** Représente la tangente de la N1N2

C : Cohésion

IL : indice de liquidité.

IP : Indice de plasticité

W : Teneur en eau

W0 : Teneur en eau initiale

WL : Limite de liquidité

S : tassement

ΔH : gonflement total

Cc : indice de compressibilité

***Sc* :** Tassement de consolidation primaire

***Ss* :** Tassement de consolidation secondaire

***Eoed* :** Module oedométrique

***e* :** Indice des vides

***e0* :** Indice des vides initiaux

***Cc* :** Indice de compressibilité

***Cv* :** Coefficient de consolidation

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La majorité des sols argileux est sensible au phénomène de retrait-gonflement, mais cette sensibilité et son ampleur diffère en fonction de certaines propriétés à ne pas négliger lors de recherches ou d'études géotechniques (avant-projet ou expertise), dépendant en premier lieu de l'échelle d'étude à laquelle on se place. En effet, à l'échelle de la formation géologique – au niveau d'une parcelle – la structure et le passé géologique vont contrôler fortement la sensibilité au phénomène, favorisé l'accès de l'eau vers des zones moins perméables, des intercalations de passées sableuses ou silteuses, la présence de fissures de retrait pouvant être colmatées par des matériaux silteux favorisant ainsi les échanges hydriques au sein de la formation à des profondeurs variables. En se plaçant à l'échelle de l'échantillon prélevé en laboratoire, cette sensibilité dépendra de plusieurs facteurs comme la nature et la proportion en minéraux argileux gonflants dans les sols, de la texture et du réseaux poreux contrôlant l'accès des molécules d'eau au sein de la structure du sol, de l'état remanié ou intact lors du prélèvement, de la présence d'autres minéraux (carbonates, quartz) pouvant perturber l'interaction eau-argile et la sensibilité au phénomène,

Dans ce contexte, le principal objectif de cette mémoire est étudié le comportement mécanique d'une argile provenant de la région de Médéa à l'aide de code de calcul Plaxis.
Ce travail de recherche s'articule sur quatre chapitres à savoir

- **Le premier chapitre** est présente une généralité sur les argiles ,
- **Le deuxième chapitre** est consacré à la présentation du comportement des argile (gonflement , tassement) ,
- **Le troisième chapitre** est consacré à la présentation du site étudié, situation géographique, géologie et les différentes caractéristiques géotechniques du site étudié,
- **Le quatrième chapitre** : est présenté une simulation numérique du tassement de consolidation sous l'oedomètre avec l'utilisation le code de calcule Plaxis .

Et enfin, on terminera par une conclusion générale

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LES ARGILES

I .1.Introduction :

Les argiles sont des minéraux naturels utilises par l'homme depuis des millénaires du fait de Leur abondance et de leurs propriétés remarquables qui les destinent à de multiples applications: matériaux de construction, céramiques, moules pour la métallurgie, extraction pétrolière, fabrication des ciments, agriculture, alimentation animale et humaine, santé, cosmétique, papeterie ,textile, matière plastique.

Géologiquement, l'argile est le produit de la composition de roche riche en feldspath comme le granit par exemple. Pendant des millions d'années l'eau a participé à la dégradation chimique de la roche mère. L'argile a pu se constituer à l'emplacement même de la roche mère. Le terme argile possède différents sens qui ne se recouvrent que globalement. Il peut désigner des minéraux de structures et propriétés particulières, des roches argileux ses composées pour l'essentiel de ces minéraux ou bien la partie la plus fine d'une analyse granulométrique d'un sol meuble inférieur à 2 µm, cependant cette dernière sont des minéraux argileux résultant de la destruction des roches (les roches sédimentaires contiennent 50 %, les schistes 50 à 80 % et les roches éruptives donnent, par décomposition, des argiles). On dit qu'un sol est argileux s'il contient plus de 50% de minéraux argileux (Amroune ,2016).

Ce chapitre est consacrés à un aperçu bibliographique sur la structure des argileus et l'effet de l'eau et les différentes réactions physico-chimiques qui se produit dans la structure argileuse.

I .2.Définition :

a-Définition granulométrique

Une argile, au sens agronomique du terme, est la fraction minérale d'un sol dont les particules ont des dimensions inférieures à 2µm. L'argile brute est constituée généralement d'un composant minéral de base (kaolinite, montmorillonite, etc…) et de certaines impuretés secondaires tels que, le quartz, la calcite et les matières organiques.

b-Définition minéralogique

Les minéraux argileux appartiennent à la famille des phyllosilicates et sont constitués par une couche tétraédrique bidimensionnelle de composition T_2O_5, T Pouvant être Si^{4+}, Al^{3+} ou Fe^{3+}. Ces tétraèdres sont liés dans un même plan par trois de leurs sommets, le quatrième étant orienté dans une autre direction. Les couches tétraédriques sont liées dans la structure à des couches octaédriques ou à des groupes de cations ordonnés ouindépendants .(Belaid,2018)

I. 3.Structure minéralogique des agriles :

I.3.1.Minéraux argileux :

Les minéraux argileux sont des particules très fine dont le diamètre équivalent est normalement inférieur à 0,002 mm Ces sont, pour la plus part, des silicates d'aluminium, de magnésium ou de fer dont les atomes de manière à former des figures géométriques très régulières Chaque minéral argileux est formé par l'empilement de cristaux microscopiques qui portent habituellement le nom de feuillets en raison de leur apparence similaire à celle d'une lamelle ou d'une feuille extrêmement mince. Ces feuillets sont eux-mêmes constitués d'unités cristallines que l'on appelle structures fondamentales**.** L'organisation structurale des phyllo silicates se base sur une charpente d'ions O-2 et OH- .Ces anions occupent les sommets d'assemblages tétraédrique et (O-2 et OH-), dans les cavités de ces unités structurelle élémentaires viennent se loger des cations de taille variable (Si^{4+}, Al^{3+}, Fe^{2+}, Mg^{2+}) .

I.3.2. Elément tétraédrique :

Le tétraèdre de silice est formé de 4 atomes d'oxygène (O-2) au sommet du tétraèdre, il existe quatre ions d'oxygènes (O-2) enserrent un ion de silicium (Si^{4+}), équidistant à chacun d'eux. Ces tétraèdres, s'ordonnent entre eux pour former une couche tétraédrique (figure I.1) (Nebat,2016).

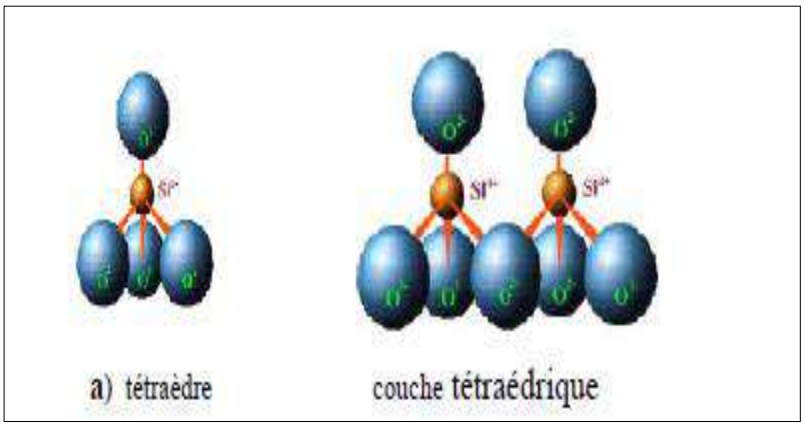


Figure I.1 : Couche tétraédrique des phyllosilicates

I.3.3. Elément octaédrique :

L'octaèdre d'alumine est constitué de 6 hydrox les entourant un atome d'aluminium Al^{3+}ou bien le magnésium.Mg^{2+} Ces octaèdres se combinent pour composer des couches

planes dites couches octaédriques, et la liaison avec la couche tétraédrique se fait au niveau des oxygènes (figure I.2) (Nebat ,2016).

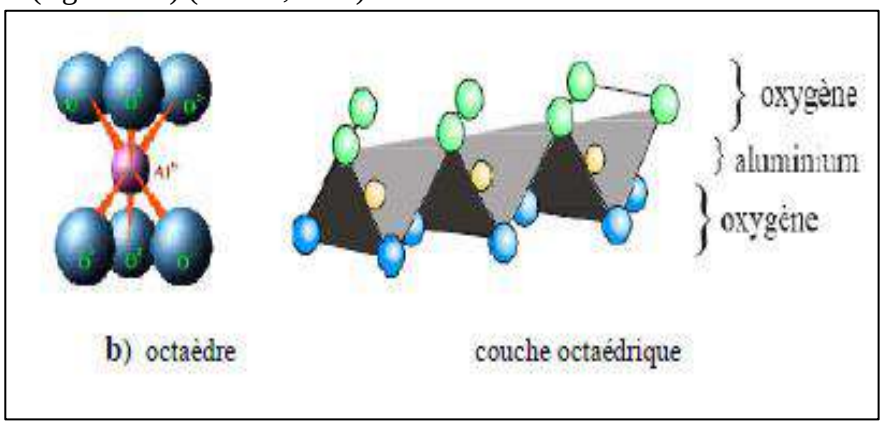


Figure I.2 : Couche octaédrique des phyllosilicates.

Tous les minéraux argileux sont constitués de feuillets tétraédriques et octaédriques. L'ordre dans lequel les feuillets sont empilés et les liens qui existent entre eux et les divers atomes, métalliques ou non, qu'on trouve à l'intérieur des structures fondamentales déterminent les différents types de minéraux argileux.

L'insertion des atomes dans les structures fondamentales peut se faire par substitution, lors de la formation des minéraux argileux. Les substitutions surviennent principalement dans les structures octaédriques, où les atomes d'aluminium sont le plus souvent remplacés par des atomes de magnésium ou de fer. Dans les structures tétraédriques, un atome d'aluminium peut parfois remplacer l'atome de silicium. Comme la plus part de ces atomes ont approximativement la même taille. Les structures fondamentales conservent sensiblement la Même forme c'est pour quoi on parle de substitutions isomorphes**.** Habituellement, les substitutions isomorphes se réalisent avec des atomes métalliques portant des charges électriques différents. Elles provoquent par conséquence un débalancement électrique à l'intérieur des structures fondamentales, favorisant ainsi l'apparition des charges électriques négatives à la surface des minéraux argileux. Ces charges sont en grande partie responsables de l'activité électrique des argiles, une activité qui en raison de ses origines chimiques, porte souvent le nom d'activité électrochimique**.** Plus la surface spécifique des particules et grand, plus le nombre de substitutions et grand. Il y a donc plus de charge électrique disponibles, et l'activité électrochimique des minéraux argileux et d'autant plus élevée .

(Robitaille et Tremblay ,1997).

I.4. Les différentes familles de minéraux argileux :

A partir des structures de base nous pouvons définir plusieurs familles d'argiles , selon le nombre de feuillets variable par particules et suivant le type d'argile considéré .Précisons

actuellement les propriétés principales des quatre grands groupes d'argile qui sont : La kaolinite et la smectite et l'illite et enfin chlorite.

I.4. 1.La kaolinite : (Si4O10)Al4(OH)8

La Kaolinite est constituée d'une succession de couches alternées de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). Elle est considérée comme un minéral argileux 1:1 (T-0). Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet octaédrique ne forment qu'une seule couche. Cette couche a une épaisseur d'environ 7 Å (0.72nm).

Les couches de base successives sont maintenues ensemble par les liens hydrogène formés entre les hydroxyles du feuillet en octaèdre et les atomes d'oxygène du feuillet en tétraèdre. Les liens d'hydrogènes sont très forts, ils empêchent l'hydratation, ce qui permet un empilement relativement important de couches et la formation d'un cristal d'assez grande dimension.(Gueddouda, 2011).

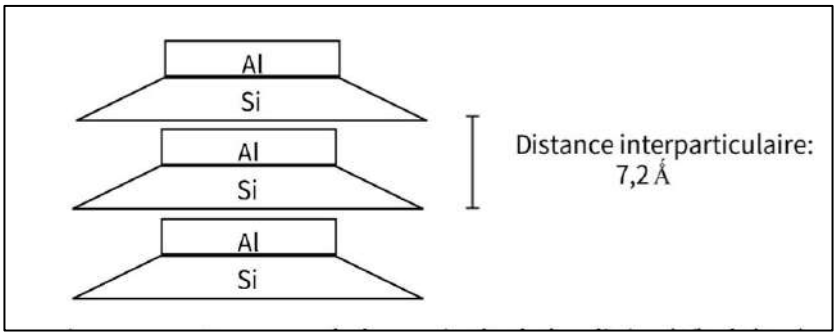


Figure I.3: Schéma de la particule de kaolinite (Michell, 1976)

I.4. 2.Smectite :

Une partie des atomes d'aluminium de la couche octaédrique est remplacée par des atomes de magnésium voire de fer (figure I.4) .La compensation des charges négatives excédentaires, s'effectue par l'introduction dans l'espace inter foliaire (espace séparant deux triplets consécutifs T O T) d'un cation (Ca2+,Na+). Ces cations inter foliaires ont la particularité de pouvoir être solvates par des molécules d'eau qui provoquent le gonflement du cristal. L'espace inter foliaire passe de 14 à 17 A° en présence de (Ca2+) et de 13 A° jusqu'à l'infini pour (Na+), Il existe plusieurs minéraux argileux dans le groupe des smectites, entre autres la montmorillonite. (Belabbaci ,2014)

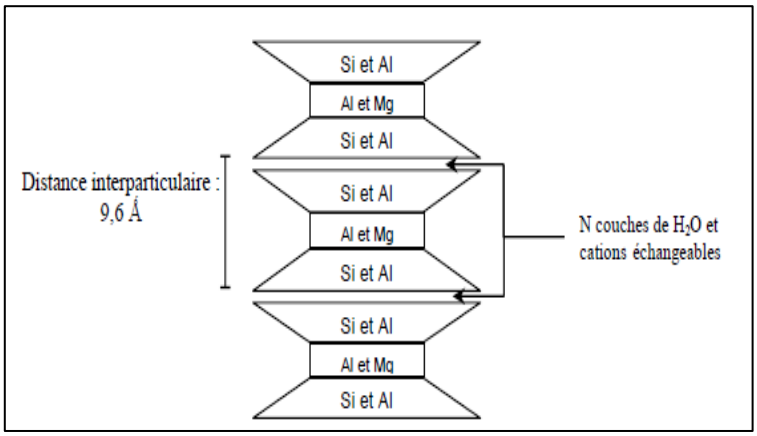


Figure 1.4 : Structure des smectites (OH)4 Si8 (Al10/3 Mg2/3)O20, n H2O

I.4. 3.L'illite (K, H2O)2 Si8 (Al, Fe, Mg)4,6 O20 (OH)

La structure de l'illite ressemble a celle de la montmorillonite puisque ses couches élémentaires, dont l'épaisseur atteint 1nm, sont elles aussi formées d'un feuillet octaédrique emprisonné entre deux feuillets tétraédriques.

Ce qui différé, ce sont les liens qui unissent les couches élémentaires: ils sont assurés par les atomes de potassium (K) (figures I.5). Bien qu'étant plutôt forts comparativement à ceux de la montmorillonite. Ils demeurent inférieurs aux liens d'hydrogène de la kaolinite. L'épaisseur typique de l'illite se situe donc entre celles de la montmorillonite et de la kaolinite, c'est-à-dire à environ 30 nm, bien qu'elle puise varier de 10 à 200 nm. (Robitaille et Denis ,1997)

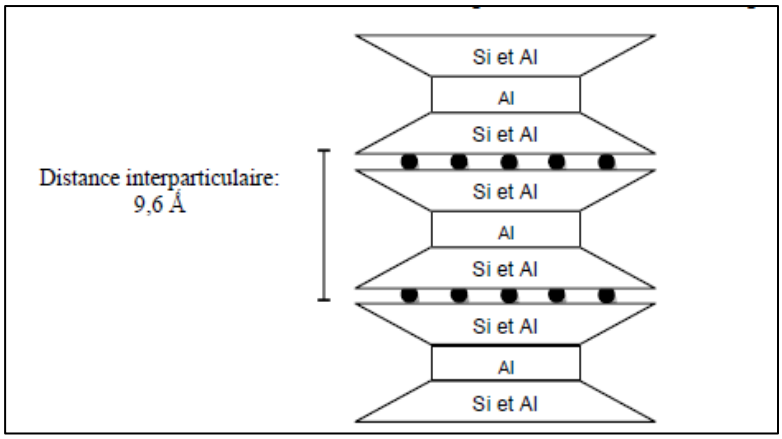


Figure I.5: Schéma de la particule d'illite (Michell, 1976)

I.4. 4. Montmorillonite :(OH)4Si8 (Al10/3, Mg2/3) O20, nH2O

La montmorillonite est un minéral argileux de type TOT dont le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Une substitution partielle de l'aluminium Al par le magnésium Mg est fréquente (figure I.6) .les forces de Van

der Waals sont faibles par rapport aux autres forces de liaison. Cela se traduit par une déficience en charge négative nette dans les feuillets en octaédre. Pour cette raison les ions échangeables peuvent pénétrer dans la structure et séparer les couches. La montmorillonite est donc caractérisée par une structure instable qui est affectée par la présence d'eau. Les plaquettes de montmorillonite ont une forme quelconque est de taille très petit. (Choufa,2013)

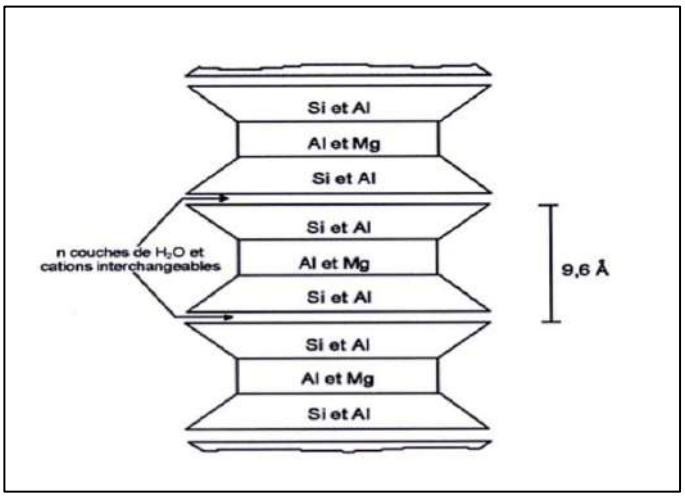


Figure : I.6: Schéma de la particule de montmorillonite (Mitchell, 1976).

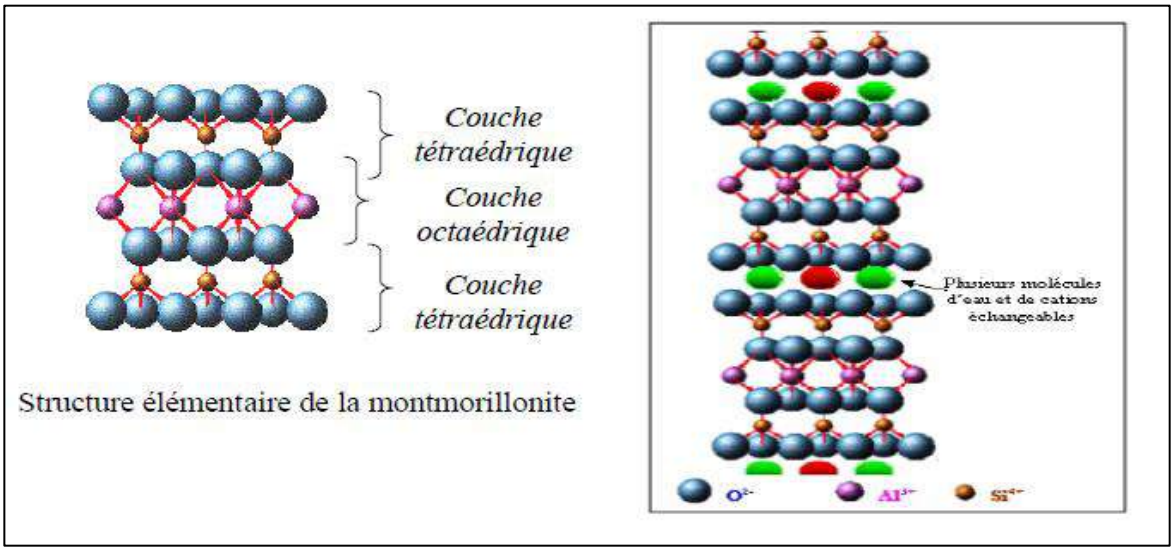


Figure I.7: Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (Gueddouda2011).

I.4. 5.Les chlorites : (OH)4(Si Al)8 (Mg, Fe)6 O20

Les chlorites représentent une structure analogue à celle des illites. L'espace interfoliaire comprend une couche continue plus stable d'hydroxydes de divers types (figure au-dessous) . L'équidistance réticulaire est de 1,4 nm. (Kebaïli , 2006)

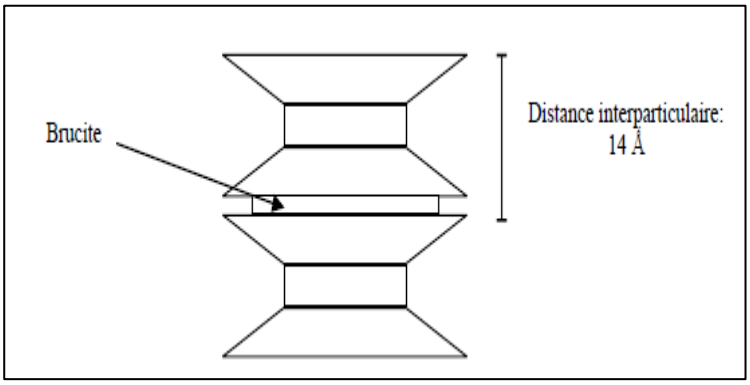


Figure I.8: Schéma de la particule de chlorite (Mitchell, 1976).

I.4.6.Interstratifiés :

Les minéraux interstratifiés se caractérisent par la superposition, selon un empilement vertical, de plusieurs types de couches. L'interstratification est due :

- aux liaisons fortes dans les couches individuelles mais faibles entre les couches,
- à la configuration proche de toutes les couches avec l'oxygène pointant vers l'extérieur.

Il s'agit de minéraux fréquents dans le milieu naturel et souvent négligés car difficiles à détecter et à quantifier par des analyses de diffractométrie aux rayons X (DRX). Les feuillets peuvent alors s'intercaler régulièrement ou irrégulièrement avec d'autres feuillets argileux, souvent illitiques, et avec des espaces gonflants. Parmi ces interstratifiés, on peut citer :

- les interstratifiés réguliers (figure I.9 a) : ils sont représentés par un empilement régulier de feuillets (structure A et B) qui se répètent de façon périodique,
- les interstratifiés irréguliers (figure I.9 b), représentés par un empilement aléatoire des feuillets (structure A et B) et ne présentant aucune périodicité. (Chretien .2010)

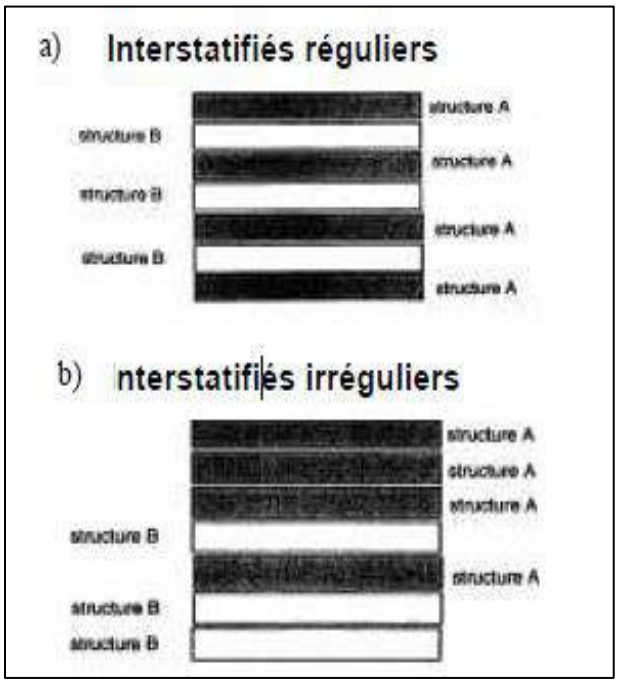


Figure I .9: Minéraux interstratifiés : (a) interstratifiés réguliers ,(b) interstratifié inrréguliers

Les propriétés bien particulières de ces différentes familles d'argiles sont conditionnées :

- par les propriétés structurales des minéraux tels que la charge des feuillets, le type et la charge des ions compensateurs, la taille et la surface spécifique des particules,
- par les conditions environnantes telles que la température, le climat, la nature de la roche mère, etc . (Chretien .2010)

I.5.Texture des sols argileux :

En géologie, la texture désigne la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux maturément groupés en une population au sein du matériau (Le Roux (1972). On distingue généralement trois niveaux structuraux des sols argileux (figure I.10):

-l'infrastructure qui correspond à la particule argileuse (empilement des feuillets),
-la microstructure qui correspond aux agrégats formés par l'assemblage des particules et autres éléments du sol, la macrostructure qui correspond à l'assemblage des agrégats. (Youdjari, 2010) .

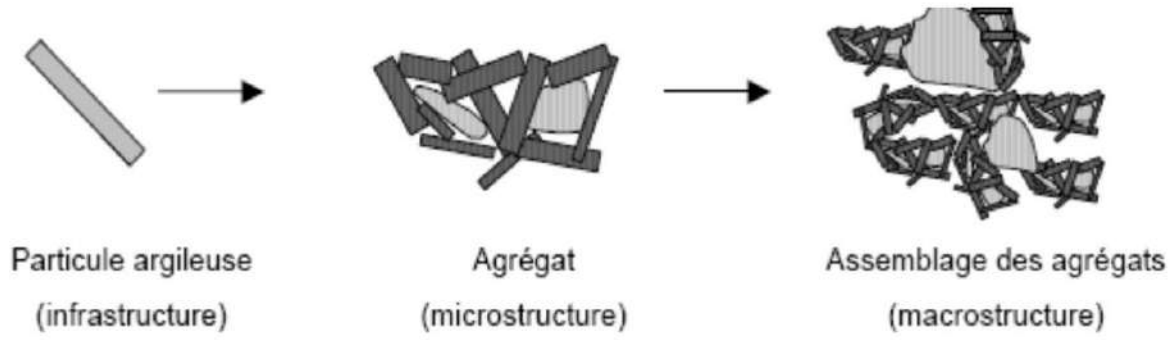


Figure I.10: Différents niveaux structuraux des sols gonflants (Gens et Alonso, 1992)

I.6. L'eau et les argiles :

I.6.1. Les différents types d'eau :

Le caractère dipolaire de la molécule d'eau lui confère la propriété d'être attirée par l'intermédiaire de ses extrémités positives à la surface négative des minéraux argileux. Cette attraction modifie les propriétés hydrodynamiques de l'eau et cela dépend de la distance entre les molécules d'eau et la surface argileuse.

Trois types d'eau, existant dans la matrice argileuse, peuvent être distingués:
- L'eau libre : C'est l'eau qui remplit les macropores entre les particules, elle peut être éliminée par séchage à l'étuve à une température de 105°C.

- L'eau liée : Cette eau occupe les espaces interfeuillets, elle est liée par des interactions chimiques et électriques et a besoin d'une température élevée (de l'ordre de 200°C) pour être éliminée. Sa densité et surtout sa viscosité sont plus élevées que celles de l'eau libre. Sa quantité totale dépend de la surface spécifique, de la densité de charge et de la capacité d'échange cationique des minéraux argileux.

-L'eau cristalline : Cette eau se situe au niveau des feuillets argileux et a besoin d'une température de 550°c pour être éliminée. (Ouadah, 2007)

I.7. principaux caractéristiques des minéraux argileux et l'eau :

De façon générale, l'eau n'a pratiquement pas d'influence sur le comportement des sols pulvérulents, par exemple, la valeur de la résistance au cisaillement d'un sable ne varie presque pas, qu'il soit sec ou saturé.

Il en va autrement pour les sols cohérant, dont le comportement peut être considérablement modifié par une variation de la teneur en eau. Quand le sol et sec, la cohésion entre les minéraux argileux est très forte, l'argile possède alors une résistance au cisaillement élevée et peut supporter de lourds charges sans se déforme. Si cependant ou augmente la teneur en eau, la cohésion diminue, de même que la résistance au cisaillement:

L'argile devient alors plastique et malléable. Si la teneur en eau continue de s'accroitre. L'argile devient très molle et à la limite, elle peut s'écouler comme un liquide épais, dans un tel cas la cohésion entre les minéraux argileux de même que la résistance au cisaillement sont pratiquement nulles.

Ces changements de comportement sont attribuables aux caractéristiques des films d'eau adsorbée qui entourent presque toujours chaque minéral argileux. Ces films d'eau sont constitués de molécules d'eau fortement attirées par les surfaces des particules. (Robitaille et Denis,1997)

1.7.1.Attraction entre les minéraux argileux et l'eau :

Le film d'eau adsorbée et maintenu à la surface des minéraux argileux par des forces d'attraction qui agissent entre les molécules d'eau et les particules d'argiles. Ces forces et dépendent principalement des quatre facteurs suivants :

- L'activité électrochimique à la surface des minéraux argileux,
- La polarité de l'eau,
- Les liens d'hydrogène de l'eau,
- Les cations présents dans l'eau.

a-.Activité électrochimique à la surface des minéraux argileux :

L'activité électrochimique de toute surface se manifeste par l'attraction qu'elle exerce sur d'autres particules chargées négativement ou positivement. Dans le cas des argiles, l'activité résulte de la présence, à la surface des particules, de charge négatives produites par les substitutions isomorphes, les surfaces recherchent une stabilité électrique ; elles attirent donc fortement les molécules dipolaires comme l'eau et les ions positifs appelés **cation**, contenus dans l'eau des sols.

b-Polarité de l'eau :

La polarité d'eau est engendrée par la disposition des deux atomes d'hydrogène et de l'atome d'oxygène formant la molécule d'eau (figure I.11). Bien qu'électriquement neutre cette disposition crée deux pôle un positif et un négatif, et les molécules d'eau sont attirées par la surface des minéraux argileux ou elles forment un film d'eau adsorbée.

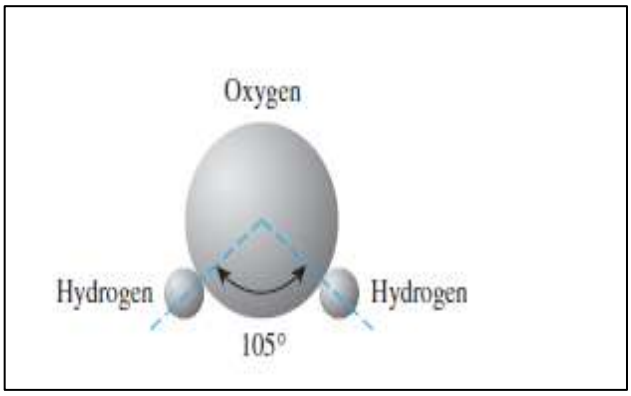


Figure I.11: Schéma de molécule d'eau .

c-Capacité d'échange cationique CEC

Les argiles ont la capacité de fixer de façon réversible des cations en solution. La capacité d'échange cationique correspond au nombre de charges négatives susceptibles de fixer des cations (Meunier, 2003). Elle s'exprime en cmol.kg-1 ou en milliéquivalents (meq) pour 100g. Voici quelques ordres de grandeur de la CEC pour des minéraux argileux (tableau I.1)

Tableau I.1 : Valeurs de CEC pour quelques minéraux argileux (en meq par 100 g). (Aissiou,2010).

Kaolinite	3-15
Halloysite 2H2O	5-10
Halloysite 4H2O	10-40
Montmorillonite	80-150
Illite	10-40
Vermiculite	100-150
Chlorite	10-40
Sépiolite-Attapulgite	20-30

En raison des différentes causes de la capacité d'échange cationique, certains auteurs diffèrent la CEC externe de la CEC interne.

- **La CEC externe**

bordures d'un feuillet, les valences du silicium et de l'oxygène en couche tétraédrique d'une part, de l'aluminium et de l'oxygène en couche octaédrique, d'autre part, ne sont pas saturées. Pour compenser ces valences, des molécules d'eau s'hydrolysent et il y a apparition de groupes silanol (Si-OH) ou aluminol (Al-OH) qui, en fonction du pH, peuvent capter ou libérer des protons. Ces derniers peuvent être échangés avec d'autres cations.

- **La CEC interne**

La plus fréquente est la substitution de Al^{3+} par Mg^{2+} dans la couche octaédrique. C'est le mécanisme principal d'échange pour une montmorillonite. Pour cette argile la distance entre les sites négatifs situés au niveau de la couche octaédrique et le cation échangeable situé à la surface du feuillet est telle que les forces d'attraction sont faibles. Des substitutions de Si par Al dans la couche tétraédrique sont également possibles. (Aissiou,2010).

d-La surface spécifique

La surface spécifique d'une argile S0 correspond à la somme de toutes les surfaces échangeables accessibles à un ion ou une molécule donnée. Ces surfaces sont présentes sur les faces basales et les bordures de cristaux avec des proportions qui varient selon le type de minéral et le pH. La valeur maximale de la surface spécifique d'un phyllosilicate est égale à la somme des surfaces de toutes les faces de chacun des feuillets élémentaires. Elle est exprimée en m²/g . (Ghayaza,2012)

Tableau I .2 : Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux, d'après (LEPLUART, 2002 cité par Belabbaci, 2014.)

Minéraux	**Surface interne (m^2/g)**	**Surface externe (m^2/g**	**Surface total (m^2/g)**	**CEC (milliéquivalent / 100g)**
Kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
Illite	20-55	80-120	100-175	10-40
Montmorillonite	600-700	80	700-800	80-150
Vermiculite	700-400	40-70	760	100-150
Chlorite	-	100-175	100-175	10-40

f- Densité de charge spécifique :

La densité de charge de surface noté « σ », et égale au nombre de cation compensateur par unité de surface. Elle peut évalue :

- Lorsque les valeurs de la CEC et de la surface sont connues, la densité de charge « σ » s'exprime par : σ (meq/m2) =CES .en unité S.I, la CEC est exprimée en coulomb/kg, et σ en coulomb/m2

La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux .L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraine l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur (Belabbaci,2014).

Conclusion :

Les sols argileux, sont très fréquents et couvrent une partie considérable du globe terrestre, qui est à l'origine des transformations biochimiques ou géochimiques des minéraux primaires qui proviennent de la fragmentation des roches maires.

La présence des minéraux argileux est à l'origine de certaines caractéristiques des sols fins : phénomène de double couche d'eau adsorbée, grande surface spécifique, etc.

La reconnaissance des caractéristiques des sols argileux est fondamentale pour résoudre d'énormes problèmes telle que le phénomène de gonflement, glissement , tassement ..etc.

CHAPITRE II
COMPORTEMENT DES ARGILES

II.1. Introduction :

Les phénomènes de retrait-gonflement de certains sols argileux induisent des tassements différentiels qui se manifestent par des désordres affectant principalement le bâtiindividuel. En géotechnique de l'environnement, les sols argileux sont utilisés dans les barrières ouvragées de voisinage des galeries de stockage de déchets en profondeurs. Ils constituent également les couches imperméables des casiers de stockage en surface. Il est admis qu'un matériau argileux voit sa consistance se modifier en fonction de sa teneur en eau : dur et cassant lorsqu'il est desséché, il devient plastique et malléable à partir d'un certain niveau d'humidité. Ces modifications de consistance s'accompagnent de variations de volume, dont l'amplitude peut être parfois spectaculaire. Dans ce contexte, l'objectif principal de ce chapitre est d'élaborer une synthèse bibliographique des résultats existant sur le phénomène du retrait-gonflement et le comportement hydromécanique des sols gonflants. Dans ce qui suit, les phénomènes de retrait-gonflement et les causes de la variation de volume des sols gonflants seront définis. Ensuite, les particularités liées à la structure de ces sols ainsi qu'une synthèse générale des mécanismes du gonflement et du retrait des sols gonflants seront présentées. Les spécificités du comportement hydromécanique des sols gonflants, les conséquences des sollicitations hydriques complexes, et l'influence du chemin de contrainte seront également étudiées. (Nowamooz , 2007)

II .2.Tassement :

La détermination de tassement des fondations est l'un des problèmes les plus importants de Physique des sols, sans qu'il y ait de tassements excessifs et de risque de rupture du sol. Quelques solutions numériques ont résolu le problème de tassement en tenant compte l'influence de la rugosité de la non associativité et qui n'impose pas la direction des plan de rupture, au contraire, ces méthodes permettent de vérifier le mécanisme de rupture sous la fondation.

Elles sont d'un emploi peu courant à cause de leur complexité de mise en oeuvre, lles sont cependant en train de généraliser.

Cette synthèse bibliographique nous a incité à utilise des outils numérique professionnels pressentent l'avantage de ne pas imposer des surfaces de rupture . (Helise, 2012)

II.2.1. Définition le tassement :

Le tassement du sol est sa déformation verticale due à l'application des contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son propre poids. Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place. Dans les sols non saturés les tassements sont presque instantanés mais dans les sols saturés, ils peuvent s'étendre sur quelques secondes dans les sols sableux-graveleux, jusqu'à plusieurs dizaines d'années dans les argiles peu perméables. Pour vérifier la conformité des structures vis-à-vis des conditions de sécurité et de service on doit faire un calcul de tassement.(Philipponat,2000)

II.2.2.Méthodes de calcul de tassement des fondations superficielles :

Le niveau de fondation ayant été décidé, on calcule la contrainte admissible du sol. On calcule également le tassement prévisible sous la fondation On vérifie que le tassement prévisible et inférieur ou égal au tassement admissible. Il existe deux familles de méthodes d'évaluation du tassement des fondations superficielles :

- Les méthodes basées sur les essais de laboratoire :

Il s'agit principalement de l'essai œdométrique. Cette méthode est utilisée surtout pour les sols fins cohérents ;

- Les méthodes basées sur les essais in situ :

Ces méthodes sont surtout utilisées pour sols pulvérulents à cause des difficultés de prélèvement de carottes.

1. calcule de tassement en utilisant la théorie de l'élasticité :

Le tassement s d'une fondation de forme circulaire, carrée ou rectangulaire, infiniment rigide (tassement uniforme) ou infiniment souple (contrainte uniforme), posée sur un massif semi-infini élastique linéaire et isotrope prend la forme générale suivante :

$$\mathbf{S} = \mathbf{q}\frac{\mathbf{1}-\boldsymbol{\nu}^{\mathbf{2}}}{E}\,\beta\,\mathrm{Cf}$$

2. calcule de tassement en utilisant les résultats de l'essai oedométrique :

À partir de la distribution avec la profondeur de la contrainte verticale sous la fondation (généralement estimée sur la base de l'élasticité linéaire isotrope), on calcule le tassement de consolidation unidimensionnelle bien connu Soed. Le calcul du tassement avec la méthode oedométrique se base sur la formule suivante pour chaque couche homogène

$$Soed = \Delta H = \frac{\Delta e}{1+e_0} H_0$$

3. calcule du tassement en utilisant les résultats de l'essai au pressiometre Menard :

La technique de calcul du tassement d'une fondation à l'aide des résultats d'un essai au pressiomètre Ménard que l'on expose dans ce paragraphe est basée sur les recommandations du fascicule 62 titre V.

Cette méthode est bien utile surtout pour les fondations étroites telles que les semelles de et d'ouvrages d'art. Elle n'est pas bien adaptée pour les fondations de grandes dimensions relativement à la couche compressible telles que les radiers et les remblais. Considérons une fondation ayant un encastrement supérieur ou égal à sa largeur *B*. (Helise ,2012)

II.3.gonflement des argiles :

Les matériaux susceptibles de gonfler sous l'action de l'eau sont les sols argileux naturels, les marnes, les roches argileuses et les roches composées d'anhydrite. Le processus de gonflement inter particulaire met en jeu séparément ou de façon combinée des phénomènes physico-chimiques et mécaniques variés. Il dépend aussi de la texture du matériau, c'est-à-dire de l'organisation des plaquettes entre elles .

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux (montmorillonites, saponites et autres natronites) ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse (Amri ,2011).

II.3.1.Types de gonflement :

Les minéraux argileux ont une structure ionique telle qu'ils interagissent fortement avec les molécules polaires de l'eau. A cet effet, plusieurs interprétations relatives au gonflement des argiles expansives sont postulées. A l'état actuel des connaissances, le processus de

gonflement des argiles est reconnu composer d'un gonflement interparticulaire et d'un gonflement intraparticulaire ou inter foliaire.

-Gonflement interfoliaire : éloignement des feuillets argileux. Ce gonflement est lié à la texture de l'argile.

– Gonflement interparticulaire : écartement des particules les unes des autres, ce qui affecte la structure du sol argileux.

II.3.1.1.Gonflement interfoliaire :

Le feuillet d'argile et défini comme étant l'arrangement de deux cristaux de base qui sont le silicate (Si) et l'alumine (Al). Ces deux éléments sont parfois remplacés par d'autres tels que le potassium (K), le sodium (Na) ou le chlorure (Cl) (figure II.1). Après infiltration de l'eau au sein des particules, celle-ci provoque un écartement des feuillets élémentaires. C'est le gonflement interfoliaire ou intra particulaire. Ce type de gonflement est spécifique aux argiles du groupe des smectites telles que la montmorillonite .

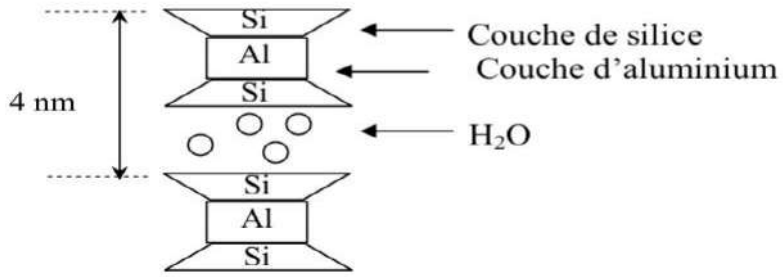


Figure II.1 : Schéma d'un gonflement interfoliaire (Mitchell,1976)

Le feuillet élémentaire d'une argile montmorillonitique possède à l'origine une épaisseur de 10A°. Il est constitué de deux plans tétraédriques et d'un plan octaédrique. Ce type d'empilement met en contact une fois sur deux couches d'atomes d'oxygène. Il en résulte un affaiblissement d'énergie de liaison entre les feuillets. En présence d'eau, les distances interfeuillets s'éclatent et l'ensemble augmente de volume. Le volume peut passer du simple au double. Ce type de gonflement présente la plus grande ampleur que ce soit en terme de pression de gonflement ou de pourcentage d'expansion.(figure II.2) montre deux photos prises au microscope électronique à balayage (la première avant gonflement et la seconde après gonflement interfoliaire .(Kebaïli , 2006)

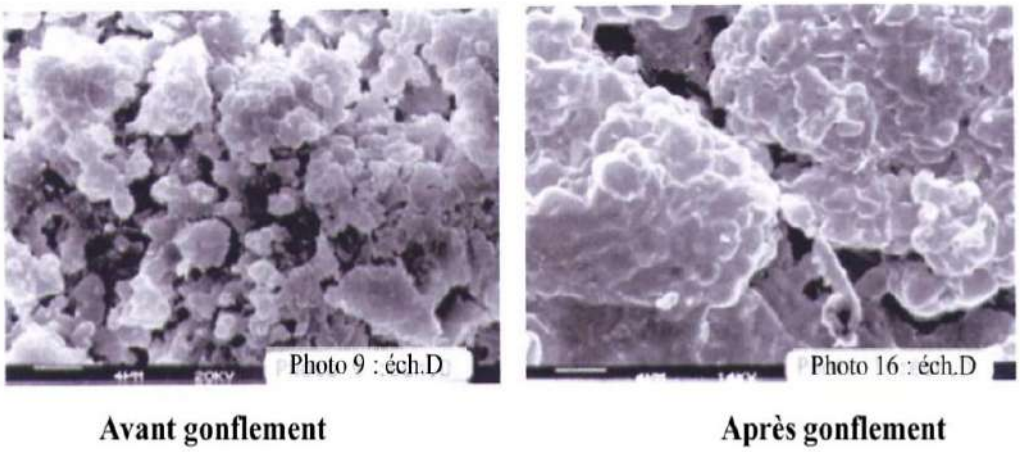


Figure II.2 : Obsevation au MEB d'une texture argileuse (Troalen et al,1984)

microscope électronique à balayages (MEB)

II.3.1.2.Gonflement interparticulaire :

Le gonflement interparticulaire se produit entre les particules argileuses. L'eau, en contact de ces particules, affaiblie les forces de liaison existantes. L'adduction supplémentaire d'eau au sein du milieu particulaire provoque une sorte d'immersion pour laquelle les particules argileuses baignent dans l'eau. L'augmentation de volume par écartement des plaquettes et groupes de plaquettes est nommé gonflement inteparticulaire. Ce type de gonflement, contrairement au gonflement interfoliaire, a une ampleur assez limitée, mais affecte toutes les argiles à des degrés différents.(La figure II.3) schématise les deux types de gonflement précités. (Kebaili 2006)

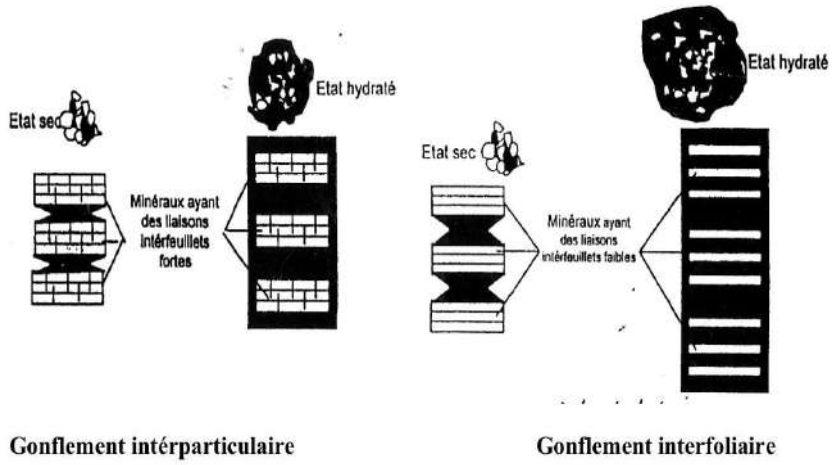


Figure II.3 : Gonflement des argiles par hydration (Kebaili 2006)

II.4.Définition des paramètres de gonflement :

On distingue deux paramètres de gonflement : la pression de gonflement et l'amplitude de gonflement. Ces deux paramètres dépendent des conditions dans lesquelles se déroule le gonflement et les méthodes de leur détermination (procédures d'essais et techniques d'interprétation). Ils ne peuvent pas être considérés comme des caractéristiques intrinsèques du matériau gonflant et ne peuvent donc pas recevoir de définition objective.

II.4.1.La pression de gonflement :

Pour un sol, dont l'état physique initial est connu, la pression peut être définie comme l'état de contraintes à exercer pour maintenir son volume constant pendant l'imbibition sans distorsion. Cette définition de la pression de gonflement est la plus utilisée

II.4. 2.L'amplitude du gonflement (ou gonflement libre) :

Le gonflement d'un sol, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale que provoque son imbibition sous un état de contraintes . (Amri ,2011)

II.4. 3.Le potentiel de gonflement (εg):

d'un élément de sol ou de roche, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale (Δh/h) que provoque l'imbibition de cet élément soumis à un état de contrainte nulle ou quasi-nulle jusqu'à sa saturation complète.

II.4.4.L'indice de gonflement (Cg) :

Traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport à un état de contraintes donné. La déformation par gonflement est obtenue au bout d'un temps d'équilibre. (Nowamooz, 2007)

II.5.Caractérisation des sols argileux à l'aide de l'essai oedométre :

II.5.1. Essai oedométriques :

L'essai de compressibilité à l'oedomètre a pour objet essentiel d'étudier la consolidation d'échantillons de sols intacts ou remaniés, soumis à des charges verticales, drainés suivant cette direction et maintenus latéralement par une paroi rigide , cet essai qui permet d'évaluer l'amplitude des tassements des ouvrages ainsi que leur évolution dans le temps.

Cet essai est une application directe de la théorie de la consolidation, qui consiste à appliquer sur l'échantillon une contrainte verticale uniforme et à mesure le tassement correspondant au cours du temps.

Le but de l'essai oedomètrique est de déterminer les relations entre les charges appliquées et les déformations obtenues, après consolidation. Les résultats de cet essai conduisent au calcul des caractéristiques relatives à la compressibilité .La courbe efforts-déformations obtenue à l'essai de compressibilité à l'oedomètre fournit également de précieux renseignement sur l'histoire du sol : sol normalement consolidé, sur consolidé ou sous-consolidé.

II.5.2. Courbes de l'essai oedométrique:

L'oedomètre peut être utilise pour déterminer deux type des courbes :

Courbe de compressibilité : Indique le tassement total en fonction de la contrainte appliquée.
Courbe de consolidation :Donne le tassement de l'échantillon en fonction du temps sous ($\Delta\sigma$) constant.

II.5.2.1.Courbe et caractéristiques de compressibilité :

Courbe de compressibilité:

- Échantillon saturé d'eau
- **Chargement :** On applique des contraintes normales successives croissantes (Exe 0.056; 0.2;0.4;0.8;1.6;3.2;6.4 et 12 (en 10^5Pa)

  Pour chaque palier et après stabilisation totale du comparateur on note le tassement celui ci est mesure $\left(\frac{\Delta H}{H}\right)$
- **Déchargement :**On décharge aussi par paliers successifs ; on mesure le gonflement du sol $\left(-\frac{\Delta H}{H}\right)$À partir des tassements et gonflement $\left(\left(\frac{\Delta H}{H}\right) et \left(-\frac{\Delta H}{H}\right)\right)$on peut mesure les indices des vides par la relation: $\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1+e_0}$

H: Épaisseur initial de l'échantillon

e0: Indice des vides initiale .

En effet

-comme la section est constante.

-comme les variations de volume ne viennent que des vides.

$$\frac{\Delta H}{H}=\frac{\Delta V}{V} \quad ; \quad \frac{\Delta Vt}{Vt}=\frac{\Delta V_v}{V_v+V_s}$$

$$\frac{\Delta H}{H}=\frac{\frac{\Delta V_v}{V_s}}{\frac{V_v}{Vs}+1} \; ; \; e_0=\frac{V_v}{V_s} \quad \text{Par définition} \quad \Delta e_0=\frac{\Delta V_v}{V_s}$$

$$\frac{\Delta H}{H}=\frac{\Delta e}{1+e_0}$$

Une fois les indices des vides connus pour chaque palier de chargement, on trace la courbe oedométrique qui sera formée de deux tronçons de courbe ; courbe de chargement et courbe de déchargement.

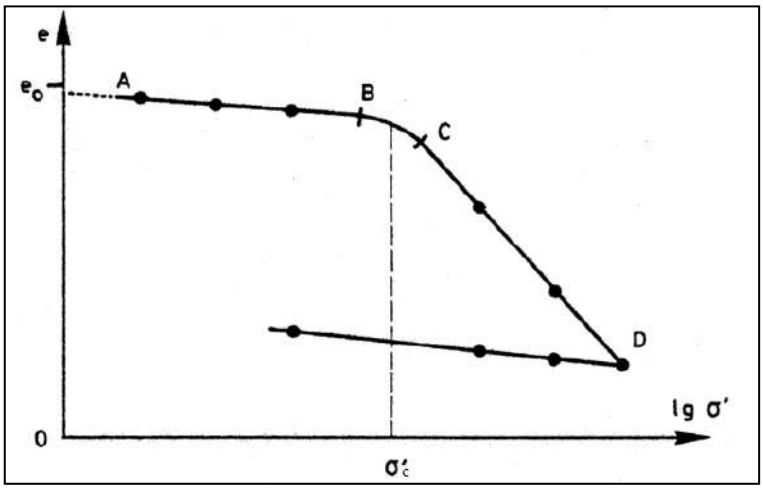


Figure II.4 : Courbe de l'essai oedométrique indice des vides e-Contrainte normale applique Coordonnées semi-logarithme (Ghayaza,2012)

II.5.2.2. Caractéristique de compressibilité:

a- Pression de consolidation (ou pré consolidation*):*

C'est la pression verticale effective maximale exercée sur le sol au cours de son histoire à l'endroit où a été prélevé l'échantillon correspond au " coude" de la courbe oedométrique.

b- Coefficient de compression Cc:

Le coefficient de compression Cc qui est par définition la pente de la tangente à la courbe vierge permet de préciser la sensibilité du sol au tassement le long de ce tronçon.

Cc permet de précise la sensibilité du sol au tassement le long de ce tronçon de courbe si l'on considère deux point M1 et M2 sur la tangente de la partie vierge, on aura

$$e_2 - e_1 = -Cc(\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1)$$

$$e_2 - e_1 = -Cc \log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}$$

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1+e_1} = \frac{e_2 - e_1}{1+e_1} \Rightarrow \left[e_2 - e_1 = \frac{\Delta H(1+e_1)}{H} \right] \quad e_2 - e_1 = \frac{\Delta H(1+e_1)}{H}$$

$$\Delta H = -H_1 \frac{Cc}{1+e_1} \log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \quad \frac{\Delta H(1+e_1)}{H} = -Cc \log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}$$

C'est le tassement d'une couche d'épaisseur H1 lorsque la contrainte normale applique passé de σ'_1 à σ'_2.Elle n'est valable que si σ'_1et $\sigma'_2 > \sigma'_c$.

c. Module oedométrique:

On peut représenter les résultats de l'essai de compressibilité à l'oedomètre en exprimant directement le tassement relatif $\frac{\Delta H}{H}$ en fonction de la contrainte normale appliquée.

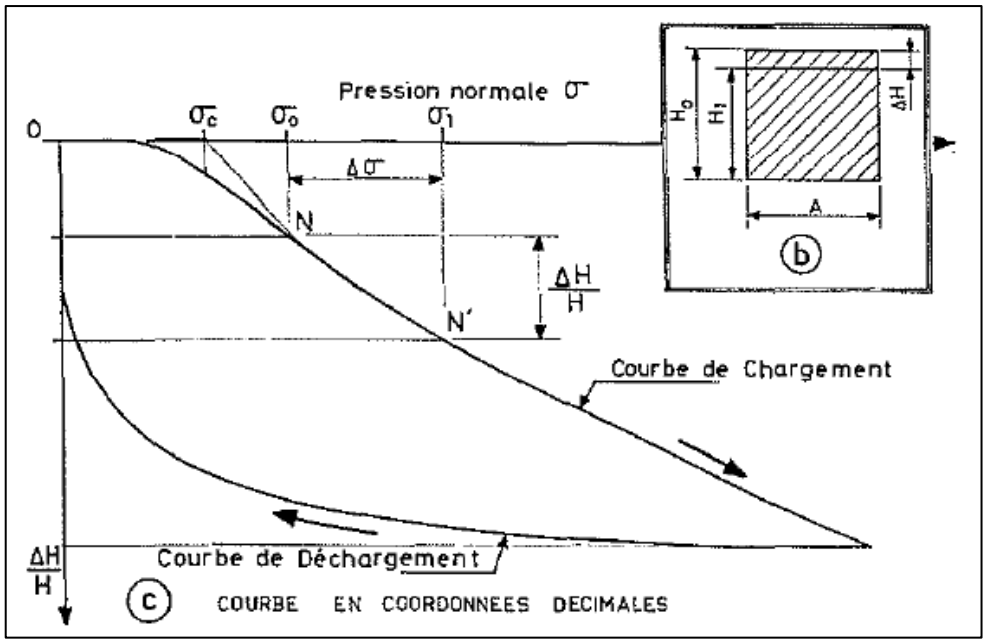


Figure II.5 : Courbe oedométrique tassement $\frac{\Delta H}{H}$ en fonction de la contrainte normale appliquée (Ghayaza,2012)

Soit N1 et N2 deux point de la courbe

$$E_0 = -\frac{\Delta\sigma}{\frac{\Delta H}{H}}$$

E0 : Représente la tangente de la N1N2

Le module oedométrique n'a pas de valeur constant, il dépond de la position de N1 et N2 , mais en pratique , il est possible sans grande erreur de considère un module oedométrique constant.

Du fait que $\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1+e_0}$

On peut écrire : $\mathbf{Eo} = -\frac{\Delta\sigma}{\Delta e}(1 + e_0)$

l'inverse du module oedométrique dans l'intervalle (N1,N2) est coefficient de compressibilité Mv

$$Mv = \frac{1}{Eo}$$

II.5.2.3.Courbe de consolidation

C'est une courbe qui traduit le tassement résultant à différents temps de consolidation, cette courbe est caractérisée par deux phases :

- Phase de la consolidation primaire : consolidation qui correspond à l'évacuation de l'eau interstitielle (serrage de grains).
- Phase de compression secondaire : après dissipation de la pression interstitielle, le squelette solide continu à tasser avec $\Delta u = 0$ (réarrangement des grains ou modification de la structure solide du sol relativement faible par rapport à la consolidation primaire)

La courbe de consolidation nous permet de calculé le coefficient de consolidation **Cv** défini par Terzaghi , et basé sur les hypothèses suivantes :

$$Cv = \frac{K}{m_v.\gamma_w}$$

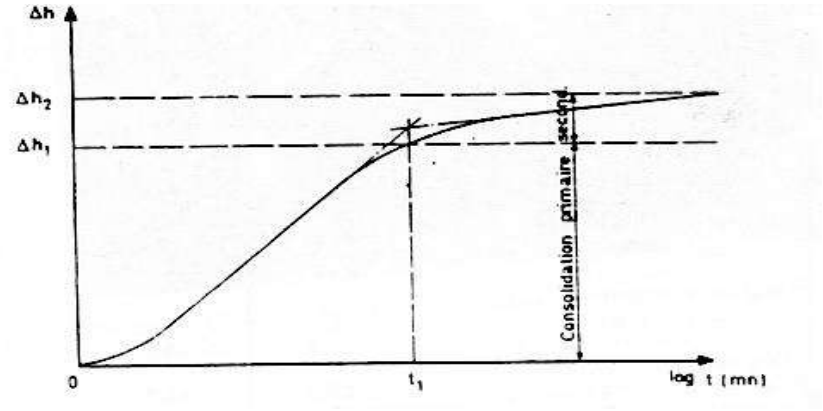


Figure II.6: Courbe de consolidation. (Gueddouda2011)

Détermination du coefficient de consolidation C_v

On utilise la méthode de Casagrande pour déterminer Cv ,Cette méthode consiste à tracer la courbe Δh= f (log*t)*.

On détermine $\Delta h_{(U=100\%)}$ le tassement obtenu à la fin de la consolidation primaire par construction graphique. correspond à l'ordonnée du point d'intersection entre la tangente à la courbe de tassement au point d'inflexion et la tangente à la partie finale de la courbe (voir la figureII .6). Le temps final de tassement de consolidation primaire t_{100} correspond à l'abscisse de ce point.

$\Delta h_{(U\ =\ 50\%)}$ correspondant au tassement à 50 % de la consolidation primaire, est égal à $\Delta h_{(U=100\%)}/2$.Cette valeur de $\Delta h_{(U=50\%)}$ est obtenue après un temps qu'on lit en abscisse du graphique (figure 5). C'est cette valeur de t_{50} (temps nécessaire pour obtenir 50 % de la hauteur de tassement) que l'on utilise pour calculer C_v .

Pour une consolidation réalisée à 50 %, la valeur du facteur temps est $T_v = 0{,}197$. La valeur de C_v est alors donnée par:

$$C_v = \frac{T_v \times \square^2_D}{t_{50}} = \frac{0{,}197 \times \square^2}{t_{50}}$$

II.5. 3.Essai de gonflement libre :

Dans l'essai de gonflement libre, l'échantillon, soumis à une faible pression correspondant au poids du piston et de pierre poreuse, est laissé en contact avec de l'eau. Puis, on ramène l'échantillon à sa taille initiale par paliers de chargement avec stabilisation des déformations sous chaque palier . La pression de gonflement est définie comme la contrainte qu'il faut appliquer pour que l'échantillon retrouve sa taille initiale. (Madjnoun, 2014)

II.5.4.Essais de gonflement parallèle:

La méthode des essais de gonflement en parallèle est employée pour éviter l'inconvénient de la stabilisation de chaque palier. Cette méthode consiste à mettre plusieurs éprouvettes dans différentes cellules oedométriques et cela pour un même matériau. Le chargement de chaque éprouvette est réalisé dans son état naturel jusqu'à une contrainte axiale bien choisie suivant un taux d'accroissement des charges défini au préalable .On procède à l'imbibition sous contrainte de chaque éprouvette jusqu'à la stabilisation des déformations, donnant lieu au gonflement ou bien à l'effondrement de chaque éprouvette . (Madjnoun, 2014)

II.5.5.Essai de gonflement a volume constant:

Le principe est de saturer une éprouvette tout en maintenant son volume constant. La pression nécessaire pour maintenir le volume constant à la saturation complète est la pression de gonflement. l'éprouvette est soumise avant humidification à une pression verticale voisine des conditions *in situ*, et ensuite saturée. Les déformations verticales sont empêchées en augmentant progressivement la charge appliquée avant l'effondrement. La pression de gonflement est alors la pression maximale appliquée. Il existe des cellules spécialement conçues pour effectuer des essais à volume constant. Elles sont équipées d'un capteur de pression permettant de déterminer l'évolution de la pression exercée par le sol au cours de l'humidification, la méthode de gonflement libre donne des valeurs de la pression de gonflement plus élevées, pouvant aller jusqu'au double de celles des autres méthodes. (Nowamooz ,2007)

Conclusion :

Cette partie a été consacrée à la description des comportement des argiles (tassement gonflants) ; Lors de la présentation des différentes méthodes de mesure des paramètres de gonflement.

La diversité de méthode empiriques et oedométriques reflète la complexité du phénomène de gonflement et la difficulté d'effectuer des mesures, et met en évidence les facteurs affectant le comportement de ce phénomène.

CHAPITRE III
PRÉSENTAION DU SITE

III.1. Introduction :

Le présent chapitre comporte l'étude géotechnique de site de l'étude se trouve Ain Al-jerda dans la commune de Draà Essamar Wilaya de Médéa à travers une campagne de reconnaissance géotechnique.

III .2. Situation géographique:

III.2.1. Situation géographique de wilaya :

La wilaya de Médéa est située au nord de l'Algérie, Le Chef-lieu de la wilaya est à 88 km à l'Ouest de la capitale Alger. Elle s'étend sur une superficie de 8.775,65 Km². La wilaya est une zone de transit principale et un trait d'union entre le Tel et le Sahara, d'une part, et entre les Hauts Plateaux de I 'Est et ceux de I 'Ouest, d'autre part.

III.2.2. Situation géographique de site:

Le site de l'étude se trouve Ain Al-jerda dans la commune de Draà Essamar .La commune de Draà Essamar est située dans le tell central Algérien dans l'atlas tellien environ 70 km au sud-ouest d'Alger et a 4 km à l'ouest de Médéa et a environ 32 km au sud-ouest de Blida et à 24km au nord de de Berrouaghia et à 71km a l'est d Ain Defla et 68 km au sud- est de Tipaza

.

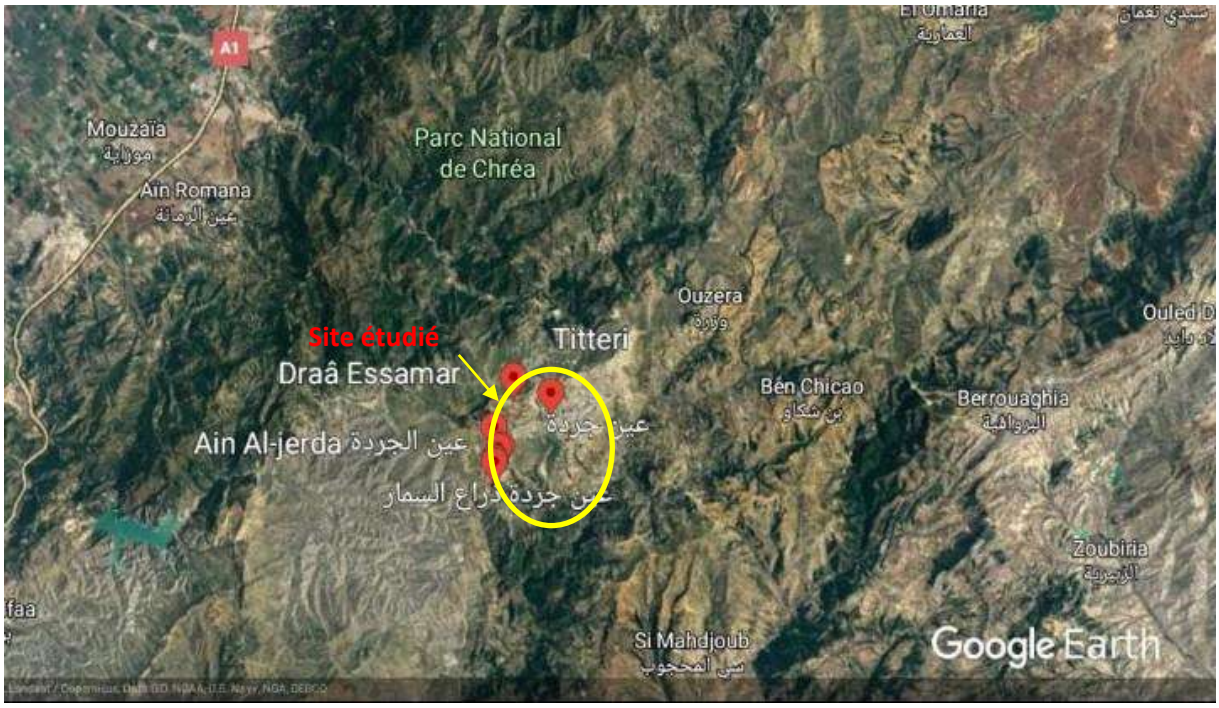


Figure III.1 : Situation géographique de Draà Essamar (Référence: GOOGLE EARTH)

III.3. La géologie de la région:

Sur le plan géologique, la région de Médéa appartient à la chaîne montagneuse de l'Atlas tellien et à l'extrémité nord des hauts plateaux. Les formations du crétacé sont généralement développées dans la partie nord de la wilaya et les dépôts du cénozoïque dans sa partie sud les grands ensembles géologiques de la région sont de haut en base.

II.3.1. Hydrologie de la région:

La wilaya de Médéa est subdivisée en 3 bassins versants principaux :

•Le bassin du Chlef, avec l'oued le plus important d'Algérie qui occupe la partie Sud Ouest de la wilaya (en partie) ; Ksar El Boughari.

•Le bassin de l'Oued Isser, est situé à l'Est de l'oued Chlef ; ces deux oueds ont une limite commune de bassin versant.

•Le bassin de la Mitidja, est représenté au niveau de la wilaya par l'oued Chiffa qui prend naissance au niveau de la région d'Ouzera, c'est l'oued le plus important de la Mitidja. IL se déverse dans l'oued Mazafran (Zeralda. W. d'Alger).

Tous ces oueds sont alimentés principalement à la faveur des précipitations atmosphériques et de sources surplombant ces oueds. Les nappes d'eau souterraines peuvent alimenter les oueds suivant les saisons puisque les relations oueds nappes existent.

Les oueds chlef, Isser et Chiffa peuvent être considérés comme les principaux collecteurs des eaux des bassins versants correspondants.

III.4. Caractéristique chimique et géotechnique :

L'objectif attendu par le programme de reconnaissance géotechnique est de permettre la reconnaissance des sols en place et de déterminer leurs caractéristiques géotechniques, dans cette partie on présente l'étude géotechnique du Projet qui a été effectuée en laboratoire géotechnique (M E Z A A D koutab -Médéa).

III.4.1 .Les essais chimique:

Dans le but de se prononcer sur l'agressivité ou non du sol, une analyse chimique a été réalisée sur un échantillon de sol extrait du site dont les résultats sont donnés au tableau suivant :

Tableau III.1 : Résultats des analyses chimique.

Sondage N°	Profondeur (m)	PH	Sulfates(mg /kg)	% Chlorures
SC N° 01	2.00-2.50	8.4	23395.9987	1.278

D'après l'analyse chimique, on remarque que notre matériau présente une prépondérance, un pourcentage 1.278 % de chlorures et un pourcentage 23395.9987mg /kg de Sulfates donc Les sulfates > 12000 mg/kg (Amri,2011) : les fondations nécessité une protection externe (enduits, peinture) ou interne (imprégnation) et L'utilisation du ciment CRS pour tous les ouvrages en infrastructure

III.4.2.Essais de laboratoire:

Une série des essais mécanique, physique a été effectué à partir des échantillons de terrain prélevés des puits et des sondages carottés, les essais de laboratoire suivants ont été

III.4.2.1. Les essais physiques :

a- Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau. Selon la taille des grains, cette analyse comprend deux opérations :

- Le tamisage : **NFP18-057**

L'analyse granulométrique par tamisage se fait pour les particules du sol de dimensions supérieures à ou égale à 80 micromètres (figureIII.2). Elle consiste à tamiser l'échantillon de sol sec de masse "m" par une série de tamis superposés de diamètres décroissants de haut en bas. On mesure les masses de sol retenues par les différents tamis (appelées refus) et on en déduit les masses de sol ayant traversé les tamis (appelés tamisas).



Figure III.2 : Granulométrie par tamisage série tamis

- La sédimentométrie: NFP18-057

L'analyse granulométrique par sédimentométrie se fait pour les particules de dimensions inférieures à 80 micromètres. Elle consiste à dissoudre un échantillon du sol dans une quantité d'eau et de le laisser se décanter (figure III.3). En se basant sur la loi de stocks, qui donne la vitesse d'une particule tombant sous l'action de la pesanteur dans un liquide visqueux, on calcul les diamètres des particules et les pourcentages y correspondants. De même que pour l'analyse granulométrique par tamisage, les résultats permettent de tracer la courbe granulométrique pour les diamètres inférieurs à 80 µm .La courbe d'analyse granulométrique de l'échantillon étudie est présenté sur la figure au-dessous.



Figure III.3 : l'analyse granulométrique par sédimentométrie

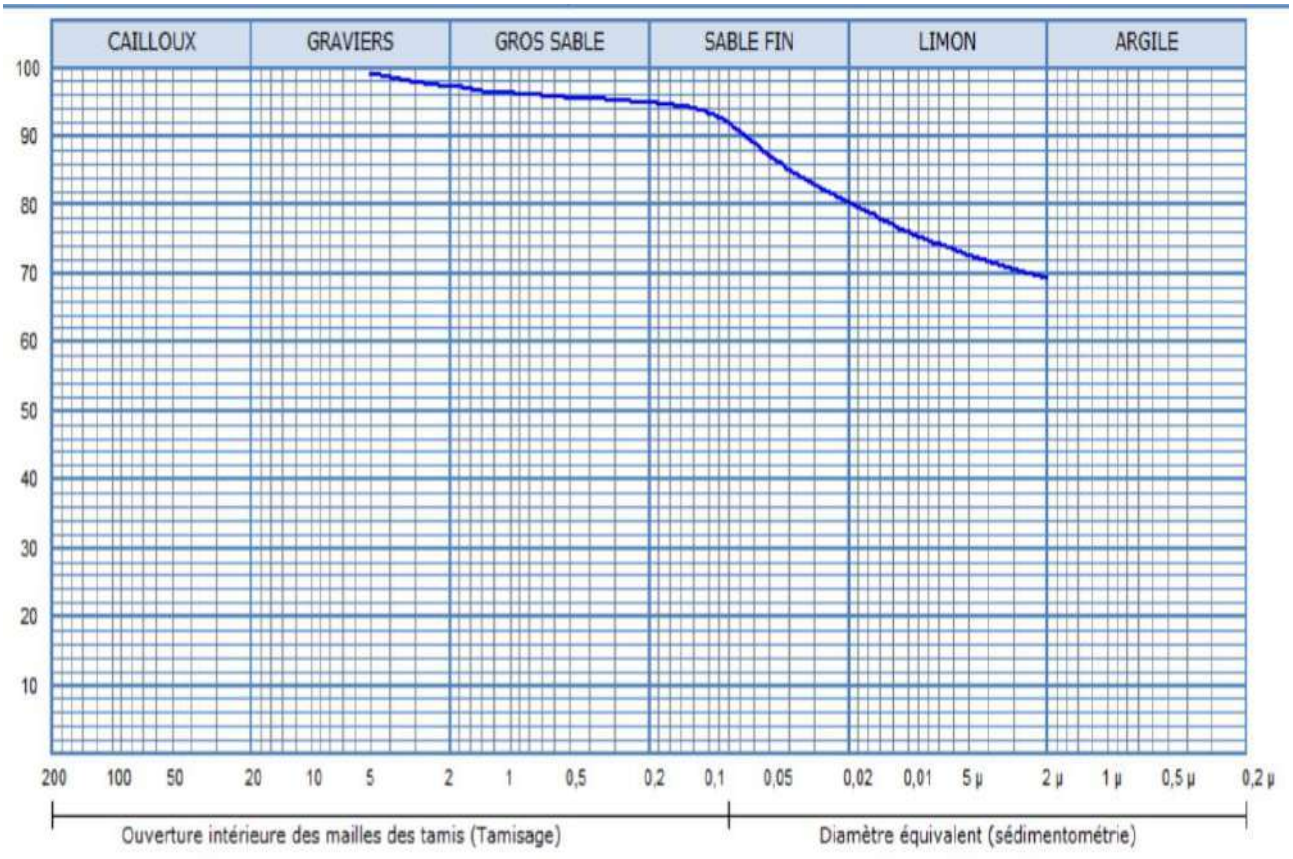


Figure III.4 :la courbe d' analyses granulométrique de l'échantillon étudié .

D'après la courbe granulométrique, l'échantillon est constitué de 94% de grains inférieurs 80 micromètre ce qui nous permet dire que cette échantillon représente un sol fins .

b-Les limites d'Atterberg : NFP94-051

Elles représentent des repères de teneurs en eau qui raffermissent la classification des sols du point de vue de leur plasticité ou de leur malléabilité. Cet essai se pratique sur la fraction de sol dont les particules ont une dimension inférieure à 0,40 mm. Si à un échantillon de sol préalablement desséché et pulvérisé, on fait croître la teneur en eau de façon homogène par malaxage, il passe progressivement de l'état solide, à l'état plastique puis à l'état liquide. Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre.

-Limite de liquidité (*Wl*) :

Teneur en eau à laquelle un sol cesse d'être plastique pour devenir liquide si on y ajoute de l'eau (état limite). Les sols sans cohésion ne prés entent pas de limite de liquidité telle que définie par cet essai. Cette limite est atteinte lorsque le sol se referme sur une longueur de 12 à 13 mm après être tombé 25 fois, dans une coupelle prévue à cet effet, à une fréquence de deux chutes par secondes et d'une hauteur de 1 cm.

-Limite de plasticité (*W*p) :

Teneur en eau à laquelle un sol cesse de présenter un comportement plastique pour devenir semi-solide si on continue à l'assécher. Les sols sans cohésion ne présentent pas de limite de plasticité. Cette limite est atteinte lorsqu'un rouleau de sol de 3 mm de diamètre commence à se fendiller à la manipulation.

-Indice de plasticité (Ip) :

Fourchette des teneurs en eau à l'intérieure de laquelle le sol demeure plastique ou malléable .Différence entre les limites de plasticité et de liquidité, soit :

$$IP = WL - WP$$



Figure III.5 :l'essai de limite de liquidité

La limite de liquidité **(*Wl*)** est calculée à partir l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales (N,W). **(*Wl*)** est obtenue pour une valeur de N égale à 25coups exprimée en pourcentage (%) (figure III.6)

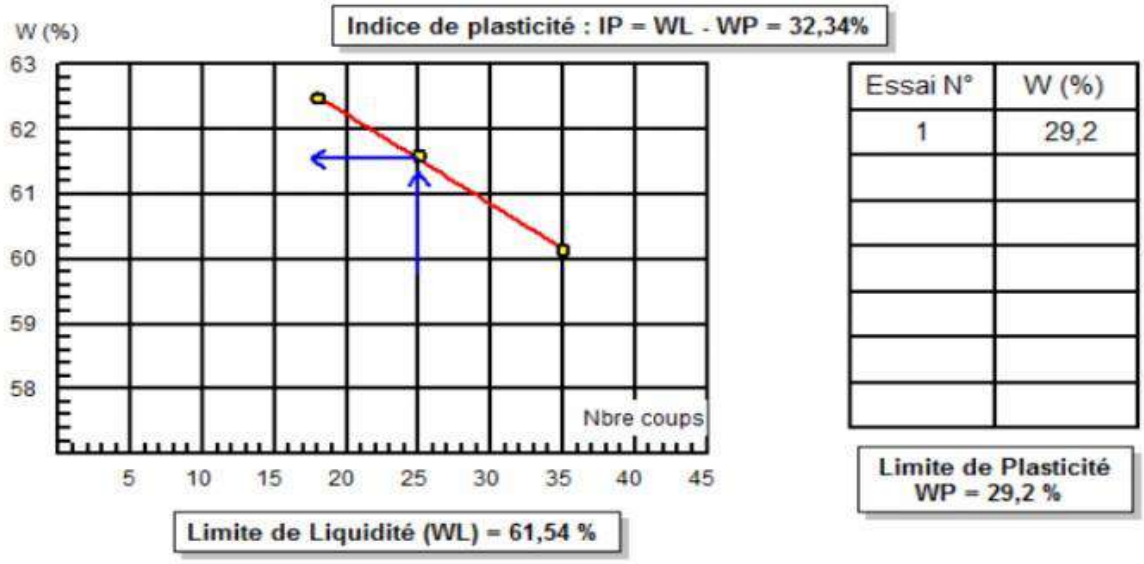


Figure III.6 : Les limite d'atterberge du matériaux argileux étudier

Le tableau III.2.ci-dessous résume les limites trouvées pour notre matériau d'étudie,

Tableau III.2: Résultatdel'essai limites d'Atterberg.

Les limites d'Atterberg	Limite de liquiditié	Limite de plasticité	Indice de plasticité
Résultats(%)	61.56	29.20	32.34

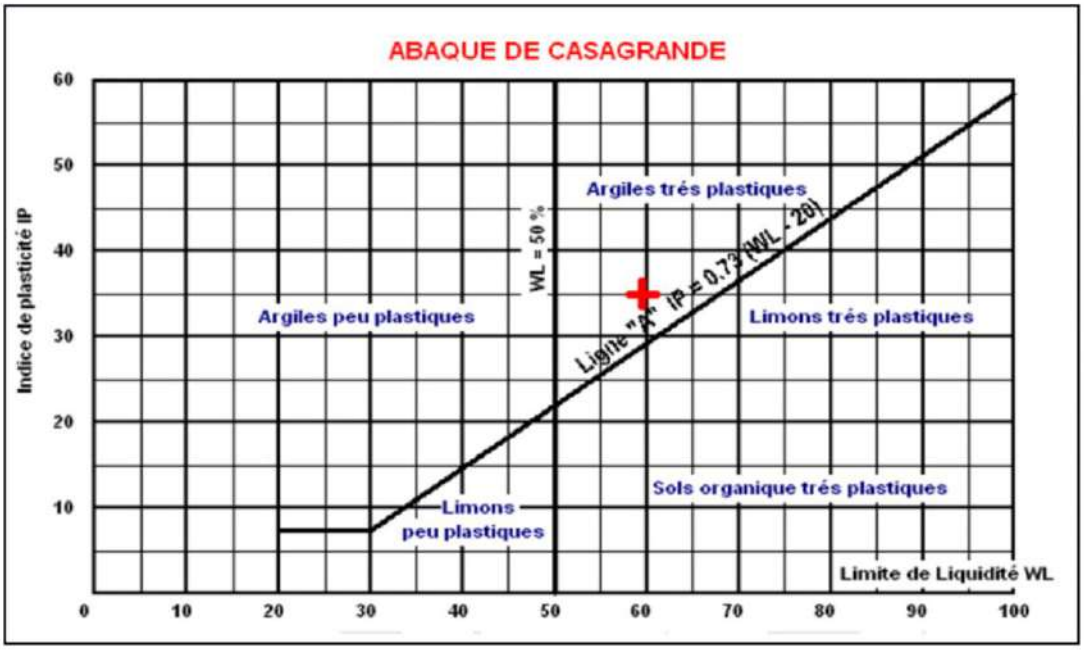


Figure III.7 : Abaque de Casagrande (Amri,2011)

D'après de CASAGRANDE (figure III.7) et les résultats des d'Atterberg ,on en déduite que le sol étudié est une argile très plastique .

III.4.3.2.Les essais mécaniques :

a-Essai de la boite de cisaillement : **NF P 94-071**

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boite de cisaillement constitue de deux demi-bottes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boites constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette.

L'essai comporte le cisaillement d'au moins trois éprouvettes de même dimension, préparées dans les mêmes conditions, cisaillées à la même vitesse mais soumises à des efforts verticaux différents, la(figure III.8) ci-dessous montre la procédure d'essai.

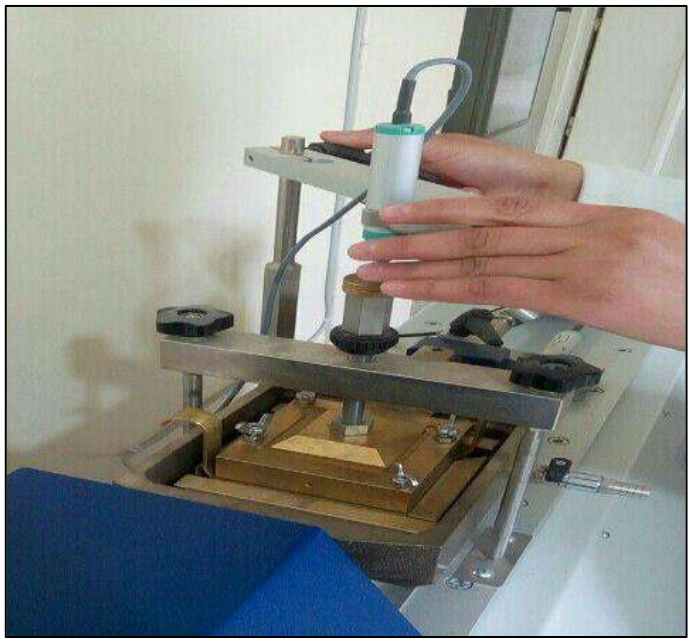


Figure III.8 : Essai de cisaillement rectiligne à la boite.

Le résultat obtenu de l'essai de cisaillement du matériau argileux est donné sur (la figure III. 9) et le tableau III.3

Tableau III.3 : Résultats des Cisaillement

Cisaillement rectiligne		
Type d'essai	c' (bar)	φ (°)
UU	0.73	17.81

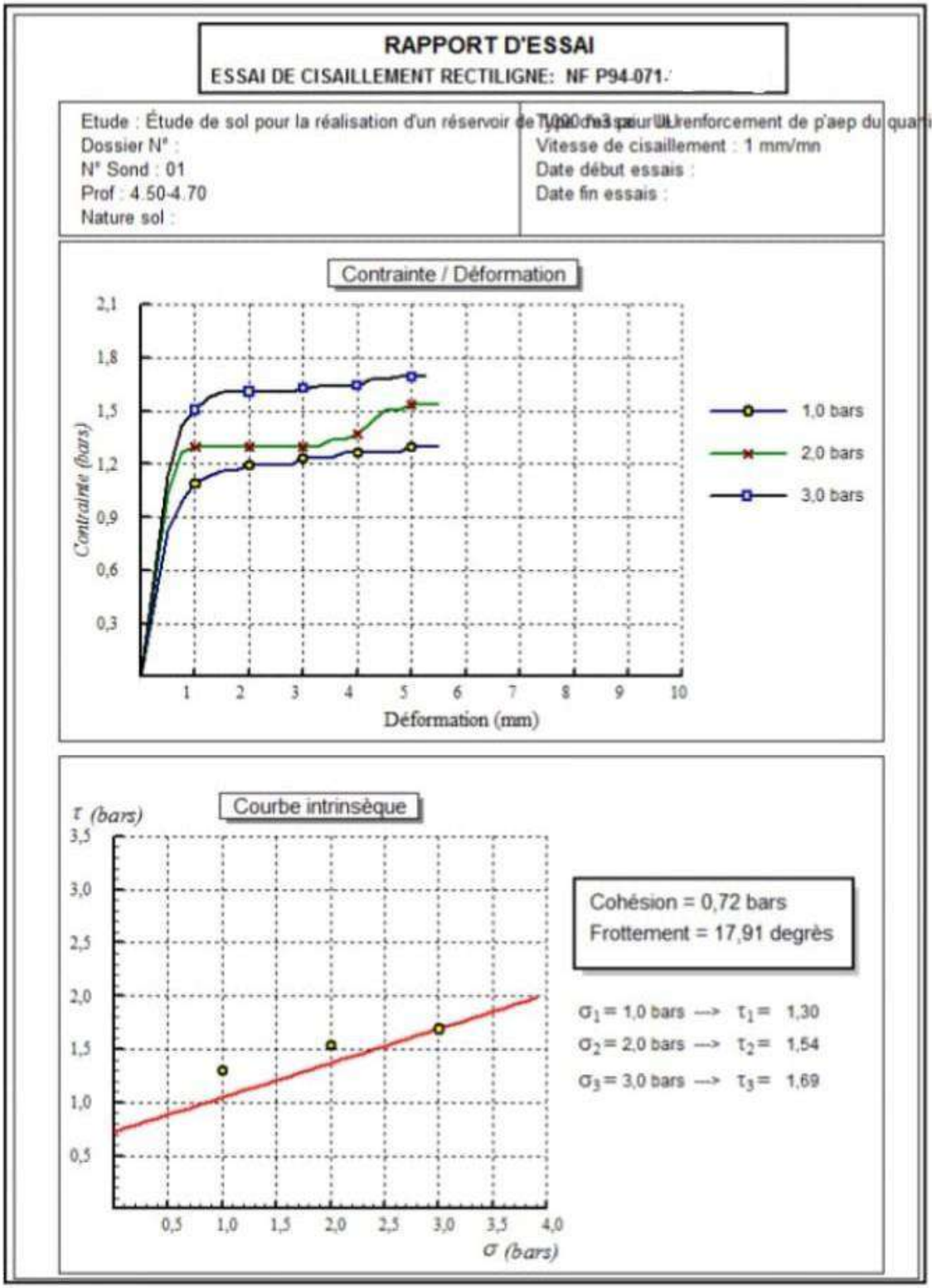


Figure III.9*:* La courbe contrainte normale en fonction de contrainte au cisaillement

D'après la courbe on remarque que le matériau étudié présente une cohésion de 0.72 bar, et l'angle de frottement égale à 17.91 de grès.

b-Essai oedométriques :

L'essai de à l'oedomètre a pour objectif essentiel d'étudier la consolidation d'échantillons de sols intacts ou remaniés, soumis à des charges verticales, drainés suivant cette direction et maintenus latéralement par une paroi rigide, par extension, on nomme "oedometrique " tout essai à déformation latérale nulle ε_x= 0.l'échantillon de sol est soumis à des charges verticale et il draine dans la direction verticale et on mesuré les tassements (déformations verticales), l'échantillon de sol saturé avant l'application des charges .La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissants et décroissants suivant un programme défini. Les variations de hauteur de ('éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.les diamètres des échantillons peuvent varie suivant le choix des cellules (50mm, 70mm,80mm).Le résultat de l'essai oedométriques est présenté sur la (figure III.10) .

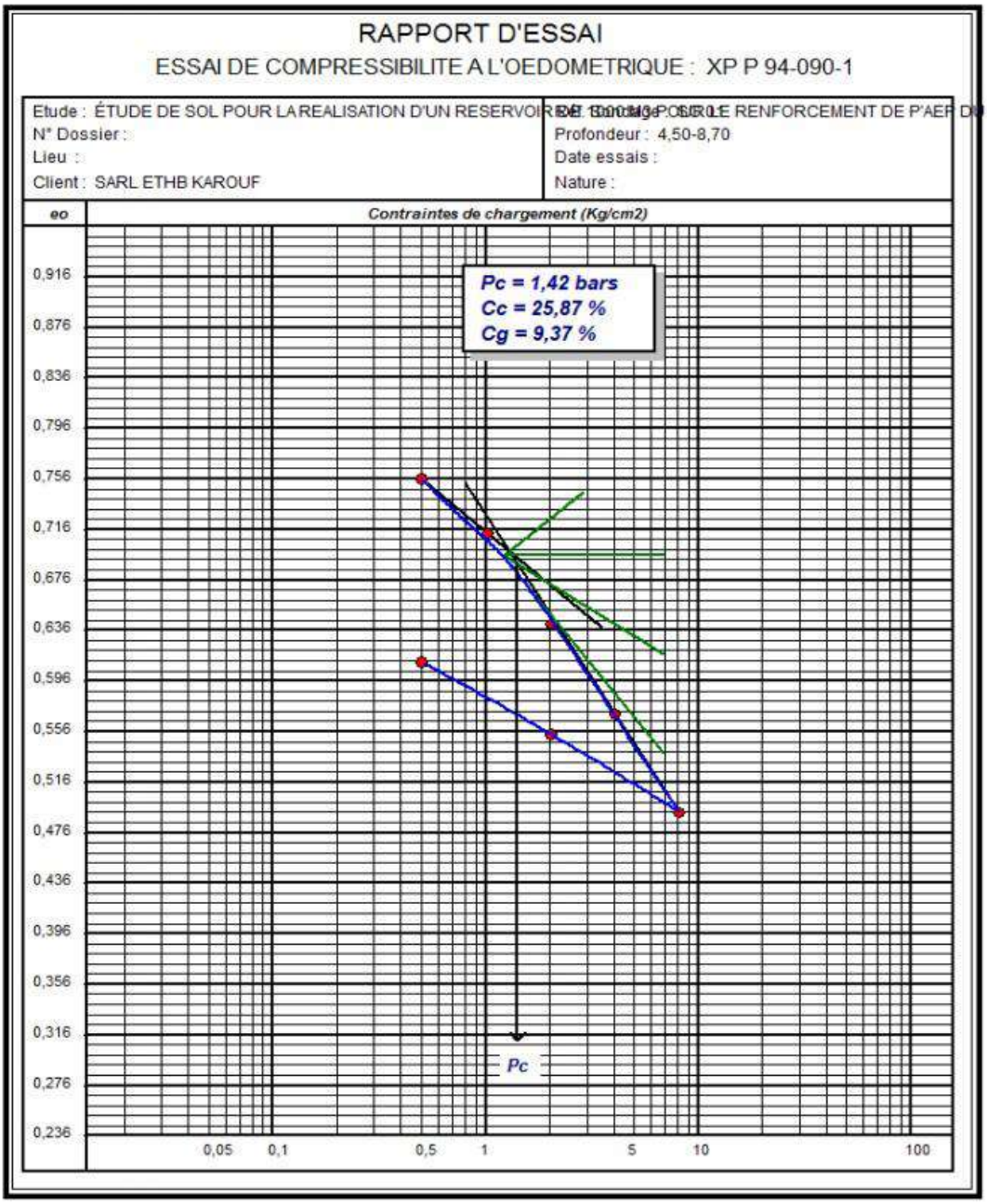


Figure III.10:courbe de compressibilité

Apres avoir effectué cet essai appelé essai de compressibilité à l'oedomètre on peut dire qu'il a pour objet essentiel d'étudier la consolidation d'un échantillon de sol soumis à des charges verticals, drainé suivant cette direction et maintenus latéralement par une patoi rigide .

II.4.3. Essais in-situ :

Pénétromètre dynamique lourd:

Le sondage au pénétromètre dynamique lourd consiste à faire pénétrer dans le sol par battage un train de tiges lisses, muni à son extrémité d'une pointe, à l'aide d'un mouton tombant d'une hauteur donnée. On compte le nombre de coups N correspondant à chaque enfoncement de 20 cm de la tige dans le sol. L'enfoncement en profondeur de la tige est fonction de la compacité du sol. Les résultats des essais sont représentés par des diagrammes donnant, en fonction de la profondeur, la résistance en pointe au battage Rp déduite de la formule des Hollandais .

le résultats de pénétromètre dynamique de notre échantillon est présenté sur la (figure III .11) montrent que :

- Une certaine homogénéité, sur le plan résistance est constatée, justifiée parla superposition des différents diagrammes pénétromtriques.

- Les courbes pénétrometrique des trois sondages réalisés dans ce site

- Présent une bonne résistance en pointe Rp à partir de (1.2) mètre de profondeur .

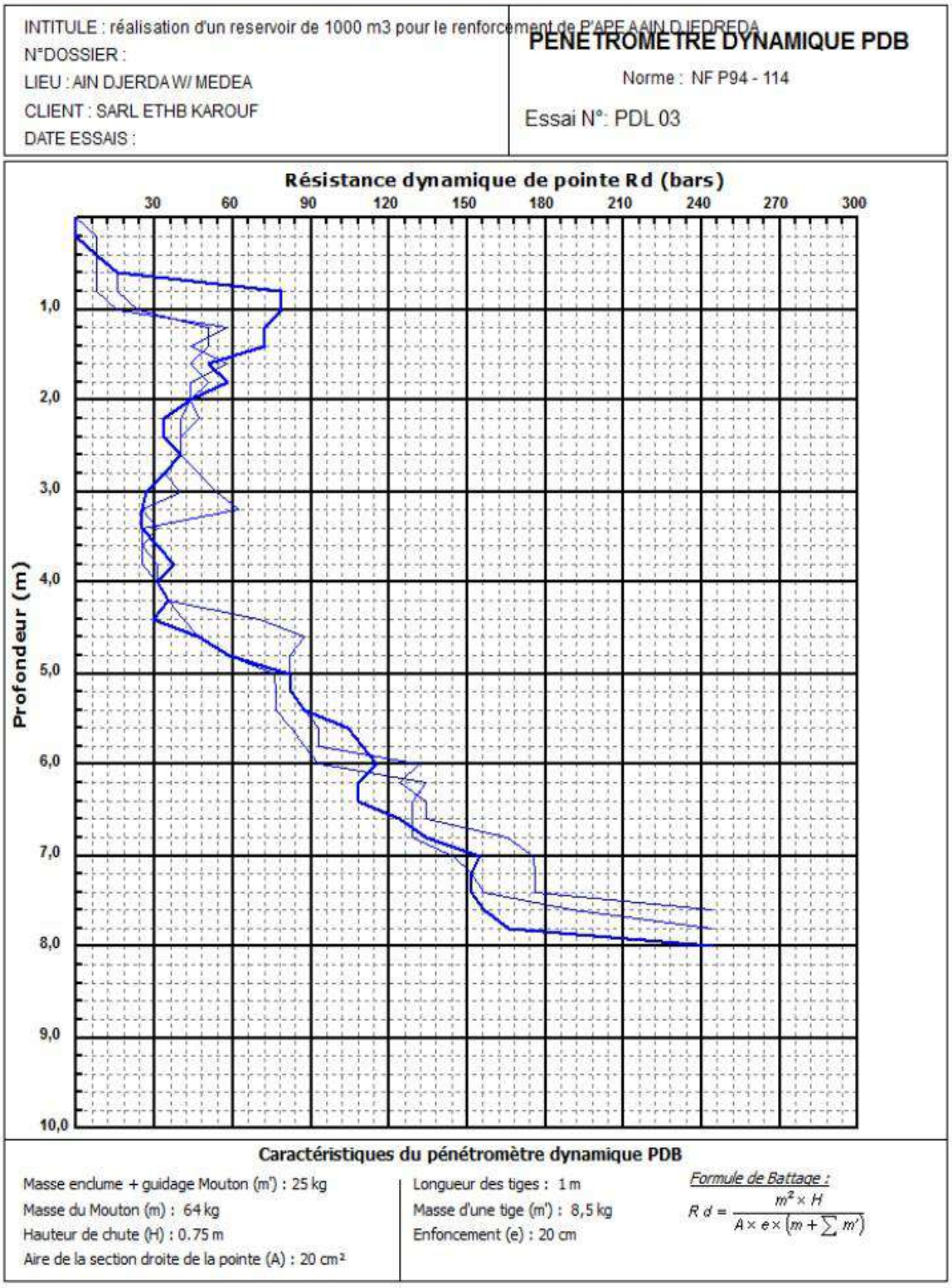


Figure III.11: Graphe de pénétromètre dynamique lourd noté **PDL**

Conclusion :

L'observation du déroulement des travaux et l'analyse des résultats de reconnaissance géotechnique permettent de tirer les conclusions suivantes :

• Les résultats des essais d'identification (granulométrie, teneur en eau, limites d'Atterberg), ont permit de mettre en évidence des sols fins à très fin.

• L'indice de plasticité, montre un sol très plastique selon la classification USCS des sols fins.

• Les valeurs de gonflement montrent une grande sensibilité à l'eau de ces sols.

• Les résultats des analyses chimiques obtenus, montrent la présence des gypses marquée par les sulfates.

CHAPITRE IV

ANALYSE NUMERIQUE DU TASSEMENT D'UNE ARGILE SOUS L'OEDOMETRE

IV.1.Introduction

Dans cette partie, on essaye de présenter la méthode de la simulation numérique des essais expérimentaux de consolidation par le logiciel d'éléments finis Plaxis. L'analyse du comportement des sols est faite par une simulation numérique des essais de compressibilité l'oedomètre ,l'aide le logiciel Plaxis pour effectuer cette analyse. , c'est un logiciel aujourd'hui couramment utilisé en bureaux d'études. Conçu par des géotechniciens numériciens de l'université de Delft aux Pays-Bas dans les années 1980, le code de calcul éléments finis PLAXIS est un outil pratique d'analyse d'ouvrages et d'essais géotechniques. Si ce code a initialement été développé pour analyser les digues et les sols mous, son champ d'application s'étend aujourd'hui à une large gamme de problèmes géotechniques. Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élasto-plastiques, élasto-viscoplastiques en 2D ou 3D et en grands déplacements par la méthode lagrangienne actualisée. Très fiable sur le plan numérique, ce code fait appel à des éléments de haute précision, tels que les triangles à15 nœuds, ainsi qu'à des pilotages de résolution récents comme la méthode de longueur d'arc . (Aouati et Rahim ,2015)

IV.1.1 Les points forts de Plaxis:

- La convivialité de l'interface pour la saisie des données et pour l'interprétation des résultats
- Générateur automatique de maillage ;
- Jeu complet de lois de comportement de sol et la possibilité de définir ses propres lois de comportement ;
- Couplage avec les calculs d'écoulement et de consolidation ;
- Prise en compte des éléments de structure et de l'interaction sol-structure ;
- Calculs de coefficient de sécurité.

IV.1.2 Présentation du cas étudié

Le but de cette partie est de proposer un modèle géotechnique pour l'essai oedométriques à l'aide de logiciel d'elements finis Plaxis , Elle permet de mettre au point une procédure prévisionnelle d'estimation des paramètres de compressibilité.les propriétés physique et mécanique du sol sont donné dans le tableau 4.1

Tableau IV.1: des caractéristiques physique et mécanique

Les Paramètre géotechnique	Les valeurs
Densité humide (kPa)	19.1
Densité sèche (kPa)	12.7
La cohesion (kPa)	73
Angle de frottement (°)	17.81
Kx(m/s)	1E-9
Ky(m/s)	1E-9
Module d'élasticité (kPa)	4208

IV.2.La géométrie du modèle

La modélisation des essais de consolidation est conduite en utilisant un seul modèle géométrique ayant pour dimensions 50 mm de largeur qui signifie le diamètre de l'échantillon, et de 19.8 mm de hauteur en condition axisymétrique (**Figure.IV.1)** .

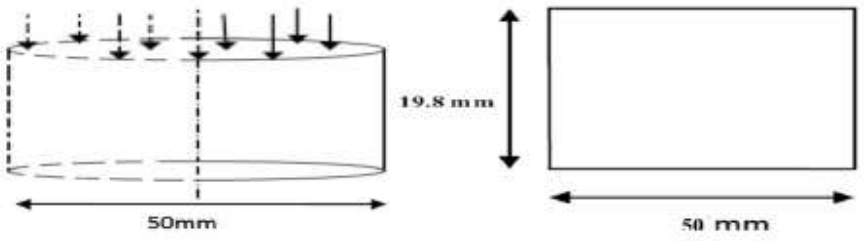


Figure.IV.1: Représentation schématique de la bague.

En ce qui concerne le déplacement à la base est bloqué selon la direction x ($u = u_x = 0$) et la direction verticale y le mode est libre ($u_y = 0$), ce qui explique que les déformations latérales sont nulles.

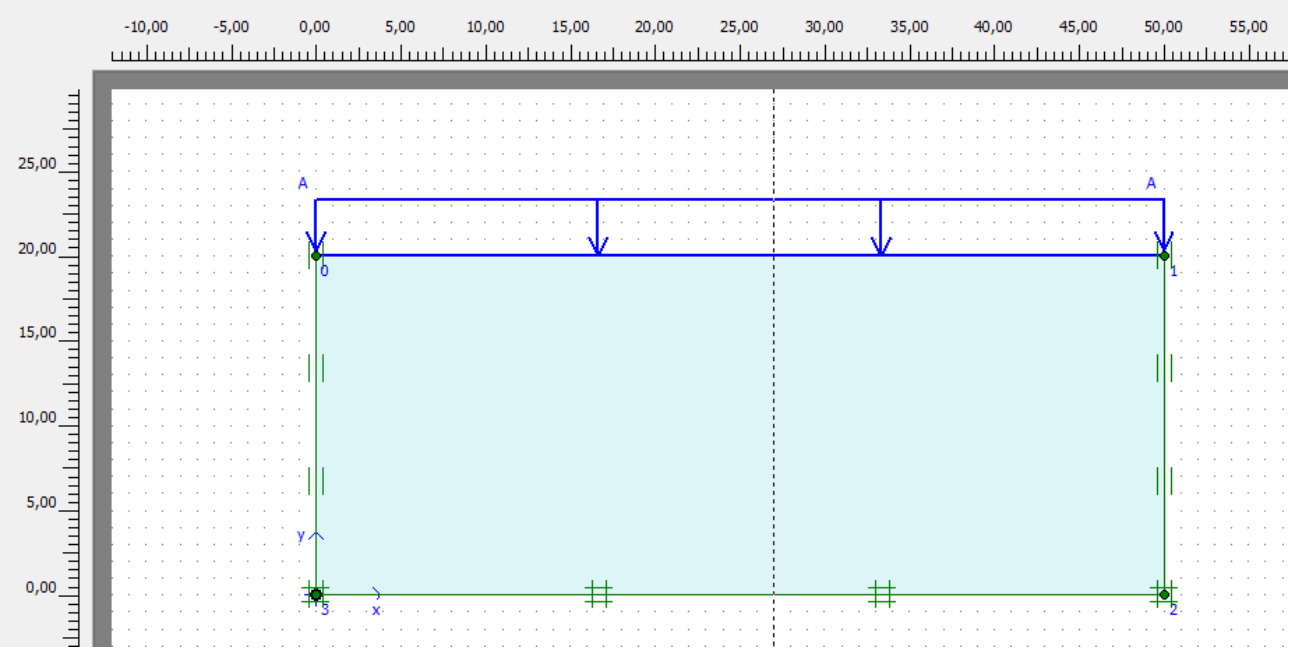


Figure IV.2: Modélisation de la géométrie (consolidation unidimensionnelle).

IV.3.Maillage:

Lorsque le modèle de géométrie est entièrement défini et que les propriétés du matériau sont attribuées à tous les clusters et objets structuraux, la géométrie doit être divisée en éléments finis afin d'effectuer des calculs d'éléments finis. Une composition d'éléments finis s'appelle une maille. Le type de base de l'élément dans un maillage est l'élément triangulaire à 15 nœuds ou l'élément triangulaire à 6 nœuds, l'élément choisi dans cette étude est le triangle à 15 nœuds qui fournit une interpolation du quatrième ordre pour les déplacements et une intégration numérique qui se fait sur douze points de Gauss (points de contrainte). PLAXIS permet une génération de maille entièrement automatique de mailles à éléments finis. La génération du maillage est basée sur une procédure de triangulation robuste, qui se traduit par des maillages «non structurés». Ces mailles peuvent sembler désordonnées, mais la performance numérique de ces mailles est habituellement meilleure que pour les maillages réguliers (structurés). Le maillage de modèle étudié est donne sur la (figure IV.3)

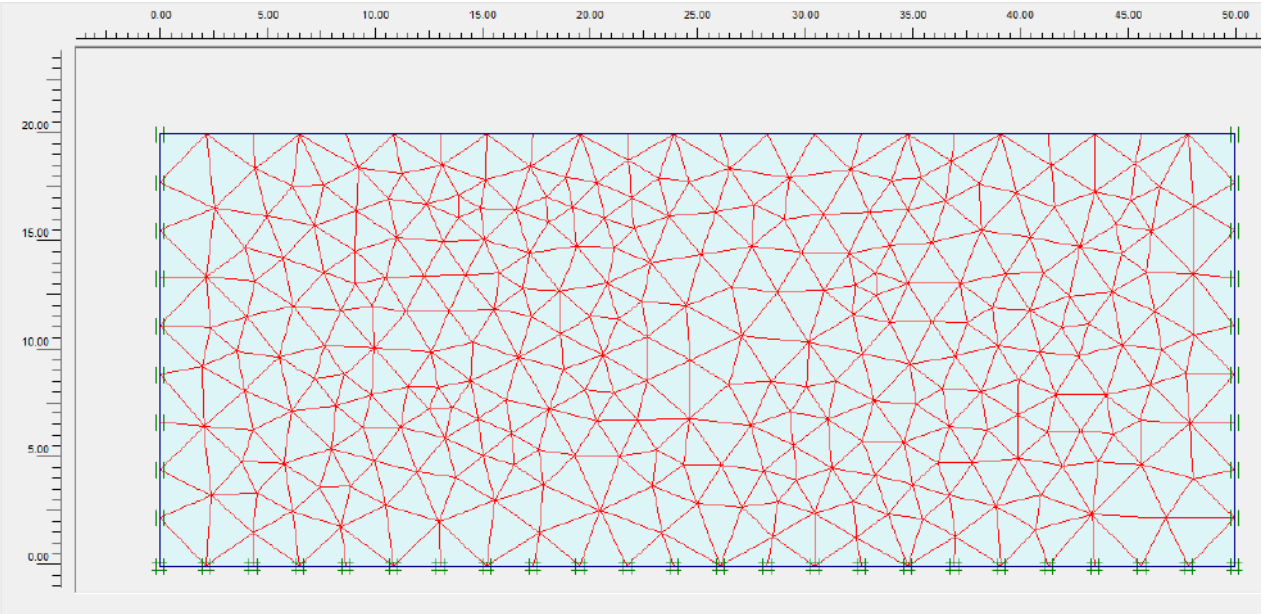


Figure IV.3: Maillage du modèle.

IV.4.Génération des contraintes initiales

Les conditions aux limites hydrauliques sont montrés dans la surface et les deux côtés de l'échantillon sont non drainées pour cela on utilise la frontière de consolidation fermée, en d'autres termes, l'eau ne peut pas s'écouler à travers ces limites. Par contre, le bas de l'échantillon est drainé, donc l'eau peut s'échapper à travers cette limite.

L'échantillon est complètement saturé, le niveau de la nappe phréatique coïncide avec la surface de l'échantillon (figure IV.4)

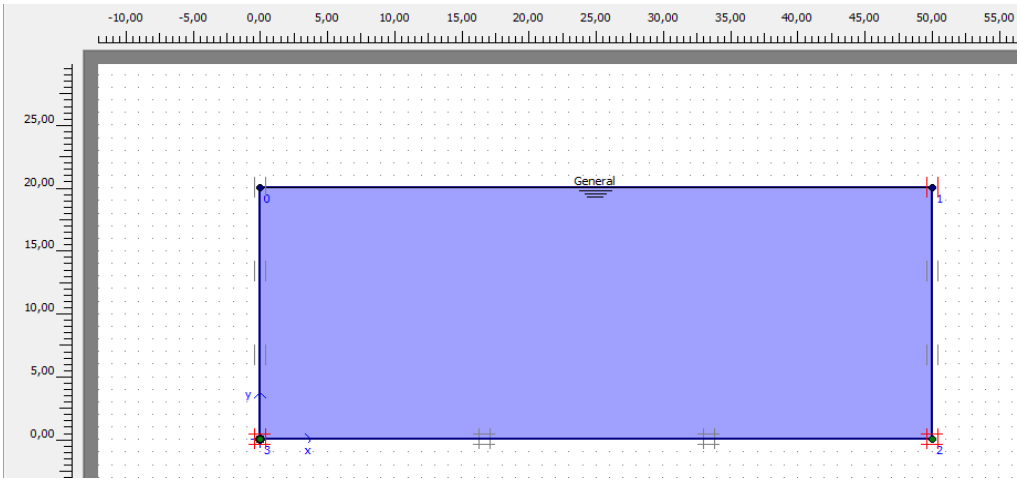


Figure IV.4: Condition aux limites en la nappe phréatique et d'échappement d'eau.

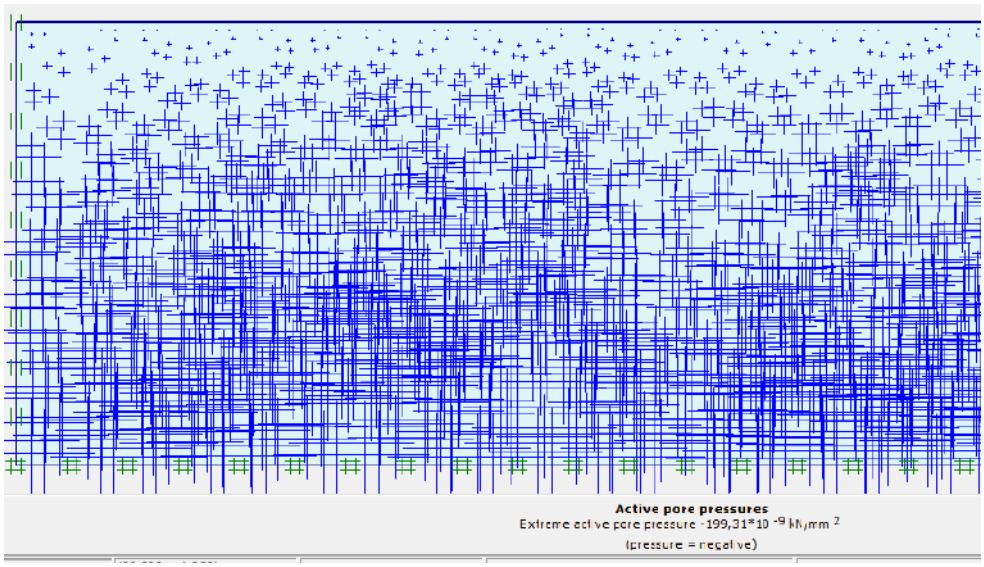


Figure IV.5: génération des pressions interstitielles.

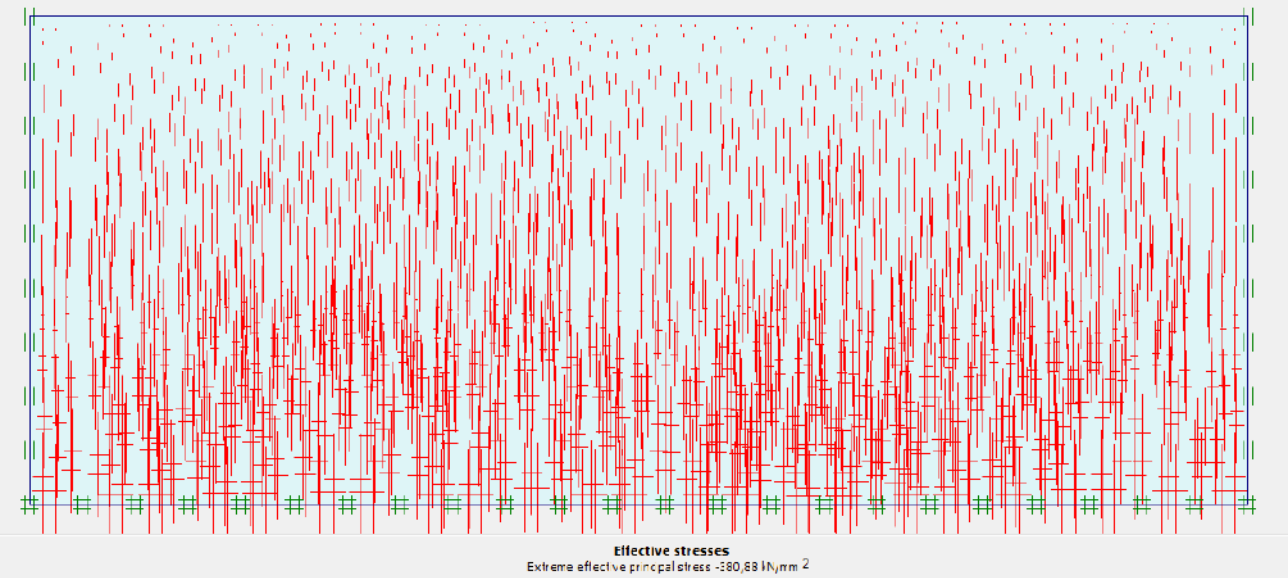


Figure IV.6:. génération des contraintes effectives initiales.

IV.5.Résultats et discussion

Cette partie est consacré à la modélisation numérique de l'essai oedométriques à chargement par palier (50 kPa , 102kPa, 203 kPa, 407kPa ,815kPa, 203 kPa,50 kPa)avec l'utilisation de lois de comportement de Mohr coulomb, l'ensembles des résultats obtenus sont présentée sur les figures (figure IV.7 a figure IV.11)

1 / 50 kPa

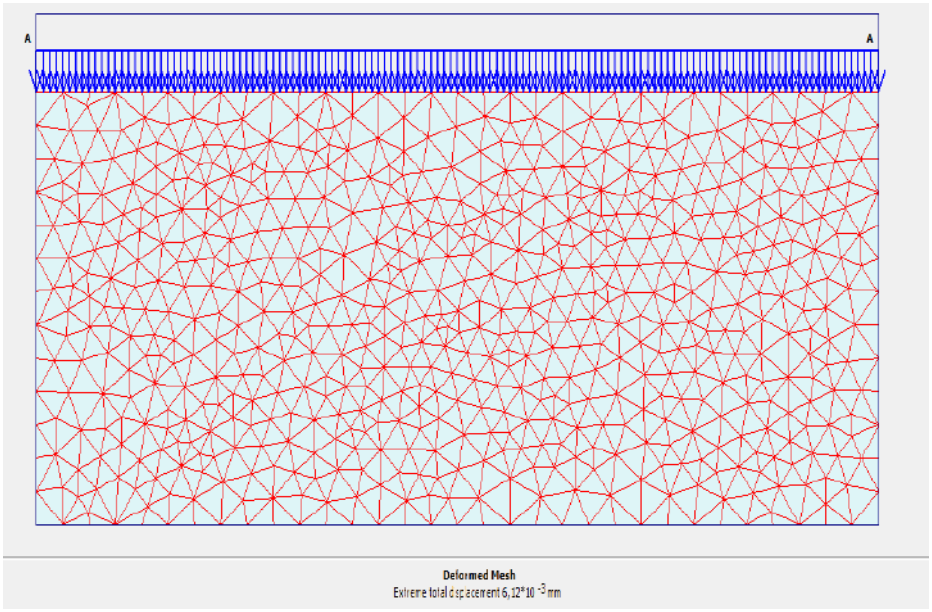


Figure IV.7 : Déplacement total de sol.

2/ 102 kPa

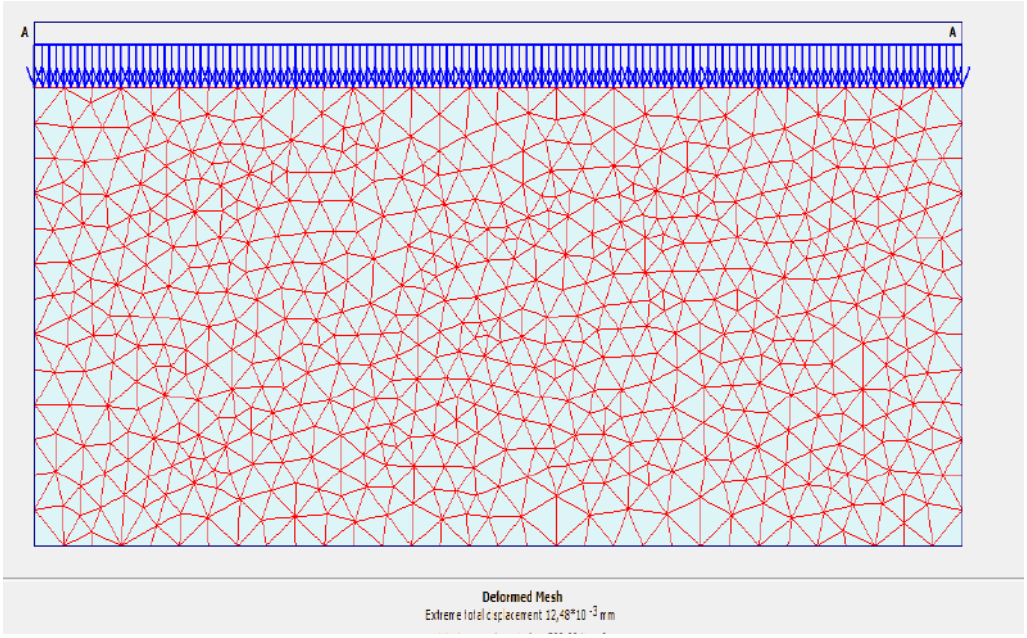


Figure IV.8 : Déplacement totale de sol.

3/ 203 kPa

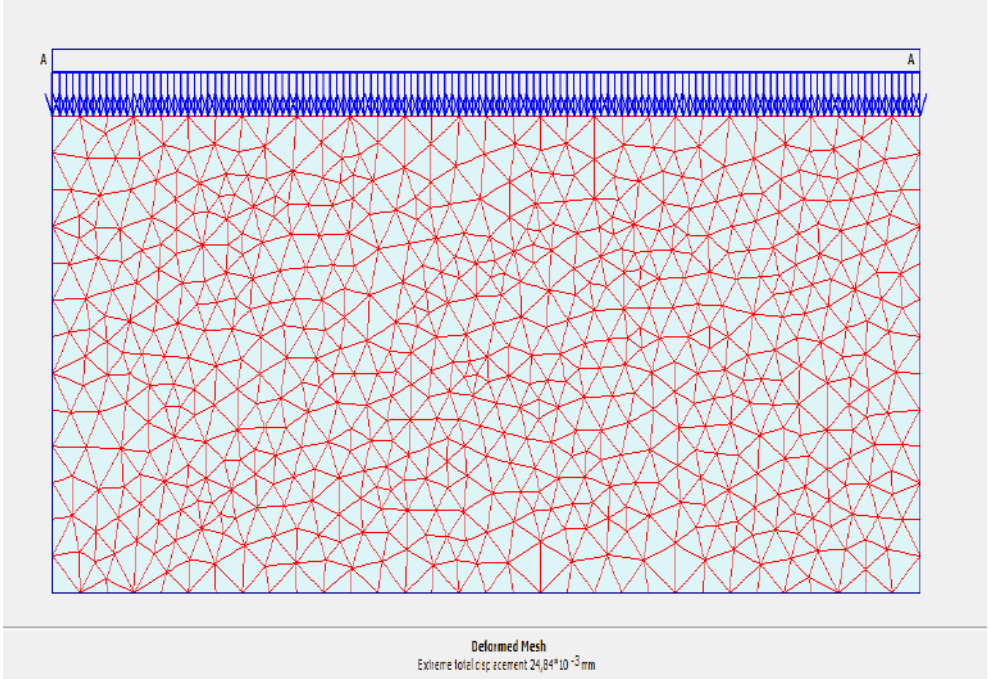


Figure IV.9 : le déplacement totale de sol

4/ 407 kPa

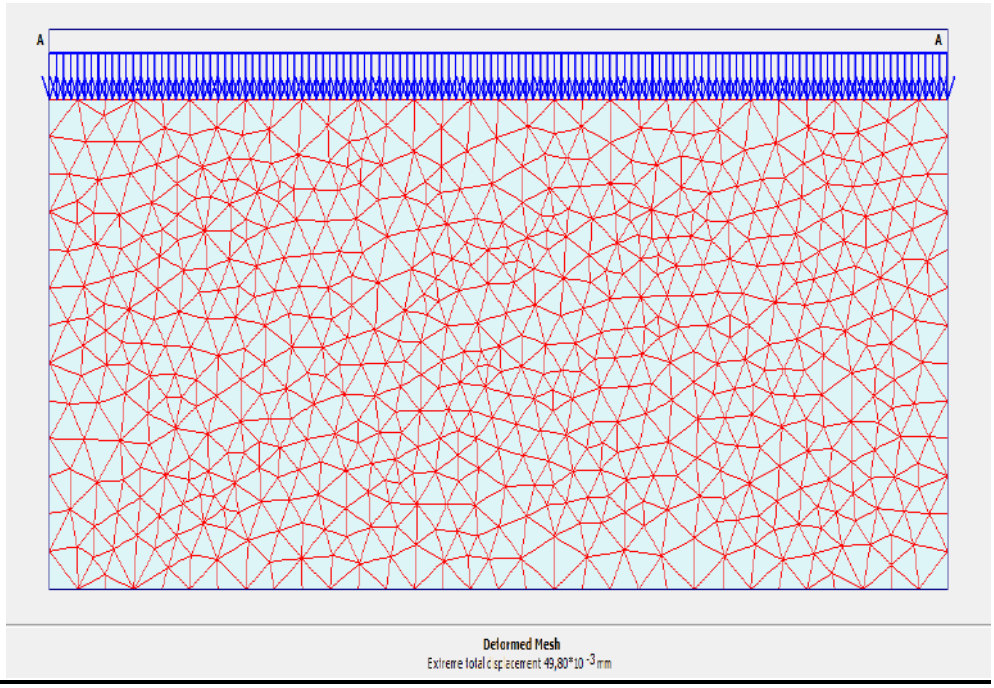


Figure IV.10 : le déplacement totale de sol

5/ 815 kPa

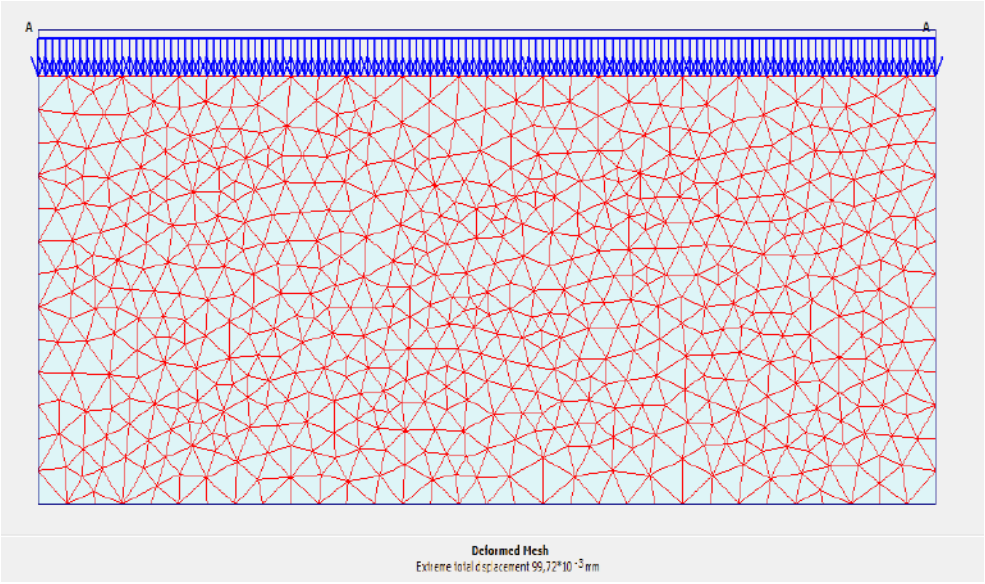


Figure IV.11 le déplacement totale de sol

Et les deux deplacement restes la méme valeur avec le deplacement 1 et 2

Les résultats obtenus sont résume sous forme de tableau

Tableau IV.2 : Déplacement numérique et expérimentale de sol sous effet des charges appliques

La charge	50	102	203	407	815	203	50
Déplacement (cm) numérique (plaxis)	0.0612	0.124	0.248	0.498	0.997	0.248	0.0612
Déplacement(cm) Expérimentale	0.056	0.086	0.137	0.187	0.242	0.198	0.158

On determiner les valeurs du déplacement expérimentale depuit le rapport (la feuille d'essai)

L'interprétation

Il ressort des résultats présentés dans le tableau précédent on remarque qu'il ya de différence significative sur le déplacement total du sol comme il y a un grand différence de force 407 KN Et 815 KN , donc nos résultat de modèle Plaxis est acceptable .

IV.6. Méthode numérique de calcule de indice des vides :

on calcule indice de vide avec la relation suivante:

$$\frac{\Delta h}{H} = \frac{\Delta e}{1+e}$$

exemple : pour la charge 50kpa Δh=**0.0612cm** avec e_0=1.16 et h =19.8mm

$$\Delta e = \frac{\mathbf{0.0612(1+1.16)}}{1.98} = \mathbf{0.066}$$

$\mathbf{e_1=e_0-0.066}$ = $\mathbf{e_1}$= 1.094

L'ensemble des résultats sont représenté dans le tableau au-dessous :

Tableau IV.3. La variation de l'indice des vides.

La charge	**50**	**102**	**203**	**407**	**815**	**203**	**50**
La variation de indice des vide	0.066	0.13	0.26	0.53	1.08	0.86	0.56
Indice de vide (plaxis)	1.094	1.03	0.9	0.63	0.08	0.3	0.6
Indice de vide (experimental)	0.756	0.713	0.641	0.57	0.492	0.554	0.611

Selon résultats présentés dans le tableau précédent on constate qu'il y a de différence significative sur la variation de l'indice des vides comme il y a un grand différence de force 407 KN Et815 KN , donc nos résultat de modèle Plaxis est acceptable .

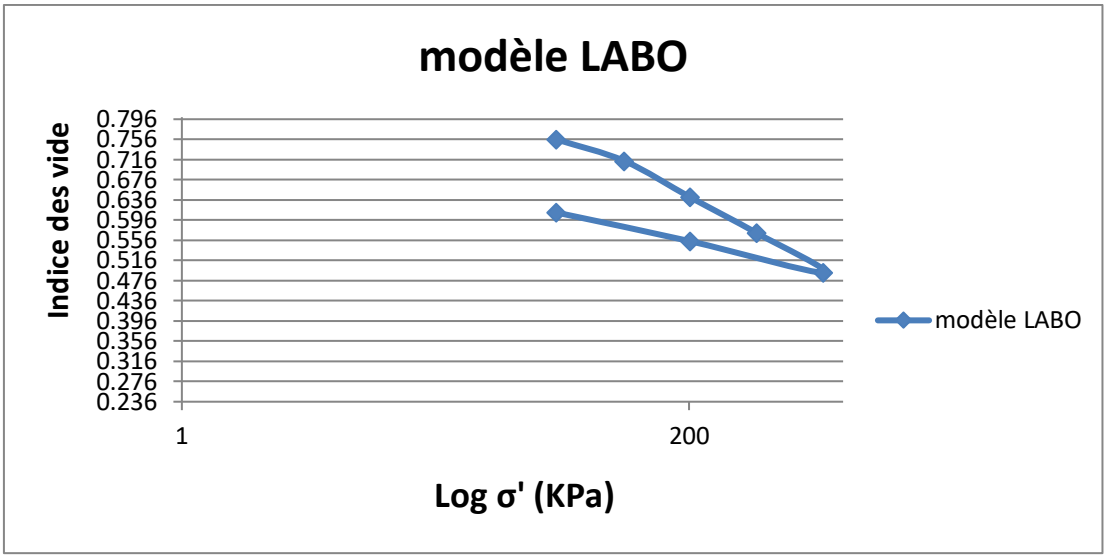
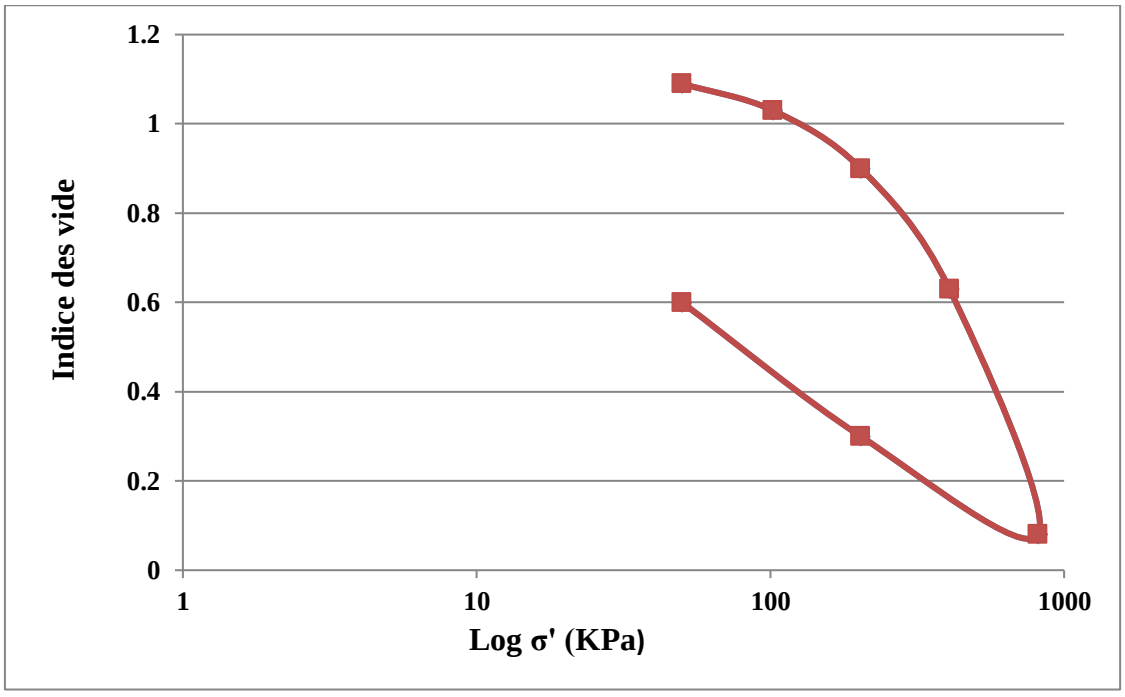


Figure IV.12 : courbe oedométriques (d'après les résultats de laboratoire).



FigureIV.13 : Courbe oedométriques (à partir de logiciel Plaxis)

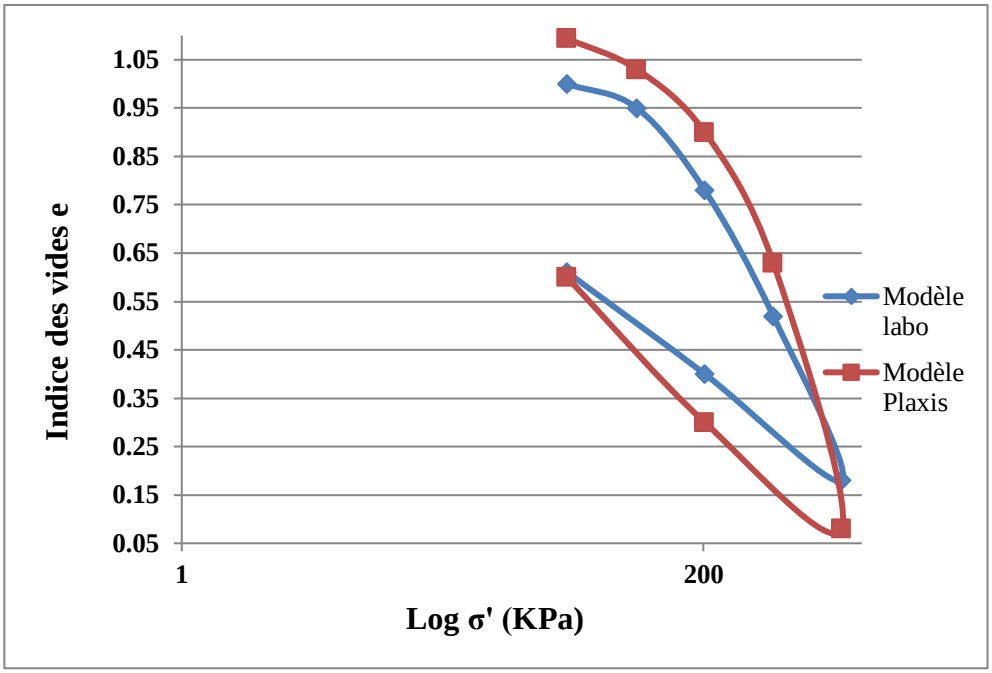


Figure IV.14:courbe oedométriques (Plaxis + expérimentale)

Selon les résultats obtenus on remarque que la forme de courbe oedométriques de modèle qui basé sur les résultats expérimental et notre modèle de Plaxis avec le modèle Mohr coulomb presque la même forme Il y a une petite différence, et cela est dû à plusieurs facteurs (les incertitudes de logiciel).

Conclusion :

D'âpres les résulta précédents montres dans les courbe oedometrique (courbe 1: a traves essai oedometrique),et courbe oedometrique (d'âpres la modélisation)

Nous remarquent que les résulta(et la forme de courbe) sont plus loin et il y'a des différences significatives dans les résultats .

On conclurons que le modèle de Plaxis que nous avons programmes avec les quels nous pouvons faire l'essai œdométrique qui nous permet de calculer le déplacement du sol .

CONCLUSION GENERALE

A travers cet étude les sols argileux, sont très fréquents et couvrent une partie considérable du globe terrestre, qui est à l'origine des transformations biochimiques ou géochimiques des minéraux primaires qui proviennent de la fragmentation des roches maires.

La présence des minéraux argileux est à l'origine de certaines caractéristiques des sols fins : phénomène de double couche d'eau adsorbée, grande surface spécifique, etc.

La reconnaissance des caractéristiques des sols argileux est fondamentale pour résoudre d'énormes problèmes telle que le phénomène de gonflement, glissement , tassement ..etc

Sous des aspects plus pratiques, si l'emploi des argiles en tant que matériaux de construction de base tend à diminuer dans les sociétés industrialisées, elles représentent encore une matière première aux usages multiples, certains tous récents (dans l'industrie chimique par exemple). De plus, on s'y intéresse actuellement pour leurs capacités à piéger les métaux lourds et pour leur imperméabilité, et par conséquent pour leur emploi dans le stockage de déchets hautement toxiques ou radioactifs, ou, plus simplement, pour éviter le lessivage des fluides, issus de l'évolution d'une décharge d'ordures, susceptibles d'aboutir à la pollution des nappes phréatiques ou des alimentations urbaines.

Mais leurs usages se sont maintenant multipliés, du fait de leur diversité naturelle bien sûr, mais aussi grâce à la possibilité actuelle de synthétiser artificiellement des matériaux argileux aux propriétés contrôlées.

L'essai oedométrique permet de tracer .

- pour une contrainte de chargement donnée, la mesure du tassement Δh en fonction du t
- temps t permet de tracer sous la forme $\Delta h = f(\log t)$ ou

A partir de ces courbes on peut calculer le temps de tassement d'une couche de sol en place sous une charge

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

Aissiou, F Z. (2010) ,Étude du phénomène de gonflement d'un sol argileux, Thèse de magister, USTHB.

Aouati et Rahim,(2015) Modélisation des essais géotechnique par le logiciel plaxis université Guelma

Amroune .A , (2016) ,Cracterisatio du fluage reconsituee a fable energie copactage These de doctorat université de M'ssila

Amri.S ,(2011),Contribution à l'étude de lla stabilisation chimique des argiles par la chaux au cas des travaux de terrassements des voies de communication de la région algéroise Thèse de magister, USTHB.

Belabbaci.Z (2014),(Stabilisation des sols gonflants), Thèse de doctorat.Université Tlemcen.

Belaid.A (2018) ,Préparation et caractérisation d'argile modifiée-Application à l'adsorption de colorants , These de doctorat université de Tlemcen

Chretien.M (2010), Compréhension des mécanismes de retrait-gonflement des solsargileux : approche sur site expérimental et analyse de sinistres sur constructions individuelles.Thèse de doctorat.Université bordeaux.

Choufa . N (2013),Epuration des eaux usées: l' élimination des micropolluants dans les eaux usées par un matériau argileux, Thèse de thèse de magistère université Mohammed Chérif Messaadia Souk Ahras

Gayaza , M (2012)Réactivité argile –polluabts métaliques :simulation des barrières argileuses des sites destockage des déchets. These de doctorat université d'Orléans

Gueddouda .M. K (2011), Comportement hydro-mécanique des sols compactés : Application à la conception d'une barrière ouvragée « sable de dune –bentonite. These de doctorat université de Tlemcen

Gens, A., Alonso, E.E., (1992), A framework for the behavior of unsaturated expansive clays. Cana. Geotech. J. 29, pp.1013-1032

HELISE, R. (2012), Analyse numérique de la capacité portante d'une fondation filante implante sur une bicouche granuleux,thèse de magistère en génie civil Université El Hadj Lakhdar Batna

Kebaïli .N. (2006) , Analyse du gonflement de l'argile en relation avec ses limites de consistance :Application aux argiles de Hassi messaoud et d'In aménas, Thèse de magister, université kasdi merbah ouargla

Le Roux A. (1972), Caractéristiques mécaniques des roches argileuses en relation avec leur texteur. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°61, pp. 155-176

Madjnoun ,A (2014),Analyse caractérisation prévision et du comportement des argiles gonflantes Thèse de magister.université tizi ouzou

Mitchell J. K. (1976). Fundamentals of Soil Behavior. Wiley, 436 p

Norme française sol: reconnaissance et essai

NF P 94-071 : l'essai de cisaillement.

NFP 94- 051: Détermination des limites d"atterbeg la limite à la coupelle – limite de plasticité au rouleau.

NFP18-056 : Analyse granulométrique des sols par tamisage

NFP18-057 : Analyse granulométrique des sols par sedimentométrie

NFP94-051 : Détermination des limite d'Atterberge

NFP94-090 : Essai oedométrique

Nowamooz Hossein. Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2007. Français. ffNNT : 2007INPL107N

Ouadah.N (2007) , Université Ouargla.Etude parametree du gonflement de sols argileux reconstitues,Thèse de magister ,université de Tlemcen

Philipponat, G. Hubert, B. « Fondations et ouvrages en terre »Editions Eyrolles 2000.

Robitaille ,Denis. T. (1997).Mécanique de sol: théorie et pratique. ISBN 2-89113-658-6.

Rapport geotechnique, Projet : étude de sol pour la realisation d'un reservoir de 1000 m3 pour le renforcement de p'aep du quartier de 2332 lgts a ain djerda y compris le raccordement et mur de cloture dans le cadre du renforcement des zones d'ombre w/Médéa (2021)

Troalen et al,1984, Les essais de gonflement .

Youdjari. D. (2010), Caractérisation et simulation numérique du comportement volume trique de sols argileux gonflants de n'djaména. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de Maîtrise en Génie Civil l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc). Mémoire présenté).

ANNEXES

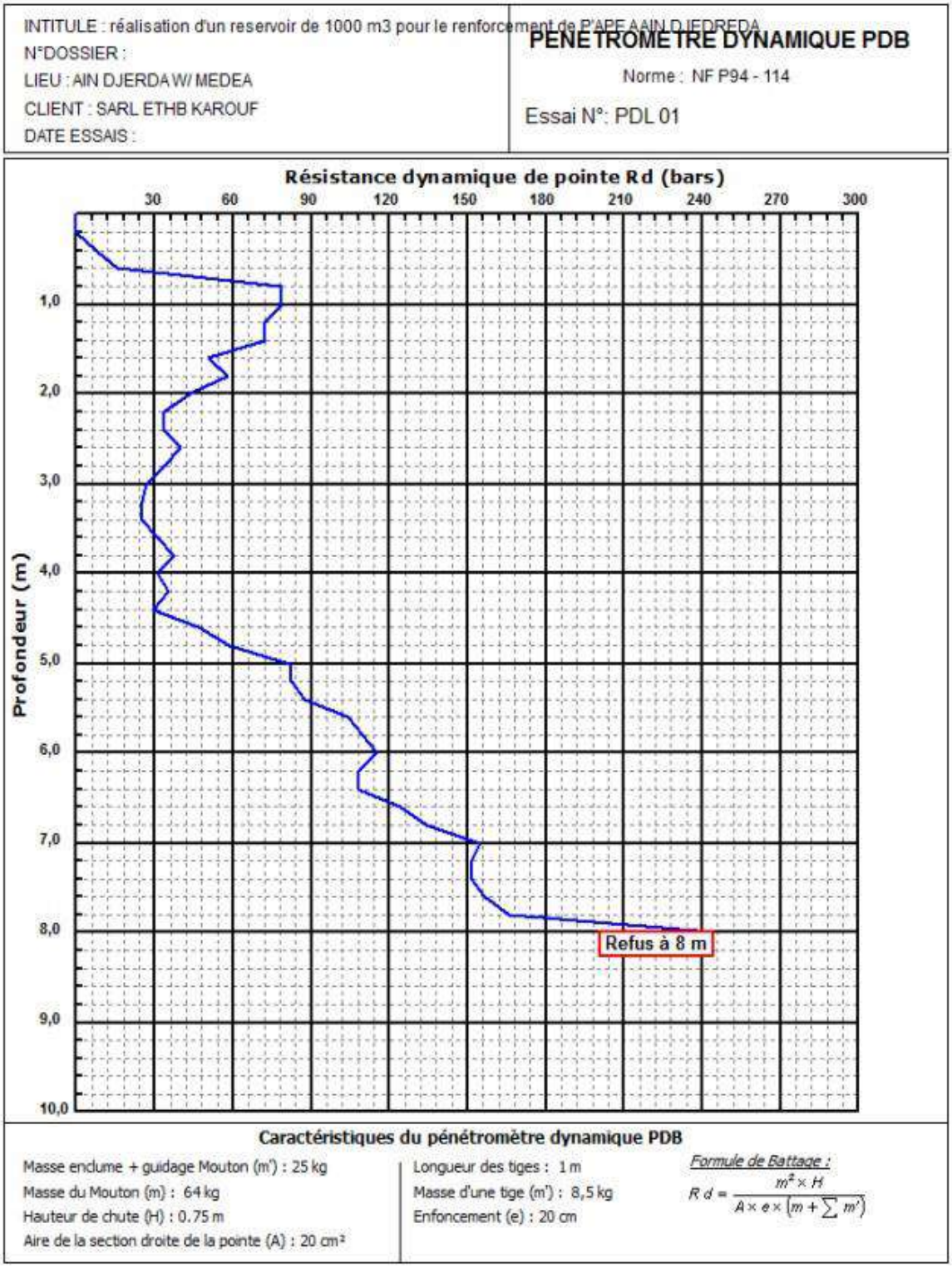


Figure 1 : Graphe de pénétromètre dynamique lourd noté PDL

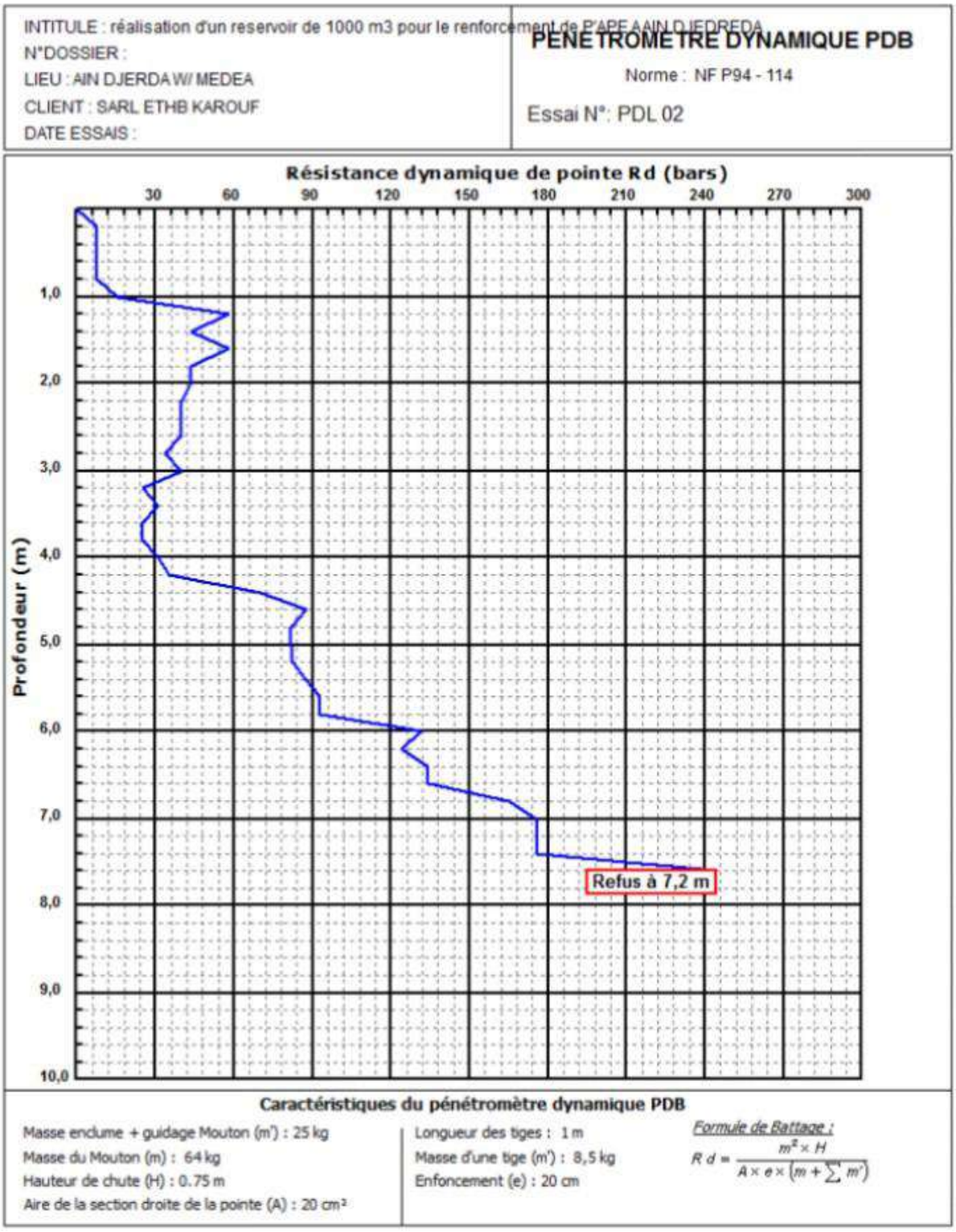


Figure 2 : Graphe de pénétromètre dynamique lourd noté PDL

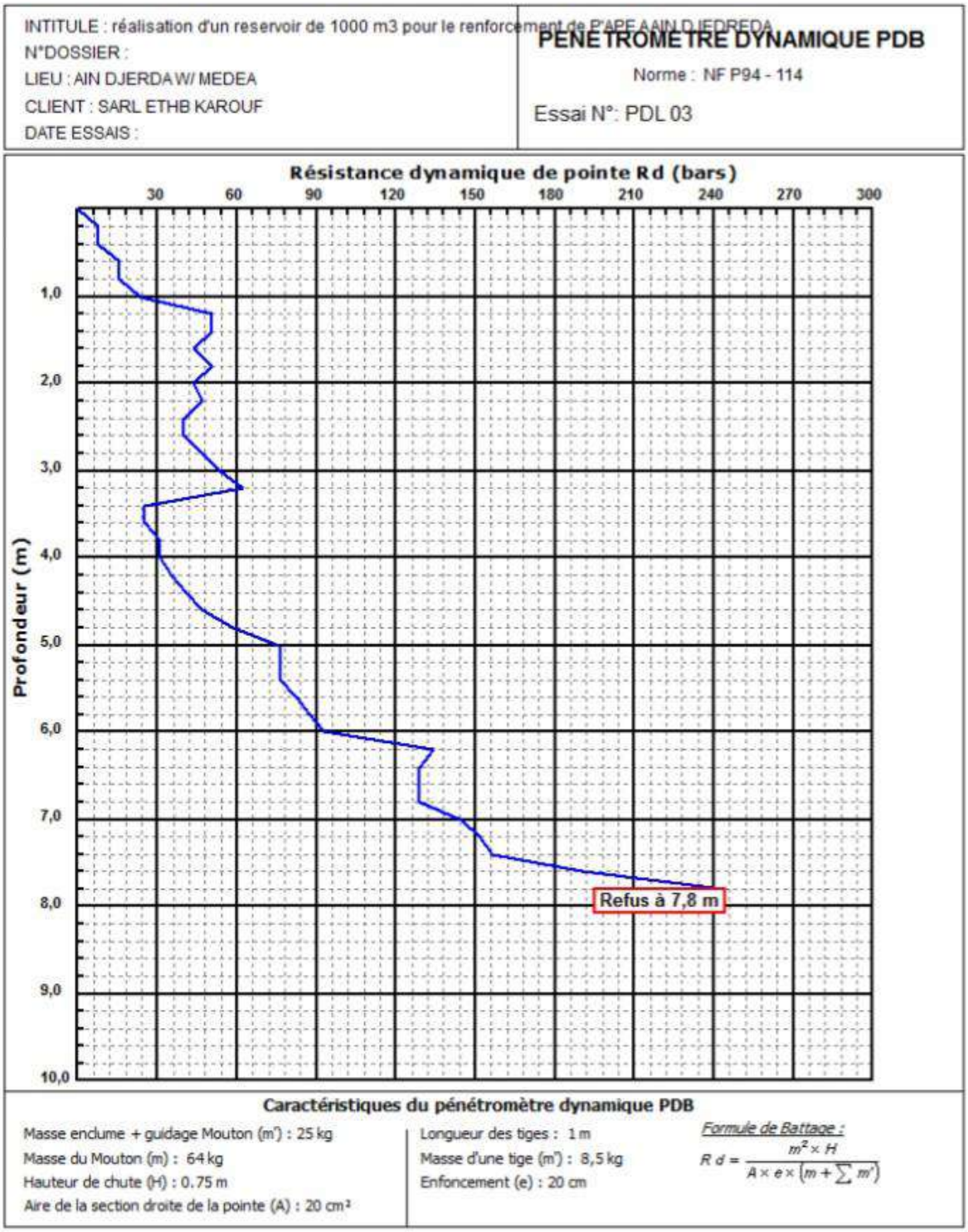


Figure 3: Graphe de pénétromètre dynamique lourd noté PDL

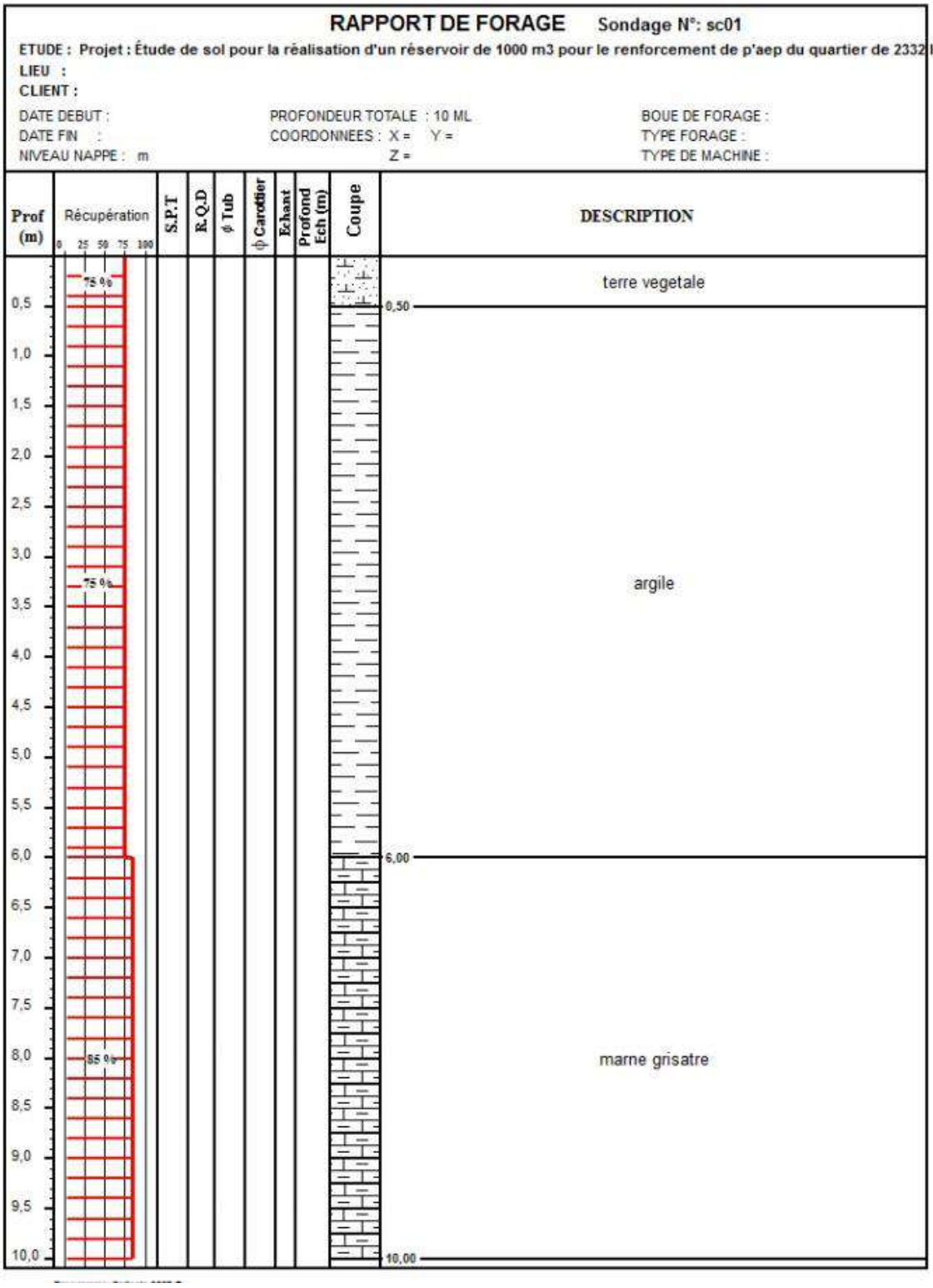


Figure 4: sondage carotté noté **SC**



Figure 4: Photos de site

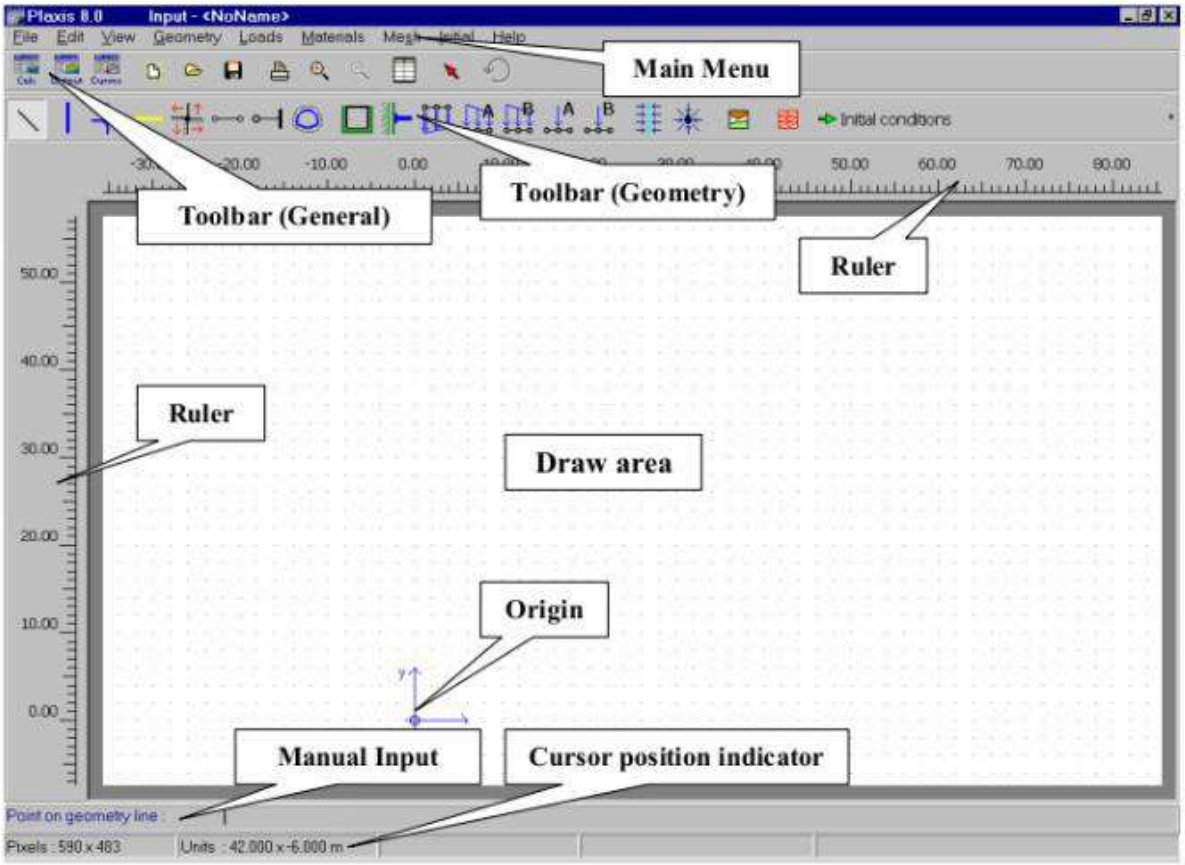


Figure 5: Fenétre principle du programme d'entrée des donnée (Input) mode de création géométrique