

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

Scientifique

Université Ahmed Draia Adrar

Faculté Des Sciences et Technologies

Département Des Sciences de la Technologie



Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme :

Master Académique En Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Présenté Par :

BOUGRINE Zineb

BOUREGAA Wided

THEME

*Modélisation et simulation de la terre sous
chargement axial type compression simple.*

Soutenu le ... /10/2020

Devant le jury composé de :

| | | |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|
| Pr. MEKERTA Belkacem | Univ.Adrar | Examineur |
| Dr. AKACEM Mustapha | Univ.Adrar | Examineur |
| Mr. ABBOU Mohammed | Univ.Adrar | Encadreur |
| Dr. ARBAOUI Iliace | Univ.Adrar | Co-Encadreur |

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

Avant tout, je remercie DIEU qui a illuminé mon chemin et qui m'a armé de courage pour achever mes études.

« Quiconque ne remercie pas les gens, ne remercie pas Dieu ».

*Nous présentons nos vifs et sincères remerciements à l'ensemble de nos enseignants de la spécialité Génie Civil de l'Université d'Adrar. Toutes nos gratitudes à nos encadreurs Monsieur **ABBOU Mohammed** et Co-encadreur, Docteur **ARBAOUI Iliace**. Nous remercions aussi notre examinateurs, le professeur **MEKERIA Belkacem** et docteur **AKACEM Mustapha**.*

Les membres et le directeur de laboratoire des travaux publics de l'Ouest (LTPO).

Nous citons nos remerciements à tout le personnel du laboratoire de Mécanique des Sols du département ST génie civil.

Je tiens à remercier aussi : Les étudiants de notre promotion Master «Géotechnique» «Wided, Djamila, Madjida, Sliman, Idriss et Yakoub ».
Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans l'élaboration de mon mémoire.

Merci

Zineb et Wided

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*À ma Mère **Zohra** qui par sa présence seule, apaise le cœur et donne le gout de vivre.*

*À mon Père **Kaddour** qui est à la fois mon idole et ma sécurité, jamais je saurai ce que j'aurai été sans lui.*

À mon grand-père et à mes grands-mères que Dieu prolonge leur vie

*À mon cher frère « **Adnan** ».*

*À mes très chères sœurs « **Fatima, Asmahane et Nor El Houda** ».*

*À petite fille de la famille « **Fatima Zohra, Wissam El Dinne et Abd El Salam** ».*

*À tout spécialement aux plus chères personnes à ma vie qui étaient toujours présentes pour moi « **Chahira, Sara et Samiha** ».*

*À toute la famille **BOUGRINE** et **OUFIANE** «Tantes, Oncles, Cousins et Cousines» et à tous mes chers amis «**Fatma, Monira, Karima et zineb**».*

*À tous les étudiants de notre promotion Master «Géotechnique» «**Wided, Djamila, Madjida, Sliman, Idriss et Yakoub** ».*

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

ZINEB



Dédicaces

Nous remercions en premier lieu le Dieu ALLAH pour tout.

Puis je remercie le deuxième encadreur Mr. Abbou Mohammed.

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents

Ma mère et mon père.

À mon cher frère « Mabrouk, Mohammed et Abd-Elhake ».

À mes très chères sœurs « Asma, Nadjat et Nor El Houda ».

A tous mes oncles, tantes et mes cousins et les enfants de mes tantes.

A toute la famille : Bouregaa.

A mes très chères amies : « Zineb, Monira, Nouria, Safia, Kadem ».

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.



Wided



Résumé

Dans le cadre des études géotechniques, ayant pour but l'évaluation la détermination de la capacité portante du sol.

La capacité portante du sol d'assise joue un rôle prépondérant dans le choix du type de fondation dont la détermination de la force portante est l'un des problèmes les plus importants de la mécanique des sols. La connaissance des mécanismes de rupture constitue une étape préliminaire très décisive dans l'étude de ce genre de problèmes.

L'utilisation de l'outil de calcul automatique en génie civil devient un moyen efficace pour l'analyse d'un problème aux conditions limite, néanmoins la fiabilité de cette analyse dépend largement des paramètres et des données d'entrée qui sont obtenues expérimentalement à partir des essais géotechniques.

L'objectif de ce travail est l'analyse de la capacité portante d'un sol (Argile et sable), sous chargement axial, par simulation numérique au moyen du code de calcul PLAXIS dans le but de déterminer leur mécanisme de rupture.

Mots clés : Sol, capacité portante, simulation, PLAXIS.

الملخص

في إطار الدراسات الجيوتقنية، الهدف منها هو تقييم تحديد قدرة تحمل التربة تلعب قدرة تحمل حجر الأساس دوراً رئيسياً في اختيار نوع الأساس، حيث يعد تحديد قوة تحملها أحد أهم المشكلات في ميكانيكا التربة. إن معرفة آليات الفشل هي خطوة أولية حاسمة للغاية في دراسة هذا النوع من المشاكل. يصبح استخدام أداة الحساب الآلي في الهندسة المدنية كوسيلة فعالة لتحليل مشكلة ذات شروط محدودة، ومع ذلك فإن موثوقية هذا التحليل تعتمد إلى حد كبير على المعلومات وبيانات الإدخال التي يتم الحصول عليها تجريبياً من الاختبارات الجيوتقنية.

الهدف من هذا العمل هو تحليل قدرة تحمل التربة (الطين والرمل)، تحت التحميل المحوري، عن طريق المحاكاة

العددية باستخدام كود الكمبيوتر PLAXIS من أجل تحديد آلية فشلها

الكلمات المفتاحية: التربة، القدرة على التحمل المحاكاة، PLAXIS.

Abstract

Within the framework of geotechnical studies, the purpose of which is to evaluate the determination of the bearing capacity of the soil.

The bearing capacity of the foundation soil plays a major role in the choice of the type of foundation, for which the determination of the bearing capacity is one of the most important problems of soil mechanics. Knowledge of the failure mechanisms is a very decisive preliminary step in the study of such problems.

The use of the automatic calculation tool in civil engineering becomes an efficient means for the analysis of a problem at boundary conditions; nevertheless, the reliability of this analysis depends largely on the parameters and input data that are experimentally obtained from geotechnical tests.

The objective of this work is the analysis of the bearing capacity of a soil (Clay and sand), under axial loading, by numerical simulation using the PLAXIS calculation code in order to determine their failure mechanism.

Key words: Soil, load-bearing capacity, simulation, PLAXIS.

Table des matières

| | |
|----------------------------------------------|----------|
| Remerciment..... | I |
| Dédicaces..... | II |
| Résumé..... | IV |
| Table des matière..... | VI |
| Liste des figures..... | IX |
| Liste des photo..... | XI |
| Liste des tableaux..... | XII |
| Abréviation et symbles..... | XIII |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I: Synthèse bibliographique | |
| I.1 Introduction..... | 4 |
| I.2 La terre..... | 4 |
| I.2.1 Définition :..... | 4 |
| I.2.2 Composition :..... | 5 |
| I.3 Généralité sur les argiles..... | 5 |
| I.3.1 Définition générale :..... | 6 |
| I.3.2 Minéralogie des argiles :..... | 6 |
| I.3.3 Structure d'argile :..... | 6 |
| I.3.4 Propriétés des argiles :..... | 7 |
| I.3.5 Types argile :..... | 7 |
| I.3.6 Activité des argiles :..... | 9 |
| I.4 Les sables..... | 9 |
| I.4.1 Définition des sables :..... | 9 |
| I.4.2 Classification des sables :..... | 9 |
| I.4.3 Les types des sables :..... | 10 |
| I.5 La modélisation..... | 10 |
| I.5.1 Définition :..... | 10 |
| I.5.2 Importance de la modélisation :..... | 10 |
| I.5.3 Modélisation des sols :..... | 11 |
| I.5.3.1 Modèles en mécanique des sols :..... | 11 |

| | | |
|---------|------------------------------------------------------|----|
| I.5.3.2 | Modèle élastique : | 12 |
| I.5.3.3 | Loi de comportement de Mohr-Coulomb : | 12 |
| I.6 | Méthode des éléments finis | 13 |
| I.6.1 | Définitions de la méthode de l'élément finis : | 13 |
| I.6.2 | Principe de la méthode des éléments finis : | 13 |
| I.6.3 | Avantage de la méthode des éléments finis : | 14 |
| I.6.4 | Classement d'éléments finis : | 14 |
| I.7 | Conclusion | 14 |

Chapitre II: Identification des matériaux étudiés

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------|----|
| II.1 | Introduction..... | 16 |
| II.2 | Localisation des matériaux utilisés..... | 16 |
| II.3 | Essais d'identification..... | 17 |
| II.3.1 | Les caractéristiques physiques d'argile étudiée..... | 17 |
| II.3.1.1 | Essai de poids spécifique des grains solides (NF P94-054) | 17 |
| II.3.1.2 | Analyse granulométrique par sédimentation (NF P94-057) | 19 |
| II.3.1.3 | Les limites d'Atterberg (NF P 94-051)..... | 21 |
| II.3.2 | Les caractéristiques chimiques..... | 26 |
| II.3.2.1 | Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068)..... | 26 |
| II.3.2.2 | Teneur en carbonate de calcium CaCO ₃ (NF P94-051)..... | 28 |
| II.4 | Les caractéristiques physiques de sable de dune..... | 29 |
| II.4.1 | Essai analyse granulométrie par tamisage à sec (NF P18-560)..... | 29 |
| II.4.2 | Module de finesse : Norme (EN 13139)..... | 31 |
| II.4.3 | Essai équivalent de sable (NFP 18-597) | 31 |
| II.4.4 | Essai de la masse volumique apparente (NF-P 18 555)..... | 33 |
| II.4.5 | La masse volumique absolue (NF-P18-554)..... | 34 |
| II.5 | Conclusion..... | 36 |

Chapitre III: Modélisation et simulation numérique

| | | |
|---------|--------------------------------------------|----|
| III.1 | Introduction : | 38 |
| III.2 | Représentation du modèle de référence..... | 38 |
| III.2.1 | Définition géométrique du modèle : | 38 |
| III.2.2 | Modèle de comportement utilisé : | 39 |
| III.2.3 | Génération du maillage : | 39 |
| III.3 | Les conditions aux limites | 39 |
| III.3.1 | Chargement : | 40 |

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| III.3.2 Conditions initiales : | 40 |
| III.3.3 Procédures de calcul : | 40 |
| III.4 Caractéristiques des sols | 41 |
| III.5 Principaux résultats du cas d'argile drainé : | 42 |
| Conclusion générale..... | 51 |
| Références bibliographiques..... | 52 |

Liste des figures

Chapitre I

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Figure I.1. Composition minérale et organique de la terre..... | 5 |
| Figure I.2. Représentation des couches tétraédrique et octaèdre | 6 |
| Figure I.3. Représentation structurale d'un minéral argileux de type (T-O). Et structure particulière de la Kaolinite..... | 7 |
| Figure I.4. Représentation structurale d'un minéral argileux de type (T-O-T) et structure..... d'illite..... | 8 |
| Figure I.5. Représentation schématique de la montmorillonite (T-O-T-O)..... | 9 |

Chapitre II

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II.1. Courbe granulométrique de l'argile analysée..... | 20 |
| Figure II.2. États d'un sol en fonction de sa teneur en eau | 21 |
| Figure II.3. La courbe de la limite de liquidité. | 22 |
| Figure II.4. Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert, 1977). | 24 |
| Figure II.5. Schéma synoptique du processus opératoire de l'essai du bleu à la tache (Scaeffner, 1989). | 26 |
| Figure II.6. La courbe granulométrique du sable de dune étudié. | 30 |

Chapitre III

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III.1. Définition de la géométrie du problème étudié..... | 38 |
| Figure III.2. Maillage du modèle. | 39 |
| Figure III.3. Points C, D dont on suit les contraintes..... | 41 |
| Figure III.4. Maillage déformé. | 42 |
| Figure III.5. Représentation des directions principales des contraintes dans la phase ultime..... | 42 |
| Figure III.6. Représentation des vecteurs déplacements dans la phase ultime..... | 43 |
| Figure III.7. Déplacement totaux dans la phase ultime..... | 43 |
| Figure III. 8. Bilan du calcul (l'argile). | 44 |
| Figure III.9. Courbe contraintes-déformations des points C et D dans la phase ultime par rapport x..... | 45 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III.10. Courbe contraintes - déformations des points C et D dans la phase ultime par rapport y..... | 45 |
| Figure III.11. Représentation des vecteurs déplacements totaux. | 46 |
| Figure III.12. Maillage déformé. | 46 |
| Figure III.13. Représentation des vecteurs déplacements dans la phase ultime. | 47 |
| Figure III.14. Représentation des directions principales des contraintes dans la phase ultime | 47 |
| Figure III.15. Déplacement totaux dans la phase ultime..... | 48 |
| Figure III.16. Bilan du calcul (le sable). | 48 |
| Figure III.17. Courbe contraintes-déformations des points C et D dans la phase ultime par rapport x. | 49 |
| Figure III.18. Courbe contraintes - déformations des points C et D dans la phase ultime par rapport y. | 49 |
| Figure III.19. Représentation des vecteurs déplacements totaux (Sable de dune). | 50 |

Liste des photos

Chapitre II

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Photo II. 1. Zone de prélèvement de l'argile utilisée..... | 16 |
| Photo II. 2. Photo satellitaire de la zone de prélèvement du sable de dune..... | 16 |
| Photo II. 3. Mode opératoire de l'essai..... | 18 |
| Photo II. 4. Appareillage de l'analyse granulométrique par sédimentation..... | 19 |
| Photo II. 5. Mode opératoire de l'essai de la limite de liquidité..... | 22 |
| Photo II. 6. Mode opératoire de l'essai de la limite de plasticité..... | 23 |
| Photo II. 7. L'appareillage de l'essai du bleu..... | 26 |
| Photo II. 8. Test de la tâche pour l'argile..... | 27 |
| Photo II.9. Appareille de Calcimètre Dietrich – Fruhling..... | 29 |
| Photo II. 10. Mode opératoire et appareillage de l'analyse granulométrie..... | 30 |
| Photo II. 11. Mode opératoire et appareillage de l'équivalent de sable de dune..... | 32 |
| Photo II. 12. Mode opératoire de l'essai de la masse volumique apparente..... | 33 |
| Photo. II.13. Méthode de l'éprouvette graduée (la masse volumique absolue)..... | 34 |

Liste des tableaux

Chapitre II

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau II.1. Résultat d'essai poids spécifique des grains solide d'argile..... | 18 |
| Tableau II.2. Les Valeurs de Gs pour différents types de sols à 20° C..... | 19 |
| Tableau II.3. Résultats de la Limite de plasticité..... | 23 |
| Tableau II.4. Classification des argiles selon BURMISTER(1967)..... | 23 |
| Tableau II.5. Classification des argiles selon Atterberg(1973) | 24 |
| Tableau II.6. Activité des sols (cité par techniques de l'ingénieur) | 25 |
| Tableau II.7. Activité des différents minéraux (Skempton, 1953 et Mitchell, 1976)..... | 25 |
| Tableau II.8. Résultats d'essai au bleu de méthylène. | 27 |
| Tableau II.9. Classification des sols selon la valeur de bleu | 27 |
| Tableau II.10. Teneur en CaCO ₃ de quelques sols..... | 28 |
| Tableau II.11. Valeurs de la teneur en carbonate de calcium..... | 29 |
| Tableau II.12. Résultat de l'analyse granulométrie. | 31 |
| Tableau II.13. Grosseur ou finesse en fonction du pourcentage de passant au tamis de 0,5 | 31 |
| Tableau II.14. Résultats de l'essai module de finesse..... | 31 |
| Tableau II.15. Interprétation d'un essai d'équivalent de sable..... | 32 |
| Tableau II.16. Masse volumique apparente de sable étudié..... | 33 |
| Tableau II.17. La masse volumique absolue du sable de dune..... | 34 |
| Tableau II.18. Paramètres d'identification d'argile et sable de dune de Timimoun..... | 35 |

Chapitre III

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau III.1. Coordonnées des points | 39 |
| Tableau III.2. Caractéristiques physico-mécaniques des deux matériaux étudiés. | 41 |
| Tableau III.3. Capacité portante [kPa] d'après Plaxis. | 50 |

Abréviations et symboles

T-O : Tétraédrique- Octaédrique.

T-O-T : Tétraédrique- Octaédrique- Tétraédrique.

T-O-T-O : Tétraédrique- Octaédrique- Tétraédrique- Octaédrique.

K : Module volumique.

G : Module de cisaillement.

E : Module d'Young

ν : Coefficient de Poisson.

C : Cohésion.

ϕ' : Angle de frottement.

Ψ : Angle de dilatance.

ϵ_r : déformation a la rupture.

Rc : la résistance a la compression.

Ac : Activité des argiles.

C2 : Teneur en particules de dimension inférieur à 2 μm .

IP : Indice de plasticité.

P : pourcentage des éléments inférieur au diamètre.

Vs : volume de suspension 1000 L.

M : Masse de sol sec utilisé.

ρ_s : Masse volumique des grains solides.

ρ_w : Masse volumique de l'eau.

Rt : Lecture de l'éprouvette A au temps t.

RB : Lecture de l'éprouvette B (Eprouvette témoin).

D : Diamètre de particules.

F : Facteur donné par l'abaque.

Vs : Volume des particules solides.

γ_s : Poids spécifique des grains solides (g/m^3).

γ_w : Poids volumique de l'eau à (20°C).

Ws : poids sec des grains solides (20°C).

W1 : poids de pycnomètre vide.

W2 : poids de pycnomètre + eau distillé.

W3 : poids de pycnomètre +sol sec.

W4 : Poids de pycnomètre + sol sec +eau distillé.

G_s : La densité sèche.

WL : Limite de liquidité (%).

WP : Limite de plasticité (%).

W : Teneur en eau de sol (%).

A_{tp}: argiles très plastiques.

AP : argiles peu plastiques.

L_{tp}: limons très plastiques.

L_p: limons peu plastiques.

VB : La valeur de bleu.

SST : Surface spécifique totale (m²/g).

MV_{abs}:Masse volumique absolue.

p_{app} : Masse volumique apparente.

CaCo₃ : Teneur en carbonate de calcium (%).

Cc : Coefficient de courbure.

Cu : Coefficient d'uniformité.

MF : Module de finesse.

LCPC : Laboratoire centrale des pontes et chaussée.

TC : Tamisât cumulés(%).

RC: Refus cumulés(%).

ES : Equivalent de sable.

M_S: La masse des grains solides.

V : le volume de moule.

Introduction générale

Introduction générale

Le sol est la couche superficielle cassante ou en ruine qui recouvre la surface de la terre. Le sol est composé de matériaux de roche concassée qui ont déjà subi une altération due à une exposition à des facteurs environnementaux, biologiques et chimiques. Le sol est également connu sous le nom de terre, C'est le matériau à partir duquel la planète Terre sur laquelle nous vivons est nommée.

La capacité portante a toujours été l'un des sujets les plus intéressants en mécanique des sols et des fondations. On appelle pression admissible la pression ou contrainte maximum qui puisse être appliquée par une structure sur un sol, sans qu'il y ait de tassements excessifs et de risque de rupture du sol.

Les procédures de calcul classiques, basées sur la méthode de l'équilibre limite, imposants, d'une part, les directions des plans de rupture (approximation très grossière), d'autre part ces théories supposent que le sol se comporte comme un matériau associé, avec un angle de dilatance égale à l'angle de frottement interne ϕ . Il est bien connu que pour les sols réels, l'angle de dilatance est généralement considérablement inférieur à ϕ .

La plupart des méthodes d'estimation de la capacité portante sont basées sur des études effectuées originalement sur une semelle filante, Rankine, Prandtl(1921) et Terzaghi (1943) modifiées plus tard afin de les adapter à d'autres conditions comme par exemple la forme de la fondation, l'inclinaison de la charge, l'excentrement de la chargeetc.

Ce travail est considéré comme une initiation à la recherche dans le domaine du calcul bidimensionnel, bien que les calculs en 3D sont beaucoup plus lourds que les calculs en 2D.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Le première chapitre aborde des généralités sur la terre et ses caractéristiques et donner une présentation générale sur le sol argileux, et le sable de dune. À la fin de ce chapitre, nous avons pris un aperçu sur la modélisation et la méthode des éléments finis.

Le deuxième chapitre est consacré à l'identification géotechnique des matériaux utilisés.

L'outil de simulation numérique le logiciel PLAXIS, ainsi que l'étude et modélisation de comportement du sol sous un chargement axial (vertical). On a traité des exemples concernant

la distribution des contraintes dans le sol, le déplacement et la capacité portante sont présentés au troisième chapitre.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1 Introduction

Le sol est un amas complexe, c'est un matériau irréversible à cause des déformations permanentes, son comportement est généralement non linéaire. Les déformations peuvent être instantanées ou différées introduisant une dépendance au temps. Les tassements sont par définition les déformations verticales du sol sous l'action des sollicitations diverses. Le tassement peut s'effectuer vers le bas c.à.d. un chargement de compression (fondation d'un structure par exemple), ou vers le haut c.à.d. un gonflement (pendant les excavations par exemple).

La capacité portante a toujours été l'un des sujets les plus intéressants en mécanique des sols et des fondations. On appelle pression admissible la pression ou contrainte maximum qui puisse être appliquée par une structure sur un sol, sans qu'il y ait de tassements excessifs et de risque de rupture du sol.

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur la terre et prendre deux composants, l'argile et le sable de dune, ainsi que une présentation générale de la modélisation des sols par la méthode des éléments finis, et les principaux modèles utilisés en géotechnique.

I.2 La terre

I.2.1 Définition :

La terre est un milieu poreux multiphasique comprenant une phase solide, une phase liquide (principalement de l'eau) et une phase gazeuse (principalement de l'air). La phase solide est constituée de la matière minérale, ensemble de particules élémentaires d'origine et de composition diverses, et de la matière organique. [1]

Le sol est la fraction solide de la sphère terrestre. A la surface du sol, la terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux. Elle résulte de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques liés aux conditions bioclimatiques et à la vie animale et végétale. La formation et l'évolution d'un sol s'opèrent selon trois processus, plus ou moins simultanés. [1]

I.2.2 Composition :

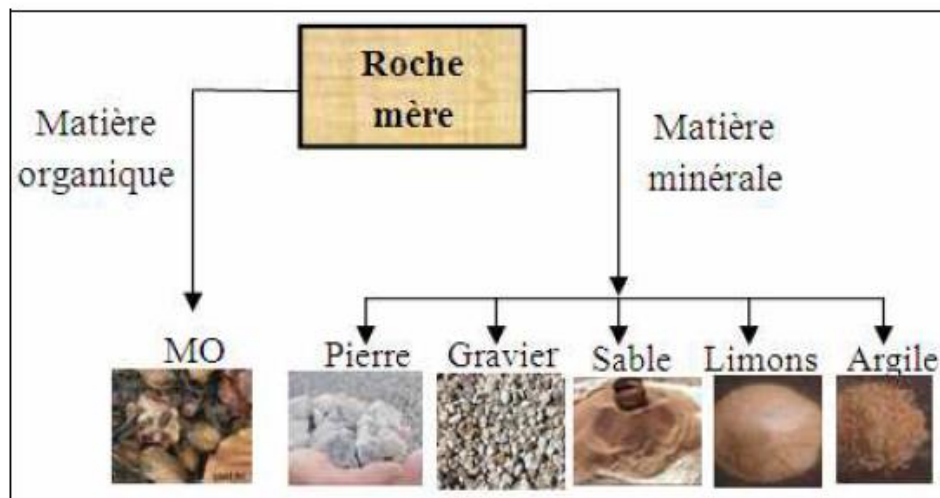


Figure I.1. Composition minérale et organique de la terre. [2]

La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments : les graviers (5-20 mm), les sables (0.08-5 mm), les limons (2 μm -0.08 mm), et les argiles (< 2 μm). Comme nous l'avons constaté, la terre est composée de matériaux inertes (graviers, sables) et de matériaux actifs (silts, argiles). Les premiers jouent un rôle de squelette et les seconds celui de liant, tel un ciment. La terre a donc une structure comparable à celle du béton avec un liant différent (Houben, 1996). Les proportions des éléments constituant les terres vont déterminer leurs comportements et leurs propriétés, par exemple, lorsqu'ils sont soumis à des variations d'humidité certains changent de volume, d'autres non. Les premiers sont instables et les autres stables. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire d'aptitude à supporter les alternances d'humidité et de sécheresse sans variations des propriétés, est fondamentale pour un matériau de construction (Doat, 1979). [3]

I.3 Généralité sur les argiles

L'argile est une matière première utilisée depuis longtemps dans les différentes activités de la vie humaine. Le mot argile provient du mot grec « Argos » ou de latin « Argilo » qui veut dire blanc. [4]

Le mot argile englobe deux commutations, l'une liée à la taille des grains est « inférieure à 2 μm » et l'autre à la minéralogie. [5]

Le terme générique, « argile » est couramment utilisé pour désigner différentes roches sédimentaires, cristaux, présentant une forte teneur en minéraux. Il n'existe pas une mais des argiles. Selon leurs compositions et concentration en minéraux, les différentes argiles sont des structures et des propriétés différentes. [6]

I.3.1 Définition générale :

L'argile est une matière naturelle provenant d'une roche sédimentaire. Le terme « argile » recouvre en effet plusieurs notions différentes en fonction de la discipline concernée. Les géologues considèrent comme argile tous les minéraux de très petite taille (2 à 4 μm), les ingénieurs en génie civil s'attachent plutôt aux propriétés de plasticité, quelle que soit la taille, et enfin les minéralogistes se réfèrent à un minéral caractérisé par sa structure cristallographique.

Les minéraux de type argile à structure en feuillets sont des phyllo silicates, c'est-à-dire des matériaux composés d'oxygène et de silicium composant des tétraèdres SiO_4 . On y trouve aussi des métaux de type magnésium, aluminium ou fer. [7]

I.3.2 Minéralogie des argiles :

Les minéraux argileux sont de très petites particules très actives sur le plan électrochimique. Lorsque le pourcentage d'argile augmente, l'influence de la portion argileuse sur le comportement global du sol augmente proportionnellement. [8]

I.3.3 Structure d'argile :

Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base, ces feuillets sont formés par la juxtaposition découches structurales tétraédriques (silice) et octaédriques (aluminium).

Les couches structurales sont à leur tour formées d'unités structurales de base par empilement d'ions ou d'hydroxydes en disposition hexagonale ou compacte. [8]

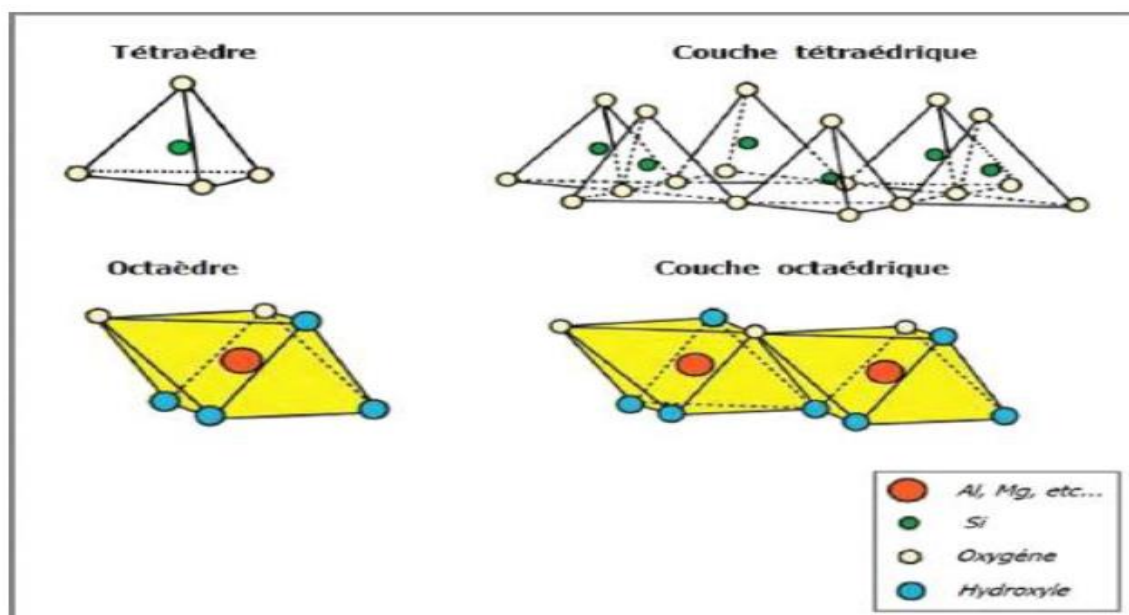


Figure I.2. Représentation des couches tétraédrique et octaèdre. [9]

I.3.4 Propriétés des argiles :

Les minéraux argileux se caractérisent par quatre propriétés principales :

1. formes et surfaces spécifiques.
2. capacités d'adsorption d'eau et de gonflement.
3. multiples possibilités d'échanges cationiques.
4. activité des argiles [10]

I.3.5 Types argile :

La kaolinite : $n [(Si_2O_5) Al_2 (OH)_4]$:

Elle est constituée d'une succession de couches alternées de silice (tétraèdre) et d'alumine (octaèdre). Chaque couche élémentaire a une épaisseur de 7 Å. Cette liaison hydrogène forte entre les feuillets explique l'importance du nombre de feuillets par particule de kaolinite de 100 à 150 feuillets, qui lui donnent une épaisseur de 0,1 mm et une largeur de 1 mm, et la faible valeur de la surface spécifique qui ne dépasse pas 45 m²/g. [11]

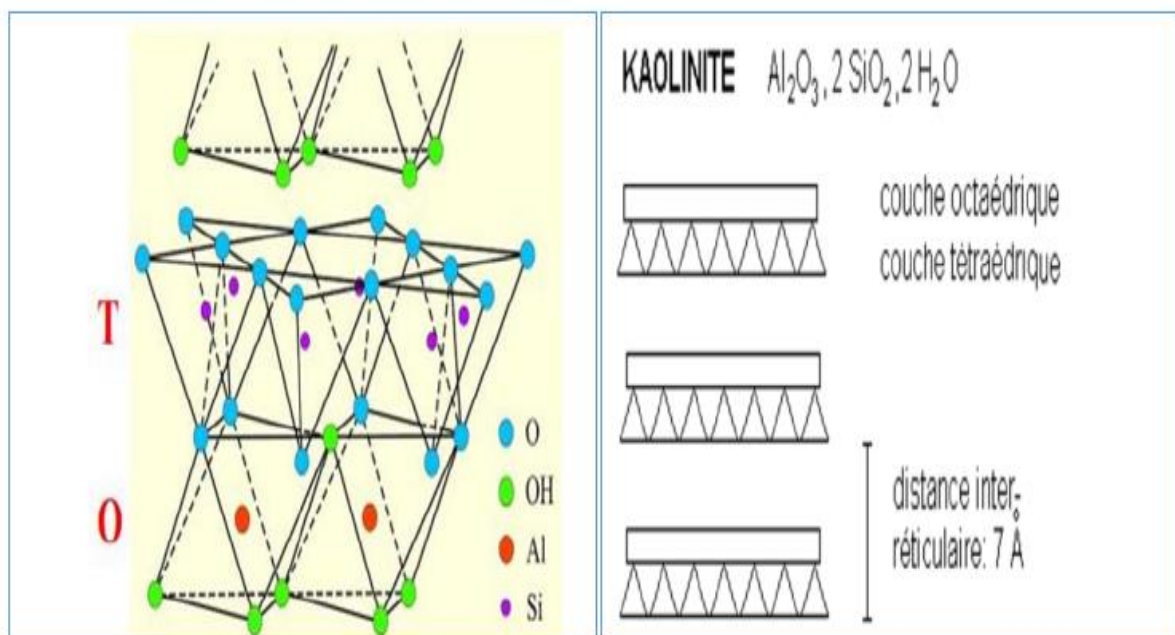


Figure I.3. Représentation structurale d'un minéral argileux de type (T-O). Et structure particulière de la Kaolinite. [12]

L'illite : $n [(Si_{4-n} Al_n O_{10}) Al_2 K_n (OH)_4]$:

Le nom Illite vient de l'État américain de l'Illinois, Le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine (octaèdre) entre deux couches de silice (tétraèdre). Dans les couches de silice, un ion Si^{4+} sur quatre est remplacé par un ion Al^{3+} .

Les particules d'illite sont plates de forme moins régulière que celle des particules de kaolinite. Elles ont diamètre moyen variant entre 0,1 μm et 3 μm et une épaisseur de l'ordre de 0,01 μm à 0,3 μm . L'illite a une surface spécifique totale de l'ordre de 65 à 100 m^2/g . [11]

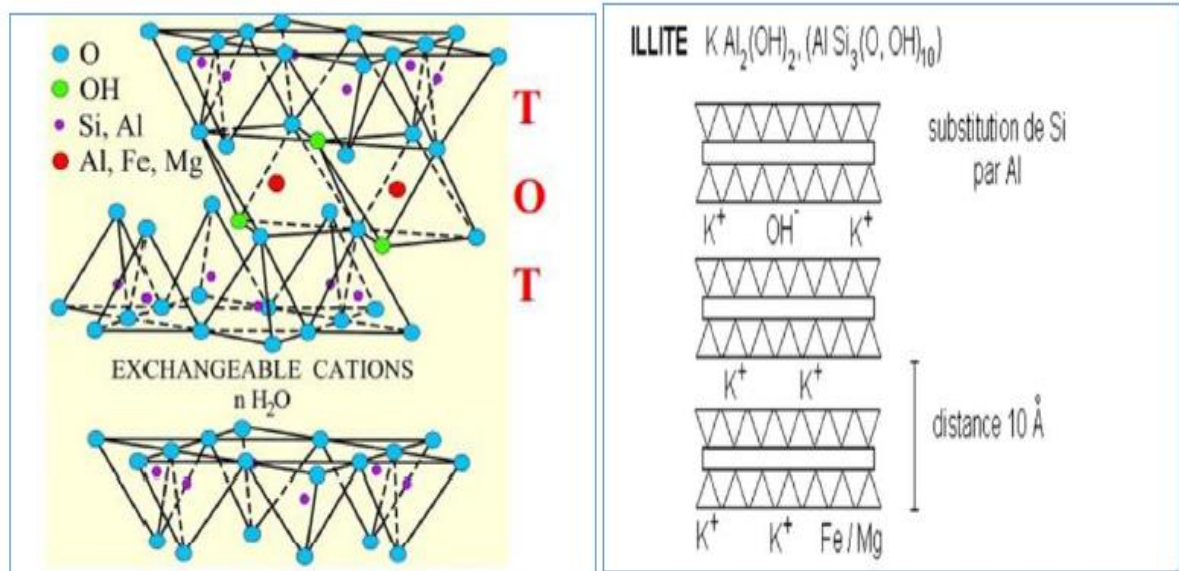


Figure I. 4. Représentation structurale d'un minéral argileux de type (T-O-T) et structure d'illite. [12]

La montmorillonite : $n [(Si_4O_{10})(Al_{5/3} Mg_{1/3} Na_{1/3}(OH)_2)]$:

La montmorillonite, est un minéral argileux de type 2:1 (TOT) dont le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine (octaèdre) comprise entre deux couches de silice (tétraèdre). Les plaquettes de montmorillonite ont une forme quelconque et de taille très petite, un diamètre moyen entre 0,1 μm et 1 μm et une épaisseur moyenne entre 0,001 μm et 0,01 μm . La montmorillonite possède une surface spécifique totale entre 700 et 900 m^2/g et un espace inter-feuillets de 9,6 \AA à 15 \AA [11].

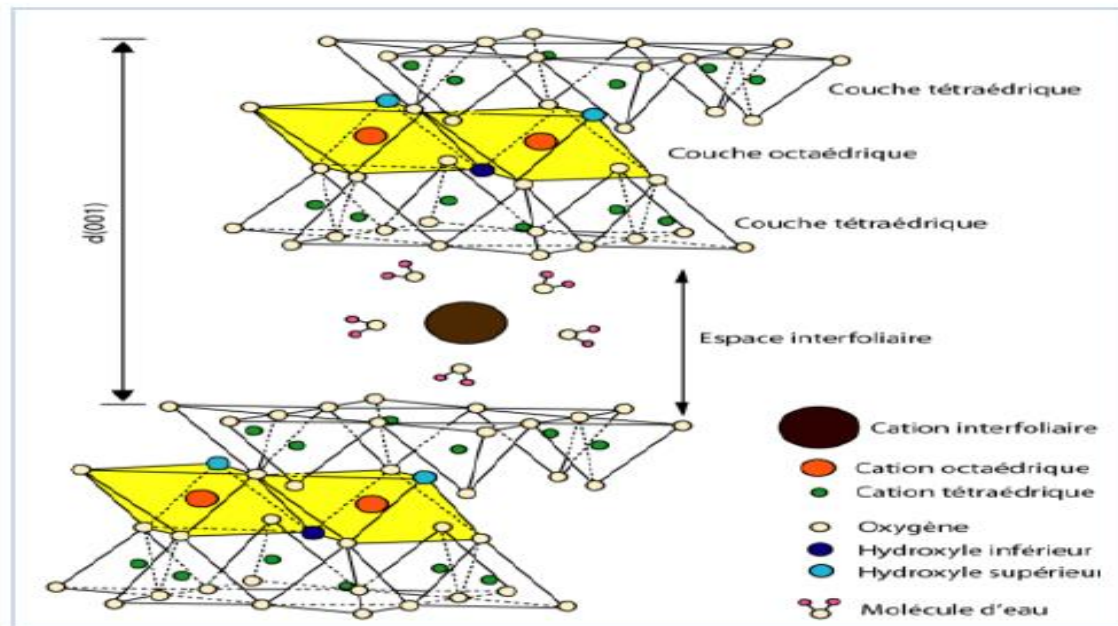


Figure I.5. Représentation schématique de la montmorillonite (T-O-T-O). [13]

I.3.6 Activité des argiles :

On définit l'activité d'une argile par le rapport de l'indice de plasticité (I_p) et du pourcentage des éléments inférieurs à deux microns ($C_2 < 2\mu m$) $A_c = I_p / C_2$. [14].

I.4 Les sables

I.4.1 Définition des sables :

Le sable, est une roche sédimentaire meuble, constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0,063 et 5 mm. [15]. Le sable comporte différentes variétés de minéraux qui sont dérivés de l'élément de base le silicium (Si). Ces principaux minéraux sont classés comme suit : silice, silicates (famille la plus abondante dans la nature, plus de 90 % du poids de l'écorce terrestre).

Il peut avoir une origine naturelle ou artificielle; d'origine naturelle, il provient de la désagrégation naturelle de roches au cours de leur processus d'érosion [16].

I.4.2 Classification des sables :

On peut classer les sables selon trois paramètres dont :

1. Granulométrie

Elle permet de séparer les sables en trois catégories :

- **Sables fins** : plus de 75% des éléments supérieurs à $80\mu m$, sont inférieurs à $0,5mm$. Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.

- **Sables moyens** : Moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m sont compris entre 0,2 et 2mm.

- **Sables grossiers** : Plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m sont compris entre 0,5 et 5mm. Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves [17]

2. Propreté

La propreté d'un sable est une caractéristique déterminante par l'essai d'équivalent de sable. Afin de donner des limites pour chaque type de sable. [15]

3. Minéralogie de sable

En général, les sables peuvent être classés comme suit :

-Sables siliceux.

- Sables silico-calcaires.

- Sables calcaires. [18]

I.4.3 Les types des sables :

Selon leurs provenances, les sables peuvent être classés comme suit :

✓ **Sable de rivière** : il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau.

✓ **Sable de mer** : il provient des côtes de la mer.

✓ **Sable de carrière** : Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants.

✓ **Sable artificiel** : il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, gré ...). Il est souvent plein de filler. Pour qu'il soit utilisable dans les bétons, il faut limiter le pourcentage des fines.

✓ **Sable de dune** : c'est une variété des sables de mer. Il est donc très fin. [17].

I.5 La modélisation

I.5.1 Définition :

La modélisation est la représentation d'un système par un autre, plus facile à appréhender il peut s'agir d'un système mathématique ou physique le modèle sera alors numérique ou analogique. [19].

I.5.2 Importance de la modélisation :

La modélisation est l'étape clé de toute analyse, elle consiste à rattacher la structure réelle à un modèle connu de la mécanique des solides, structures et matériaux qui sont capable d'en décrire le fonctionnement avec une précision convenable. Donc pratiquement la modélisation consiste :

En ce qui concerne la structure, à ramener cette dernière à une géométrie en choisissant des axes (barre, poutre câble), des plans (parois, plaques coques), des volumes (solides) après avoir éliminé certains détails (gousset, petites excentricités ...), à choisir la théorie la plus appropriée à cette géométrie pour définir les conditions d'appuis et les charges.

Choisir de façon réaliste les lois constitutives des matériaux décrivant aussi bien les réponses mécaniques classiques, (linéaires anisotropes discontinuité) que les phénomènes physiques (teneur en eau, discontinuité, perméabilité), à déterminer les propriétés qui définissent ces lois et à connaître l'état initial des matériaux (contraintes initiales) [20].

I.5.3 Modélisation des sols :

I.5.3.1 Modèles en mécanique des sols :

La notion de contrainte effective introduite par Terzaghi et le critère de Mohr-Coulomb ont permis depuis les années "cinquante" de caractériser le comportement des sols ; puis des lois de comportement élasto-plastiques ont connu un fort développement grâce notamment à la généralisation de l'essai triaxial (Peng He, 2006).

En général, le comportement des sols est décrit par des lois élastiques linéaires ce qui, pour un grand nombre de matériaux, est vérifié expérimentalement.

Toutefois ce comportement élastique n'est vérifié que dans certaines limites de contraintes et de déformations ; au-delà de ces limites, le matériau perd cette propriété. Il convient donc de vérifier si les résultats d'un calcul réalisé avec un modèle d'élasticité linéaire correspondent à un état contraintes-déformations inclus dans ce domaine élastique.

Il faut bien distinguer la notion de limite élastique de la notion de limite de rupture. En effet, pour certaines constructions, il est parfaitement admissible de dépasser la limite élastique, on demande seulement de ne pas aller jusqu'à la rupture. Pour d'autres constructions, au contraire, il est impératif de rester dans les limites élastiques pour que le matériau retrouve sa forme initiale après décharge. Au-delà des limites élastiques, la plasticité des matériaux doit être prise en compte. Les principaux modèles élasto-plastiques utilisés pour les matériaux d'Ugénie civil sont les suivants :

- Modèle de Von Mises.
- Modèle de Tresca.
- Modèle de Drucker-Prager.
- Modèle de Mohr-Coulomb.
- Modèle de Duncan-Chang.
- Modèle de Cam-Clay.

Sauf le modèle de Mohr-Coulomb qu'on va utiliser dans notre modèle, le détail d'autres modèles ne sera pas rappelé ici. C'est l'interprétation des essais sur les matériaux qui permettra de choisir le modèle le mieux adapté au matériau étudié. Des lois de comportement spécifiques peuvent être développées à partir des lois classiques pour des matériaux particuliers.

I.5.3.2 Modèle élastique :

Pour des sollicitations multidirectionnelles, nous rappelons que la loi de comportement s'écrit sous forme tensorielle.

$$\sigma = D \cdot \varepsilon$$

Ou $\varepsilon = C \cdot \sigma$

C et D sont des tenseurs de 4^{ème} ordre inverse l'un de l'autre, qui dans le cas le plus général comporte 36 composantes distinctes. Le comportement de sol peut être fondé sur une élasticité linéaire isotrope de Hook, la linéarité du comportement se traduit par une proportionnalité entre le champ de contrainte et le champ de déformation $D \equiv C^{-1}$ e tenseur s'écrit.

$$D = (K - 2/3G) \delta_{ij} \delta_{kl} + (G \delta_{ik} \delta_{il} + \delta_{il} \delta_{jk})$$

K : Module volumique.

G : Module de cisaillement.

Notons dans ce cas G et K sont constants, le module sécant devient égal au module tangent cela signifie que la relation ci-dessus peut avoir une forme incrémental. En fait il a été montré qu'il n'est possible d'exprimer la loi de comportement sous forme incrémental faisant dépendre G et K de l'état de contrainte actuel. Sur certains chemins de contraintes fermés, cette formulation impliquerait une dissipation d'énergie et une déformation résiduelle non nulle. Ce qui est contradictoire à la théorie d'élasticité.

Le modèle élastique linéaire proposé pour le sol, se veut simple et reste utilisable devant la complexité des sols, mais reste toujours incapable à prédire les déformations irréversibles et la variation de volume de sol sous cisaillement. [25].

I.5.3.3 Loi de comportement de Mohr-Coulomb :

Cette loi élastique parfaitement plastique est utilisée pour décrire de manière approchée le comportement des sols pulvérulents (sable), des sols cohérents à long terme (argiles et limons) et de certaines roches. La loi de Tresca, qui est un cas particulier de la loi de Mohr-Coulomb, est utilisée pour l'étude des sols à court terme.

Dans l'espace des contraintes principales effectives ($\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$) la surface définie par la fonction de charge F est une pyramide de section hexagonale ayant pour axe la droite d'équation :

$\sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3$, L'équation de la surface de charge est la suivante :

$$F(\sigma'_{ij}) = |\sigma'_1 - \sigma'_3| - (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \varphi' - 2c' \cos \varphi' = 0$$

Où σ'_1 et σ'_3 représentent les contraintes principales extrêmes ($\sigma'_1 \geq \sigma'_2 \geq \sigma'_3$ avec la convention de signe suivante : les compressions sont comptées positivement).

Le potentiel plastique s'écrit, en fonction des contraintes principales extrêmes :

$$G(\sigma'_{ij}) = |\sigma'_1 - \sigma'_3| - (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \psi$$

Lorsque les angles φ' et ψ sont égaux, la règle d'écoulement est dite associée. La partie élastique du comportement est définie par l'élasticité linéaire isotrope de Hooke. Au total, la loi de Mohr-Coulomb comprend cinq paramètres mécaniques : E' (module d'Young), ν' (coefficient de Poisson), c' (cohésion), φ' (angle de frottement) et ψ (angle de dilatance). Lorsque $\varphi' = 0^\circ$ et $\psi = 0^\circ$, la loi est appelée **loi de Tresca**.

Les paramètres de la loi de Mohr-Coulomb sont déterminés couramment à partir des résultats d'essais de laboratoire (par exemple, oedomètre et appareil triaxial pour un sol).

I.6 Méthode des éléments finis

I.6.1 Définitions de la méthode de l'élément finis :

La des éléments finis est une procédure numérique pour analyser les structures et les milieux continue. Habituellement le problème adressé est compliqué à résoudre d'une manière satisfaisante par des méthodes analytiques classiques. [22]

I.6.2 Principe de la méthode des éléments finis :

En analyse numérique, la méthode des éléments finis (MÉF, ou FEM pour finité éléments méthodes) est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, génie civil, construction navale, thermodynamiques, etc.).

Les méthodes numériques sont généralement implémentées dans les codes développés par les chercheurs ou des codes commerciaux tels que (MATLAB, ABAQUS, ANSYS, ADINA et PLAXIS) basés sur la méthode des éléments finis, FLAC en Méthode des différences finies et (UDEC, PFC) en Méthode des éléments discrets (Peng He, 2006). [21].

I.6.3 Avantage de la méthode des éléments finis :

- On peut représenter un grand nombre de formes de structures à l'aide du modèle analytique général commun.
- La faculté de définir des maillages très irréguliers et depuis l'origine est l'un des grands avantages de la méthode des éléments finis.
- On peut accepter des lois complexes de propriétés intrinsèques des matériaux si on compare aux possibilités des méthodes classiques de résolution, et offrent plus vastes perspectives en analyse non linéaire. [23]

I.6.4 Classement d'éléments finis :

Les différents types d'éléments finis suivant leur géométrie. Plusieurs classes d'éléments finis peuvent être distinguées :

- Les éléments 1D : barres, poutres rectilignes ou courbes.
- Les éléments 2D : élasticité plane (déformation ou contrainte plane), plaque en flexion, coques courbes.
- Les éléments 3D : éléments de volume ou coques épaisses. [24]

I.7 Conclusion

Cette partie de l'étude bibliographique a permis de nous donner une idée sur la terre et leur composition minérale et organique. Ainsi que, nous avons présenté les sols argileux et les sols de nature sableux, cela fait partie de composition de la terre, en plus les caractéristiques minéralogiques et différents types et classifications pour les deux.

Par ailleurs, aujourd'hui pour résoudre les problèmes en mécanique des sols, les géotechniciens orientés vers des solutions numériques, ils ont utilisés des logiciels, ces logiciels appuyant sur la modélisation par la méthode des éléments finis, et ils ont utilisés des différentes lois de comportements, tel que la loi de Mohr-coulomb.

Finalement, les notions de base de modélisation des sols sont présentées.

Chapitre II

Identification des matériaux étudiés

II.1 Introduction

Dans le cadre de la détermination des caractéristiques physico-mécaniques des matériaux locaux de la région de Gourara, nous avons procédé aux prélèvements des échantillons sur deux nouveaux gisements restant en abondances dans la région de Timimoun, tel que l'argile et le sable de dune.

Le présent chapitre, regroupe les résultats d'essais géotechniques des différents matériaux utilisés (Argile, Sable de dune) ainsi que leurs interprétations.

II.2 Localisation des matériaux utilisés

Dans notre travail, il est focalisé l'étude sur deux sols, le premier c'est un sol de nature argileux (l'Argile), et le deuxième c'est un sol de nature sableux (Sable de dune).

➤ L'Argile :

Le site d'argile est situé au Sud-ouest de la ville de Timimoun sur la côté gauche de la route menant vers la wilaya d'Adrar (Photo II.1).



Photo II.1. Zone de prélèvement de l'argile utilisée.

➤ Le sable de dune :

Le sable analysé est un sable de dune, provenant non loin de la ville de Timimoun (l'Erg occidental) (Photo II.2).



Photo II.2 Photo satellitaire de la zone de prélèvement du sable de dune.

II.3 Essais d'identification

L'identification et la classification d'un matériau ont pour but de déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques et chimiques qui permettent de le caractériser. Il existe une série d'essais de laboratoire qui permet d'y parvenir avec précision :

Le sol (Argile):

- ✓Le poids spécifique des grains solide (NF P 94-054)
- ✓L'analyse granulométrique par sédimentation (NF-P94-057)
- ✓Les limites d'Atterberg (NF-P 94-051)
- ✓L'essai de bleu de méthylène (NF-P94 068)
- ✓Teneur en carbonate de calcium CaCO₃ (NF P94-051)

Le sable :

- ✓L'analyse granulométrique par tamisage (NFP18-560)
- ✓Le module de finesse (NF P 18-304)
- ✓L'équivalent de sable (NF P 18-597)
- ✓La masse volumique apparente (NF P 18 555)
- ✓La masse volumique absolue (NFP18-554)

II.3.1 Les caractéristiques physiques d'argile étudiée :

II.3.1.1 Essai de poids spécifique des grains solides (NF P94-054) :

1- Définition :

Le poids spécifique des grains solides du sol (γ_s) est le rapport du poids de ces particules (w_s) par leur volume absolu (v_s), γ_s est exprimé en (g/cm³).

A l'aide d'un pycnomètre de volume normalisé (25,50 et 100cm³ à 20°C) on mesure le poids spécifiques des particules solides.

$$\gamma_s = W_s / V_s$$

Avec :

γ_s : Poids spécifique des particules solides.

W_s : Poids du sol sec.

V_s : Volume des particules solides.

2- Le but de l'essai :

Le but de cet essai est la détermination du poids spécifique, le volume absolue et la densité des grains solides.



Photo II.3. Mode opératoire de l'essai.

• **Expression des résultats :**

Le volume des particules solides est déterminé par la relation suivant :

$$V_s = \frac{(W_2 - W_1) - (W_4 - W_3)}{\gamma_w}$$

Avec :

W1 : poids de pycnomètre vide

W2 : poids de pycnomètre + eau distillé

W3 : poids de pycnomètre + sols sec

W4 : poids de pycnomètre + eau + sols

γ_w : Poids volumique d'eau à la température (20°C).

Le poids sec des grains solides : $W_s = W_3 - W_1$

Les résultats des essais des poids volumiques d'argile et du sable concassée est résumé dans le tableau suivant

Tableau II.1. Résultat d'essai poids spécifique des grains solide d'argile.

| Poids W | W1 (g) | W2 (g) | W3 (g) | W4 (g) | γ_s (g/cm ³) |
|----------|--------|--------|--------|--------|---------------------------------|
| Argile T | 68,4 | 170,3 | 78,3 | 176,4 | 2,62 |

Tableau II.1. Les Valeurs de G_s pour différents types de sols à 20° C.

| Sols | Quartz | Calcite | Dolomite | Kaolinite | Illite | Montmorillonite |
|-------|--------|---------|----------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| G_s | 2,66 | 2,72 | 2,85 | <u>2,61</u> <u>2,64</u> | <u>2,60</u> <u>2,86</u> | 2,75 _ 2,78 |

Le poids volumique sec de la argile Timimoun est $2,62\text{g/cm}^3$, donc notre argile est constitué de élément **kaolinite et illite**.

II.3.1.2 Analyse granulométrique par sédimentation (NF P94-057) :

1- Le But :

C'est un essai qui consiste à déterminer les diamètres équivalent des particules sphériques en fonction de leur vitesse de chute selon la loi de STOCKES, dans un environnement visqueux à fin d'obtenir le tracé de la courbe granulométrique pour des particules inférieur à $80\mu\text{m}$.

2- Principe de l'essai :

L'essai est basé sur la loi de stocks ou la vitesse de sédimentation des particules en suspension dans un milieu dépend de leurs diamètres.

3- Mode d'opérateur :

L'analyse par sédimentation est un essai géotechnique qui complète l'analyse granulométrique par tamisage. Les particules inférieures à $80\mu\text{m}$ séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'un défloculant. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densimètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et la profondeur d'immersion de l'appareil. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données.



Photo II.4. Appareillage de l'analyse granulométrique par sédimentation.

• Principe de calcul :

1- Calcul de pourcentage des particules non décantées

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

$$P = \left[100 * \frac{V_S}{M} * \frac{\rho_S}{\rho_S - \rho_W} * \rho_W \right] * (R_t - R_B)$$

Avec :

V_S : Volume de suspension 1000L

M : Masse de sol sec utilisé.

ρ_S : Masse volumique des grains solides

ρ_W : Masse volumique de l'eau.

R_t : Lecture de l'éprouvette A au temps t.

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

2- Calcul du diamètre des particules non décantée

Le diamètre des particules qui sont en suspension est donné par la relation :

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

F: est un facteur donné par l'abaque (voir annexe).

📌 Présentation des résultats :

Les résultats obtenus sont représentés graphiquement sur la courbe dite « courbe granulométrique », voir figure II.1. A partir de cette courbe nous pourrons par la suite classer le sol.

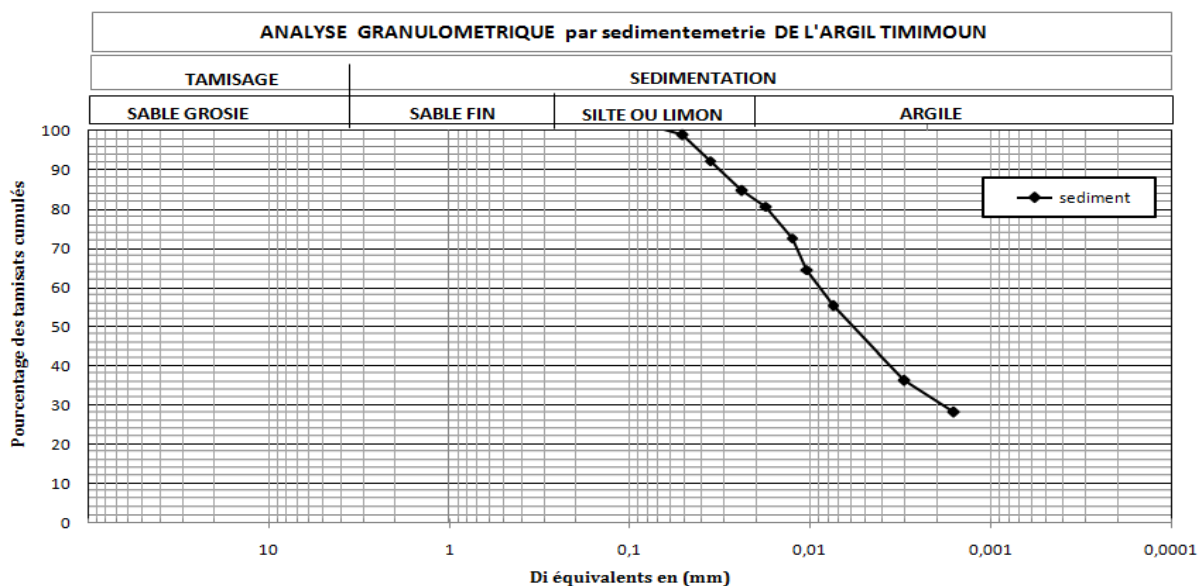


Figure II.1. Courbe granulométrique de l'argile analysée.

A partir de la figure II.1, nous remarquons qu'on est en présence d'un sol fin, de 80% des éléments ont un diamètre inférieur à $80\mu\text{m}$, avec les éléments inférieure à $2\mu\text{m}$ est 31%.

II.3.1.3 Les limites d'Atterberg (NF P 94-051) :

La consistance d'un sol peut varier dans de large limites avec :

- La quantité d'eau interstitielle que contiennent ses pores.
- L'épaisseur des couches d'eau absorbée qui enrobent ses grains.

Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre :

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité W_L).
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité W_p).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimé en pourcentage poids du matériau sec. Nous pouvons présenter ces trois états de consistance (Figure II.2) :

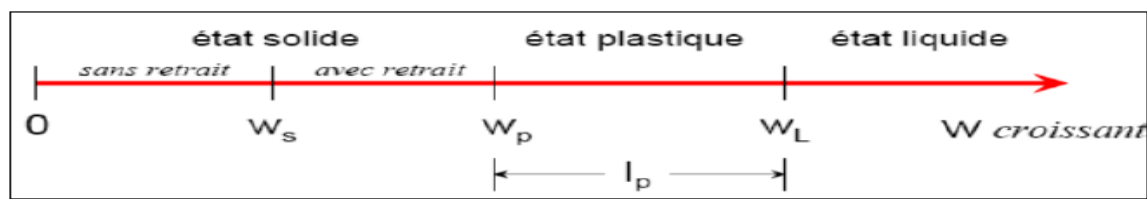


Figure II.2. États d'un sol en fonction de sa teneur en eau [17].

A. Limites de liquidité (W_L) :

La limite de liquidité (W_L) caractérise la transition entre un état plastique et un état liquide.

C'est la teneur en eau pondérale, exprimée en pourcentage.

1- But :

Il consiste à déterminer la teneur en eau de notre échantillon lors de son passage de l'état liquide à l'état plastique par la méthode de la coupelle de casagrande.

2- Principe d'essai :

Elle consiste à déterminer la teneur en eau de l'échantillon. Cet échantillon est lavé au tamis de $0,4\text{mm}$ afin de récupérer le tamisât. Ce tamisât, une fois transformé en pâte homogène, est répartie dans la coupelle. A l'aide de l'outil à rainure, elle est divisée en deux (02) parties égales. Ensuite, on porte des coups à la coupelle grâce à la manivelle jusqu'à obtenir une fermeture d'un centimètre de la pâte. Une tranche de cette pâte sera pesée humide puis séchée à l'étuve Afin de déterminer sa teneur en eau. L'opération est effectuée six (06) fois et on s'assure quel plage de coups [15-35] est respectée.

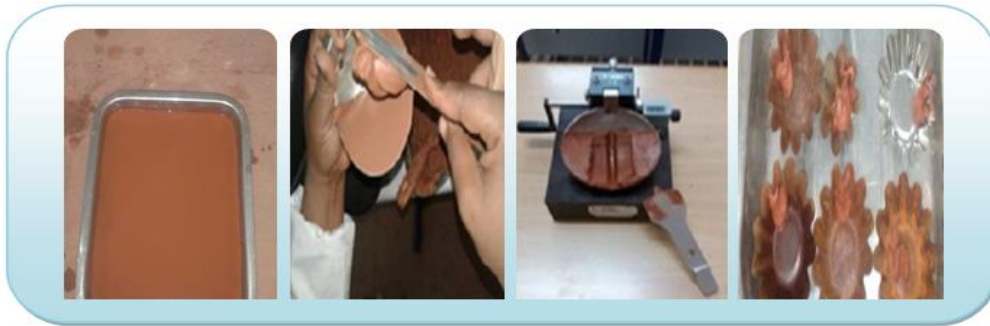


Photo II.5. Mode opératoire de l'essai de la limite de liquidité.

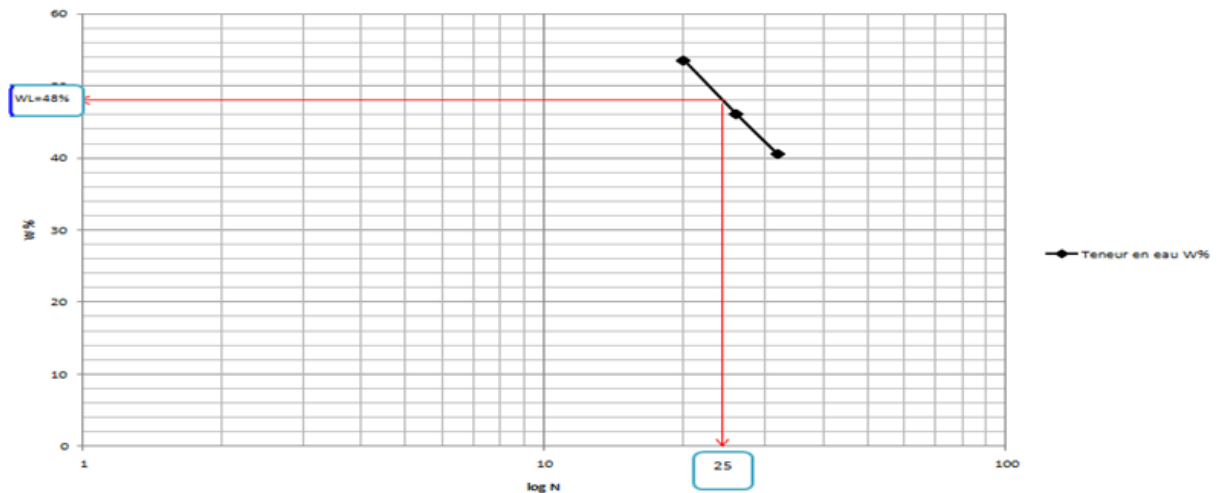


Figure II.3. La courbe de la limite de liquidité.

On en déduit WL correspondant à $N=25$ coups, on a : $WL= 48\%$.

B. Limite de plasticité (WP) :

1- Définition :

Par définition, la limite de plasticité WP est la teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide.

2- Mode opératoire :

Pour déterminer la limite de plasticité, on roule l'échantillon en forme de cylindre qu'on amincit progressivement. La limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise en petits tronçons de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3 mm. Il faut donc réaliser des rouleaux de 3 mm de diamètre sans pouvoir faire de rouleaux plus fins. On exécute en général deux essais pour déterminer cette limite.



Photo II.6. Mode opératoire de l'essai de la limite de plasticité.

Le résultat d'essai de la limite de plasticité est présenté dans le tableau II.4 :

Tableau II.2. Résultats de la Limite de plasticité.

| N° de tare | | | Plasticité | | | |
|----------------------|----------|------------|------------|----|-------|-------|
| | | | C7 | C6 | Z2 | S9 |
| Teneur en eau | W | (%) | 16,67 | 30 | 18,18 | 28,57 |

D'après le tableau II.3 en déduit que la limite de plasticité est la moyenne des quater teneurs en eau $WP=23,35\%$.

Indice de plasticité :

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

$$IP = 48 - 23,35 = 24,65\%$$

Suivant la valeur l'indice de plasticité, les sols peuvent se classer comme suit, voir tableau II.5 :

Tableau II.3. Classification des argiles selon BURMISTER(1967) [2].

| Indice de plasticité | Degré de plasticité |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $0 < I_p < 5$ | Sol non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs) |
| $5 < I_p < 15$ | Sol peu plastique |
| $15 < I_p < 40$ | Sol plastique |
| > 40 | Sol très plastique |

On a $IP = 24.65\%$, $15 < IP < 40$

D'après le tableau II.4 de comportement plastique cette Argile est le suivant les normes est le sol plastique.

Atterberg (1973) classe la plasticité des argiles en trois niveaux comme montrés dans le tableau II.5 Suivant :

Tableau II.4. Classification des argiles selon Atterberg(1973) [2].

| IP(%) | <7 | 7à17 | >17 |
|------------|--------|---------|--------------|
| Plasticité | Faible | Moyenne | Elevé |

D'après la classification d'Atterberg, on classe notre argile suivant l'indice de plasticité comme plasticité élevé.

Pour déterminer l'étude d'argile utilisée, portant les résultats obtenus sur le diagramme de Casa grande (Figure II.4) en fonction de la limite de liquidité et l'indice de plasticité.

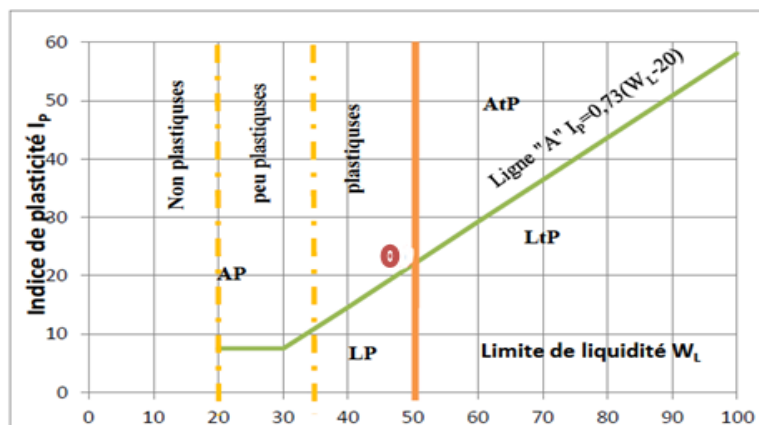


Figure II.4. Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert, 1977).

Avec :

Atp: argiles très plastiques.

AP : argiles peu plastiques.

Ltp: limons très plastiques.

Lp: limons peu plastiques.

 **L'Argile étudiée**

En utilisant ce diagramme, nous remarquons que l'argile de Timimoun se classe parmi le sol : **Argileux plastiques**.

Activité des argiles :

D'après Skempton l'activité AC, est définie comme le rapport de l'indice de plasticité IP à la teneur en particules argileuses (teneur en particules de dimensions inférieures à 2 μ) :

$$A_c = \frac{\text{Indice de plasticité } I_p}{\% \text{ Elements } < \text{ à } 2\mu}$$

$$AC = \frac{24,65}{31} = 0,79$$

Tableau II.5. Activité des sols (cité par techniques de l'ingénieur) [12].

| Activité (Ac) | Dénomination |
|-------------------------------|---------------|
| 0 < AC < 0.5 | Inactif |
| 0.5 < AC < 0.75 | Peu actif |
| 0.75 < AC < 1.25 | Normal |
| 1.25 < AC < 2 | Actif |
| AC > 2 | Très actif |

Par rapport au tableau II.6, on peut connaître l'activité de notre argile à une activité normale.

On peut aussi connaître la nature d'argile en comparant cette activité à celle de certains minéraux donnés par le tableau II.7.

Tableau II.6. Activité des différents minéraux (Skempton, 1953 et Mitchell, 1976) [11].

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

II.3.2 Les caractéristiques chimiques

II.3.2.1 Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068) :

1- Définition :

Cet essai, utilisé d'une manière courante pour caractériser des argiles contenues dans les sols, ainsi que pour évaluer l'influence des fines d'origine argileuses contenues dans les sables et graves d'origines naturelle ou Artificielle.

2- But de l'essai :

Cet essai a pour but de mesurer la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour saturer un sol. Cette dernière est directement liée à la surface spécifique qui est elle-même reliée à l'activité du sol.



Photo II.7. L'appareillage de l'essai du bleu.

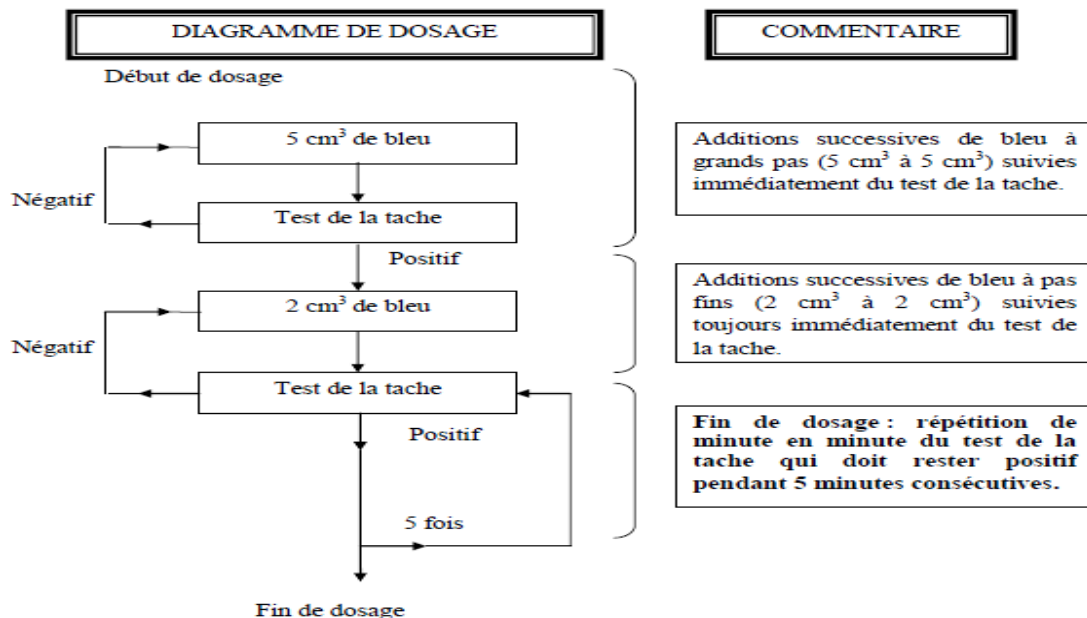


Figure II.5. Schéma synoptique du processus opératoire de l'essai du bleu à la tache (Scaeffner, 1989).

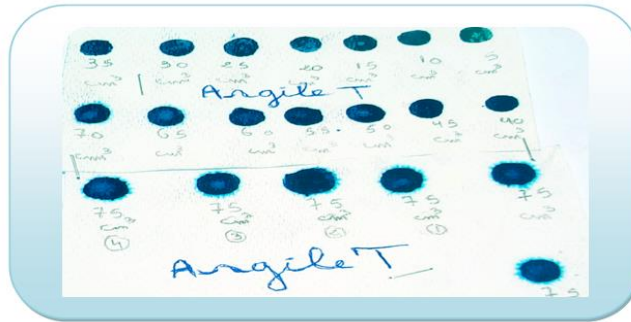


Photo II.8. Test de la tâche pour l'argile.

• **Principe des calculs :**

La valeur du sol est (sans unité) : $VB = \frac{V}{m}$

Avec : V : volume du bleu ajouté en cm^3 m : la prise d'essai

La surface spécifique totale de la prise d'essai est donnée par

$$SST (m^2/g) = 20,93 * VB$$

Les résultats d'essai sont regroupés dans le tableau II.8 suivant :

Tableau II.7. Résultats d'essai au bleu de méthylène.

| Sol | V (cm ³) | VB | SST (m ² /g) |
|------------------------|----------------------|-----|-------------------------|
| Argile Timimoun | 75 | 7,5 | 156,97 |

Tableau II. 8 Classification des sols selon la valeur de bleu [2].

| Sols | Valeur de bleu |
|------------------------|--------------------------------------|
| Sols sableux | $VB < 0,2$ |
| Sols limoneux | $0,2 < VB < 2,5$ |
| Sols limoneux argileux | $2,5 < VB < 6$ |
| Sols argileux | $6 < VB < 8$ |
| Sols très argileux | $VB > 8$ |

D'après les deux tableaux sus indiqués on peut classer le sol comme suit :

Le sol de la région de Timimoun est un sol argileux.

II.3.2.2 Teneur en carbonate de calcium CaCO_3 (NF P94-051) :

La teneur en carbonate de calcium CaCO_3 d'un sol est déterminée par attaque à l'acide chlorhydrique d'une certaine quantité de sol sec. La mesure de la quantité de gaz carbonique dégagé permet de calculer la masse de carbonate de calcium dissoute et donc la teneur en carbonates de calcium du sol CaCO_3 , exprimée en pourcentage de la masse de la phase solide du sol (photo II.9).

Les sols fins contenant du carbonate de calcium peuvent être désignés comme indiqué dans le tableau II.10, en complément de leur classification géotechnique.

Tableau II.9. Teneur en CaCO_3 de quelques sols.

| Pourcentage de CaCO_3 | Dénomination |
|--------------------------------|------------------|
| 0 à 10 | Argile ou limon |
| 10 à 30 | Argile Calcaire |
| 30 à 70 | Marne |
| 70 à 90 | Calcaire marneux |
| 90 à 100 | Calcaire |

La teneur en carbonate de calcium CaCO_3 est représentée par la formule suivante :

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

La réaction qui se produit est de forme :



1-Appareillage utilisé :

- Calcimètre Dietrich – Fruhling.
- Hcl.
- Burette de 10 cm³.
- Balance de précision 1/100g
- Tamis 0.2 mm

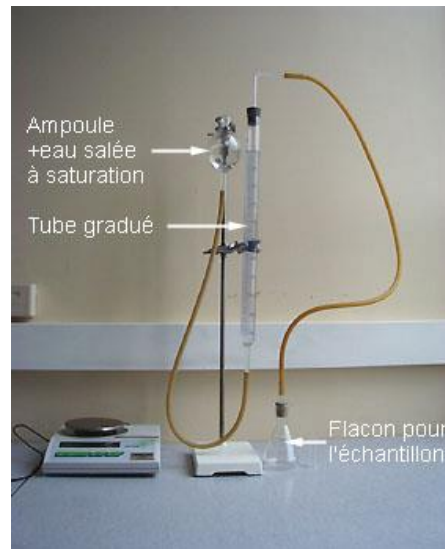


Photo II. 9 Appareil de Calcimètre Dietrich – Fruhling.

2-Mode opératoire :

- L'échantillon séché tamisé au 0,2 mm est versé dans un flacon auquel on introduit une burette contenant 10 cm³ de HCl.
- On ferme l'ensemble grâce à un bouchon relié à un Calcimètre et on prend la lecture initiale correspondant au volume d'air du flacon.
- Après agitation de l'ensemble (échantillon + acide), on prend la lecture finale.
- On procède de la même manière en remplaçant l'échantillon sec par 0,5g de carbonate de calcium.

Tableau II. 10 Valeurs de la teneur en carbonate de calcium.

| La région | Timimoun |
|-----------------------|----------|
| CaCO ₃ (%) | 2,7 |

D'après la valeur obtenue, le sol a été classé comme un sol argileux ou limoneux.

II.4 Les caractéristiques physiques de sable de dune

II.4.1 Essai analyse granulométrie par tamisage à sec (NF P18-560) :

1- Définition :

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille).

L'Objectif de cet essai est la détermination de la quantité (masse) de grains Par diamètre jusqu'à 80µm.

2- But de l'essai :

L'analyse granulométrique Permet de déterminer Les proportions pondérales respectives des grains de différentes tailles dans le sol.

La courbe granulométrique est caractérisée par deux coefficients :

Le coefficient d'uniformité, noté **Cu** et Le coefficient de courbure noté **Cc**.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

D10, D30, D60 représentent les diamètres correspondants respectivement aux tamis cumulés de 10% et 30% et 60%



Photo II.10. Mode opératoire et appareillage de l'analyse granulométrique.

• Résultats et interprétations :

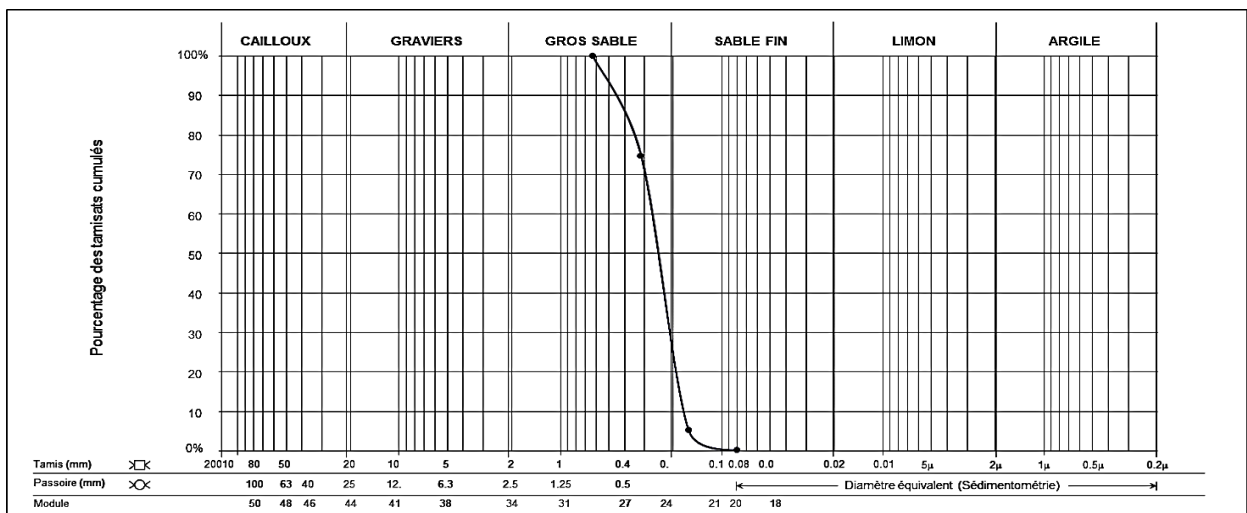


Figure II.6. La courbe granulométrique du sable de dune étudié.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant

Tableau II.11.Résultat de l'analyse granulométrie.

| Sol | D10 | D30 | D60 | Cc | Cu |
|---------------|------|-----|------|------|------|
| Sable de dune | 0,17 | 0,2 | 0.37 | 0.63 | 2.17 |

➤ **La Classification LCPC :**

Pour D2mm RC % : 100 > 50 donc sol grossier ou sol grenus

Pour D80um TC % : 0.06 < 50

Cu = 2.17 Cc = 0.63

Selon la classification LCPC la classe de notre sable de dune est un **sable propre mal gradué**.

II.4.2 Module de finesse : Norme (EN 13139) [11]

L'objectif d'essai d'Analyse granulométrique est de déterminer la Module de finesse C'est une caractéristique intéressante, surtout en ce qui concerne les sables.

*** Expression du Module de finesse :**

$$M_f = \frac{\sum (\text{Refuscumulustamis } 0.125-0.25-0.5-1-2-4)}{100}$$

$$MF = \frac{\sum \{(>4)+(>2)+(>1)+(>0,5)+(>0,25)+(>0,125)\}}{100} = 1.2$$

Tableau II.12.Grosueur ou finesse en fonction du pourcentage de passant au tamis de 0,5 [4].

| Sable Fine | Sable Moyens | Sable Grossier |
|------------|--------------|----------------|
| 0,6 à 2,1 | 1,5 à 2,8 | 2,4 à 4,0 |

Résultats et Interprétation de l'essai de module de finesse donne le tableau II. 13.

Tableau II.13. Résultats de l'essai module de finesse.

| Sable | MF(%) | Interprétation |
|------------|-------|----------------|
| Sable dune | 1.2 | Sable fine |

II.4.3 Essai équivalent de sable (NFP 18-597) :

1- Définition :

L'équivalent de sable est un indicateur, utilisé en géotechnique, caractérisant la propriété d'un sable ou d'un grave.

2- But de l'essai :

L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable.

3- Principe :

L'équivalent de sable est consisté à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage

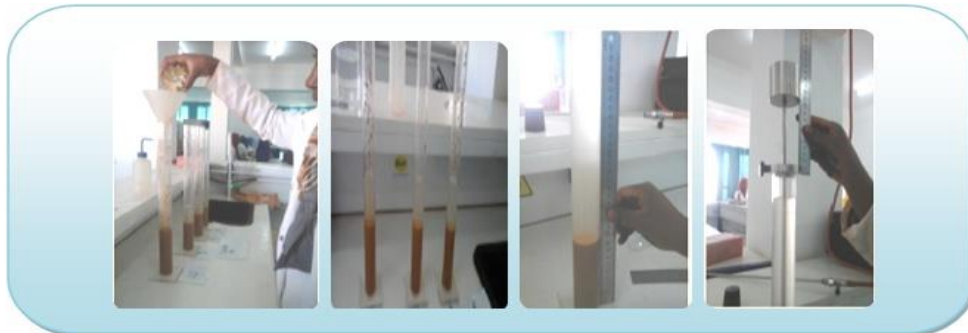


Photo II.11. Mode opératoire et appareillage de l'équivalent de sable de dune.

• Principe de calcul :

L'équivalent de sable est donné par la formule :

$$ES = 100 \cdot \frac{h_2}{h_1}$$

Avec :

h 1 : hauteur de sable avec les fins.

h 2 : hauteur de sable visuel avec Flocculant.

ES moyenne = 94 %

Tableau II.14. Interprétation d'un essai d'équivalent de sable.

| ES à vue | Es piston | Nature et qualité du sable |
|--------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ES < 65 | ES < 60 | Sable argileux risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité |
| 5 ≤ ES ≤ 75 | 60 < ES < 70 | Sable légèrement argileux de propriété admissible pour bétons de qualité courant quand on ne craint pas particulièrement le retrait |
| 75 ≤ ES ≤ 85 | 70 < ES < 80 | Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité |
| ES > 85 | ES > 80 | Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau |

Suite aux résultats obtenus nous avons conclu que le sable de dune est un sable très propre.

II.4.4 Essai de la masse volumique apparente (NF-P 18 555) :

1- Définition :

La masse volumique apparente d'un sol ρ_{app} est le quotient de la masse (m) du sol par le volume (V) qu'il occupe, Le volume est calculé à partir des données géométrique.

D'un moule cylindrique . $V = 1\text{cm}^3$

2- But de l'essai :

L'essai s'applique a la détermination de la masse volumique d'un échantillon prélevé sur site dans le sol en place ou préparé en laboratoire, la masse volumique d'un sol est donnée par la relation suivant :

$$\rho_{ap} = \frac{m_s}{v}$$

Avec :

- M_s : la masse des grains solides.
- V : le volume de moule.
- ρ_{ap} : la masse volumique apparente.



Photo II.12. Mode opératoire de l'essai de la masse volumique apparente.

Les valeurs obtenues sont regroupés dans le tableau II.16 ci-après.

Tableau II.15. Masse volumique apparente de sable étudié.

| Masse Volumique | sable de dune |
|-------------------------------------------------------|---------------|
| Masse Volumique Apparente en (g/cm^3) | 1,45 |

II.4.5 La masse volumique absolue (NF-P18-554) :

1- Définition :

C'est la masse de l'unité de volume absolu d'un corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue ce corps, sans tenir compte du volume des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

2- Mode opératoire :

Méthode de l'éprouvette graduée cette méthode est très simple et très rapide et elle utilise du matériel très courant de laboratoire (voire la Photo II.) :

1. Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
2. Peser un échantillon sec M de granulat et l'introduire l'éprouvette en prenant soit d'éliminer toutes les bulles d'air.
3. Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 . La masse volumique est

alors : $\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1}$



Photo II.13. Méthode de l'éprouvette graduée (la masse volumique absolue).

Tableau II.16. La masse volumique absolue du sable de dune.

| Masse Volumique | Sable de dune |
|-------------------------------------------------|---------------|
| Masse Volumique Absolue en (g/cm ³) | 2,57 |

Tableau II.17. Paramètres d'identification d'argile et sable de dune de Timimoun.

| Paramètre | Indice | Unité | Les valeurs | |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------|---------------|
| | | | Argile | Sable de dune |
| Densité des grains solides | γ_s | g/cm ³ | | |
| | | | 2,64 | 2,57 |
| Limite de liquidité | W_L | % | 48 | - |
| Limite de plasticité | W_P | % | 23,35 | - |
| Indice de plasticité | I_P | - | 24,65 | - |
| Éléments < à 2 μ | < 2 μ | - | 31 | - |
| Activité | AC | % | 0,79 | - |
| Valeur de bleu | VB | - | 7,5 | - |
| Surface spécifique | SST | m ² /g | 156,97 | - |
| Equivalent de sable | Esp | % | - | 94 |
| Masse volumique absolue | MV_{abs} | g/cm ³ | - | 2,57 |
| Masse volumique apparente | MV_{app} | g/cm ³ | - | 1,45 |
| Coefficient de courbure | Cc | - | - | 0,63 |
| Coefficient d'uniformité | Cu | - | - | 2,17 |
| Module de finesse | MF | - | - | 1,2 |
| Teneur en carbonate de calcium | CaCO₃ | % | 2.7 | - |

II.5 Conclusion :

D'après l'identification et caractérisations de l'argile et le sable de dune de la région de Timimoun, nous avons tirés ce qui suit :

- Plus de 31% des éléments inférieurs à $2\mu\text{m}$, (Les particules argileux).
- La plasticité de l'argile de Timimoun est très élevée.
- L'argile est constituée par d'éléments kaolinite et illite.
- La valeur de bleu de méthylène mesurée montre que de notre sol est de nature argileux.
- Les essais effectués sur le sable de dune montre que ce sable est sable propre mal gradués.

Chapitre III

Modélisation et simulation numérique

III.1 Introduction :

Plaxis est un programme d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Dans ce chapitre on va déterminer un modèle numérique dit «de référence» en utilisant le logiciel Plaxis version 8.2 pour l'évaluation de la déformation dans le cas de chargement axial type compression simple (la charge uniformément répartie).

Le logiciel Plaxis permet de modéliser de manière détaillée le type de problème, en spécifiant les propriétés des matériaux et les conditions aux limites. Les principaux résultats d'un calcul d'éléments finis sont les déplacements aux nœuds et les contraintes aux points des contraintes. Plaxis offre une vaste gamme d'outils pour afficher les résultats.

III.2 Représentation du modèle de référence

Pour que le logiciel PLAXIS puisse faire les calculs correctement on doit lui saisir les données suivantes :

III.2.1 Définition géométrique du modèle :

Le modèle est géométriquement représenté par des lignes et des points, il est défini par 05 points. On prendra un modèle de 3 m de hauteur, 6 m de largeur avec une charge uniformément répartie de 2 m de largeur.

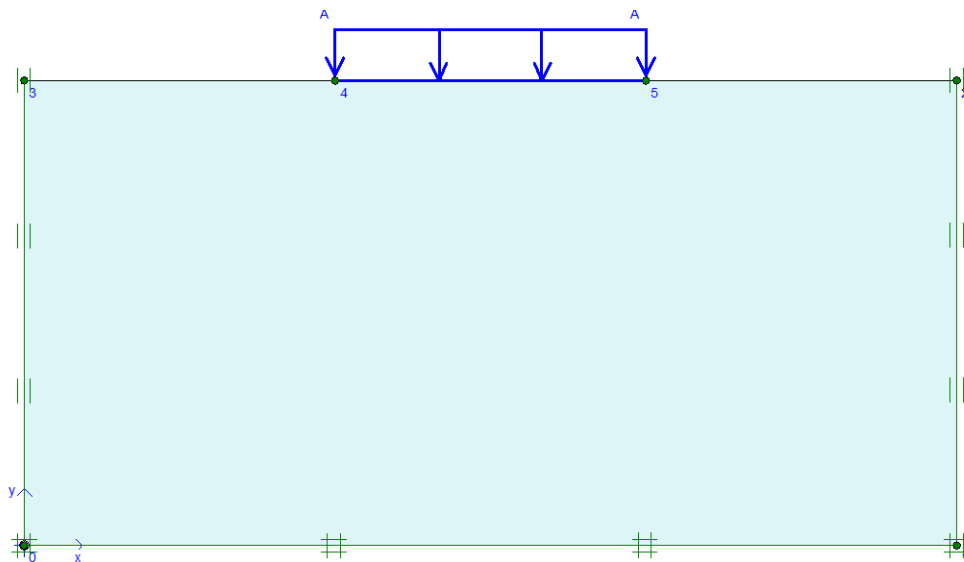


Figure III.1. Définition de la géométrie du problème étudié.

Les coordonnées des points sont représentées dans le tableau III.1 suivant :

Tableau III.1. Coordonnées des points

| Point N° | X(m) | Y(m) |
|----------|------|------|
| 0 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | 6,00 | 0,00 |
| 2 | 6,00 | 3,00 |
| 3 | 0,00 | 3,00 |
| 4 | 2,00 | 3,00 |
| 5 | 4,00 | 3,00 |

III.2.2 Modèle de comportement utilisé :

Modèle de Mohr-Coulomb :

On a utilisé dans ce mémoire la loi de Mohr-Coulomb, ce modèle permet de décrire le comportement du sol élastique parfaitement plastique. Il demande la détermination de cinq paramètres : le module de Young E , le coefficient de poisson ν , la cohésion c , l'angle de frottement φ , l'angle de dilatance ψ .

III.2.3 Génération du maillage :

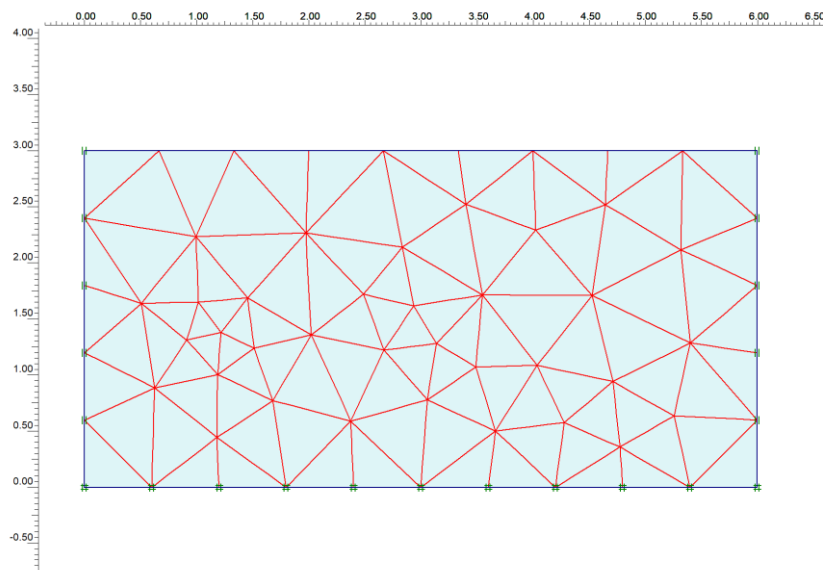


Figure III.2. Maillage du modèle.

III.3 Les conditions aux limites

Le choix des conditions aux limites est effectué par défaut, libre en verticale sur l'axe et sur le pourtour bloqué au fond : voir figure (III.1).

III.3.1 Chargement :

Ce chargement représente la charge uniformément répartie, on définit le chargement par load A.

III.3.2 Conditions initiales :

Une fois le modèle géométrique créé et le maillage d'élément finis généré, l'état de contrainte initiale et la configuration initiale doivent être spécifiés. Cela se fait dans la partie traitant des conditions initiales de programme d'entrées. Les conditions initiales sont constituées de deux modes différents, l'un pour générer les pressions interstitielles initiales (mode de conditions hydrauliques) et l'autre pour spécifier la configuration géométrique initiale et générer le champ de contraintes effectives initiales (mode de configuration géométrique). Dans le second mode PLAXIS propose par défaut un K_0 selon la formule de jaky :

($K_0=1-\sin\phi$) que l'opérateur peut modifier.

III.3.3 Procédures de calcul :

Le calcul du modèle de référence se fait en une phase dans l'ordre. Cette analyse est réalisée à l'aide d'un calcul plastique, en commençant par l'application de la totalité de la gravité en condition drainée.

Des phases plastiques se succèdent traitées comme des constructions par étapes, cette option qui offre la possibilité d'accéder au chargement appliqué qui est un chargement en contraintes, en lui donnant des valeurs dans un ordre croissant. Il est nécessaire de choisir dans la phase des calculs des points : soit des points des déplacements, soit des points des contraintes où l'on veut enregistrer au cours de calculs les contraintes, les déformations ou des déplacements. Ces points sont importants à définir car on ne peut pas tracer les courbes que pour ces points. On propose de se servir de deux points C, D comme il est représenté sur la figure III.3.

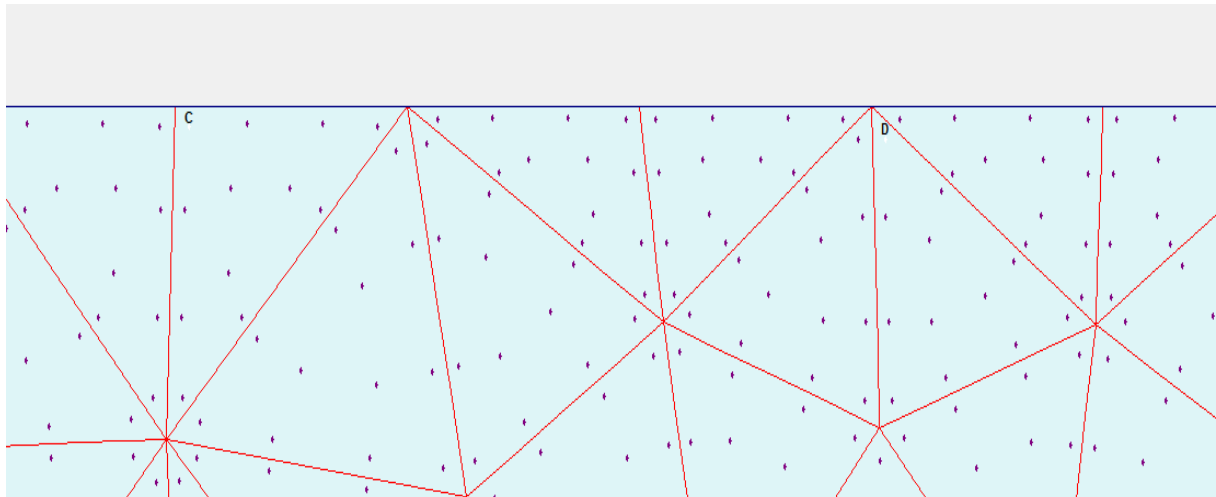


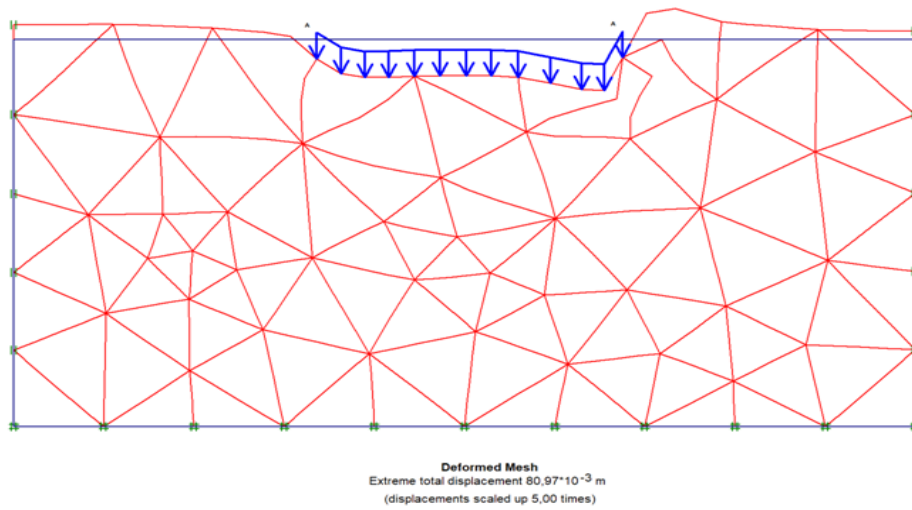
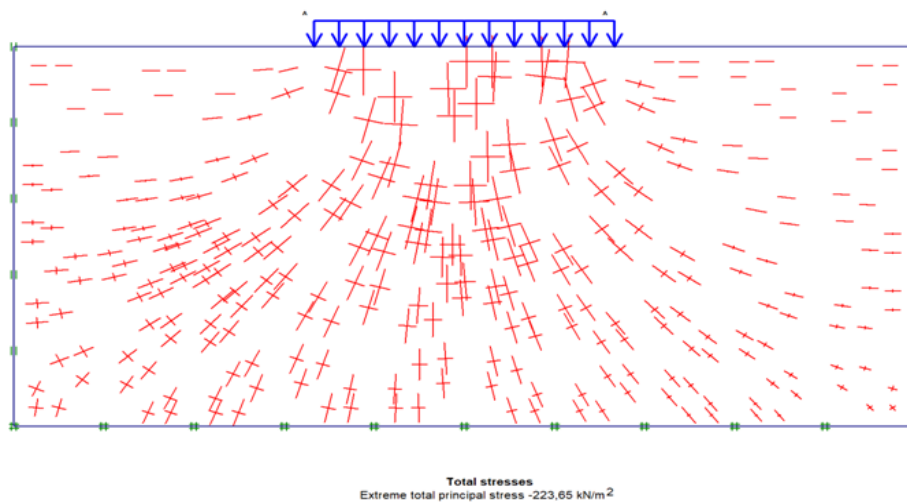
Figure III.3.Points C, D dont on suit les contraintes.

III.4 Caractéristiques des sols

Les caractéristiques physico- mécaniques des deux matériaux étudiés sont regroupées dans le Tableau III.2.

Tableau III.2.Caractéristiques physico-mécaniques des deux matériaux étudiés.

| Paramètre | Unité | Argile | Sable |
|--------------------------|-------------------|--------------|--------------|
| Modèle de matériau | | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb |
| Type de comportement | - | Drainé | Sable |
| Poids volumique sec | KN/m ³ | 16 | 17 |
| Poids volumique saturé | KN/m ³ | 18 | 20 |
| Perméabilité horizontale | K _x | - | 1m/day |
| Perméabilité verticale | K _y | - | 1m/day |
| Module de Young | KN/m ² | 10000 | 13000 |
| Cohésion | KN/m ² | 30 | 1 |
| Coefficient de poisson | - | 0,35 | 0,30 |
| Angle de frottement | [°] | 5 | 31 |

III.5 Principaux résultats du cas d'argile drainé :**Figure III.4.**Maillage déformé.**Figure III. 5.**Représentation des directions principales des contraintes dans la phase ultime.

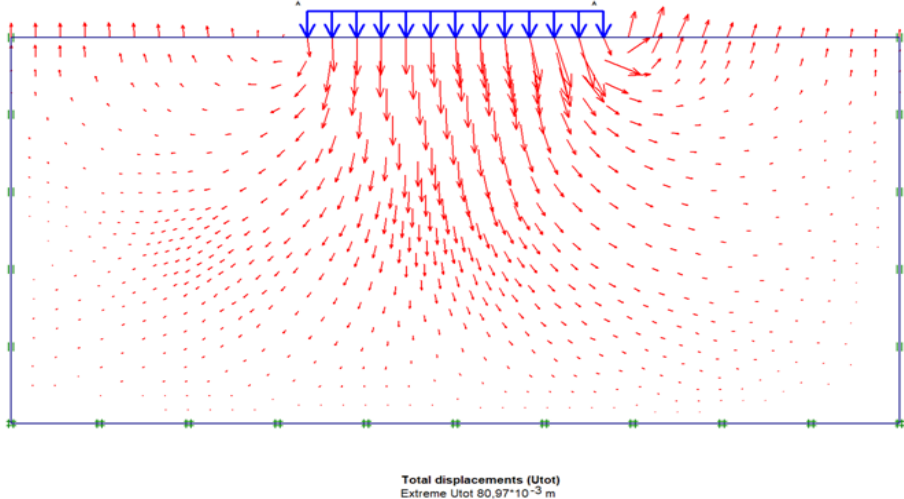


Figure III.6.Représentation des vecteurs déplacements dans la phase ultime.

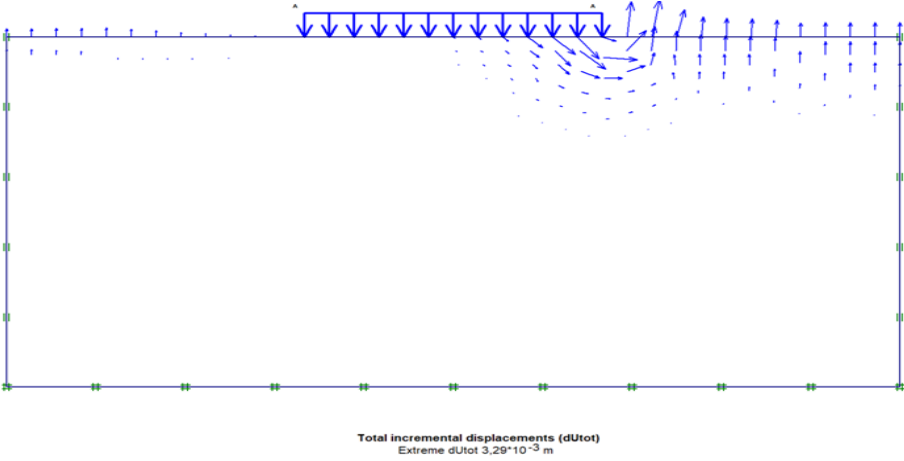


Figure III.7.Déplacement totaux dans la phase ultime.

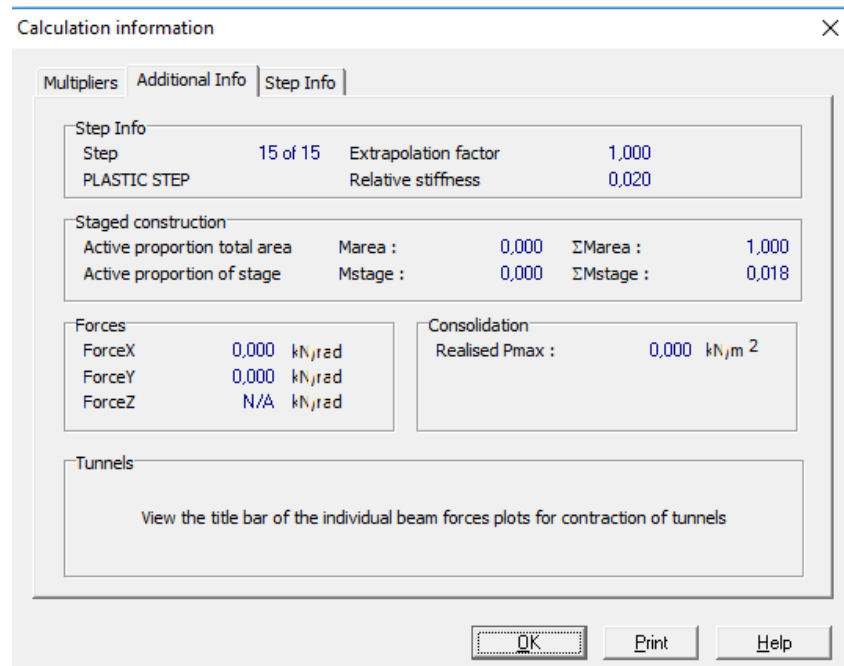


Figure III. 8.Bilan du calcul (l'argile).

Le calcul ne peut pas aller jusqu'à son terme : Load A = 2000kpa

L'effort appliqué à la rupture est obtenu en examinant la valeur finale du facteur Mstage. (Output, View, Calculation info).

La capacité portante apparaît être de $2000 \times 0,018 = 36$ kpa. (Voir figure III.8).

Les vecteurs des déplacements incrémentaux (c'est-à-dire les déplacements entre les deux derniers pas de calcul) fournissent la forme de la cinématique de rupture (coin rigide sous la charge), (voir la figure III.11)

On peut tracer la courbe contraintes - déformations des points C et D dans la phase ultime qui montre l'évolution des contraintes et des déformations : on observe le premier pas de calcul plastique (Voir figure III.9 et III.10).

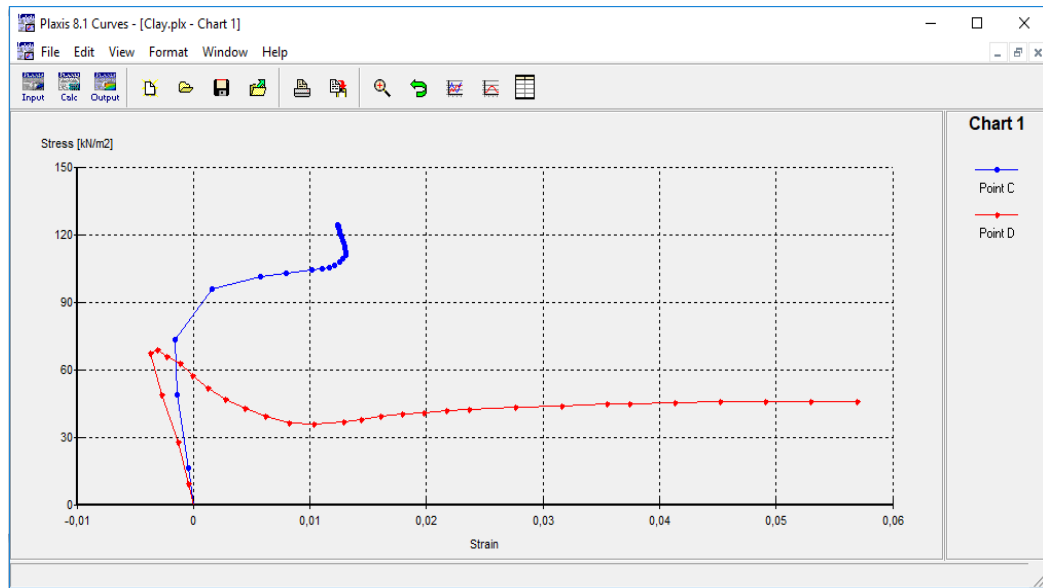


Figure III.9. Courbe contraintes-déformations des points C et D dans la phase ultime par rapport x.

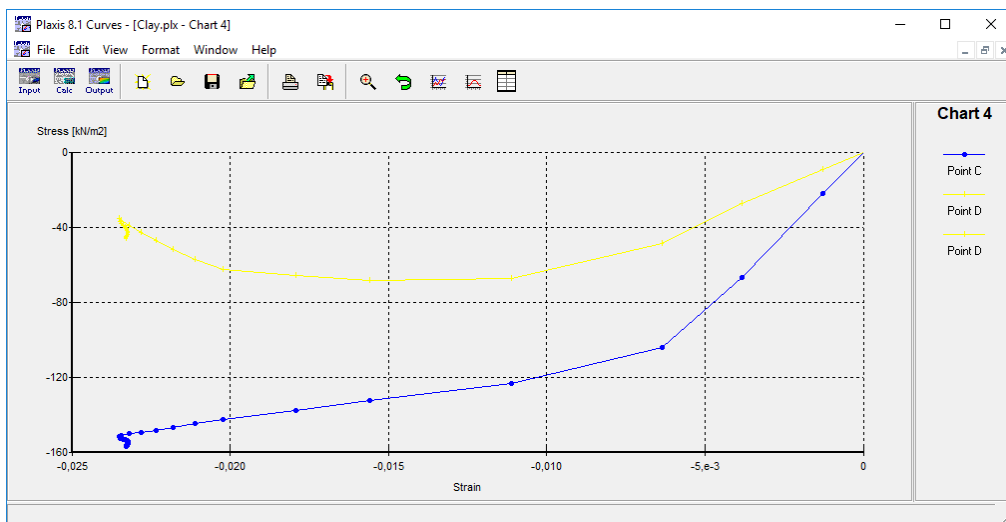


Figure III. 10. Courbe contraintes - déformations des points C et D dans la phase ultime par rapport y

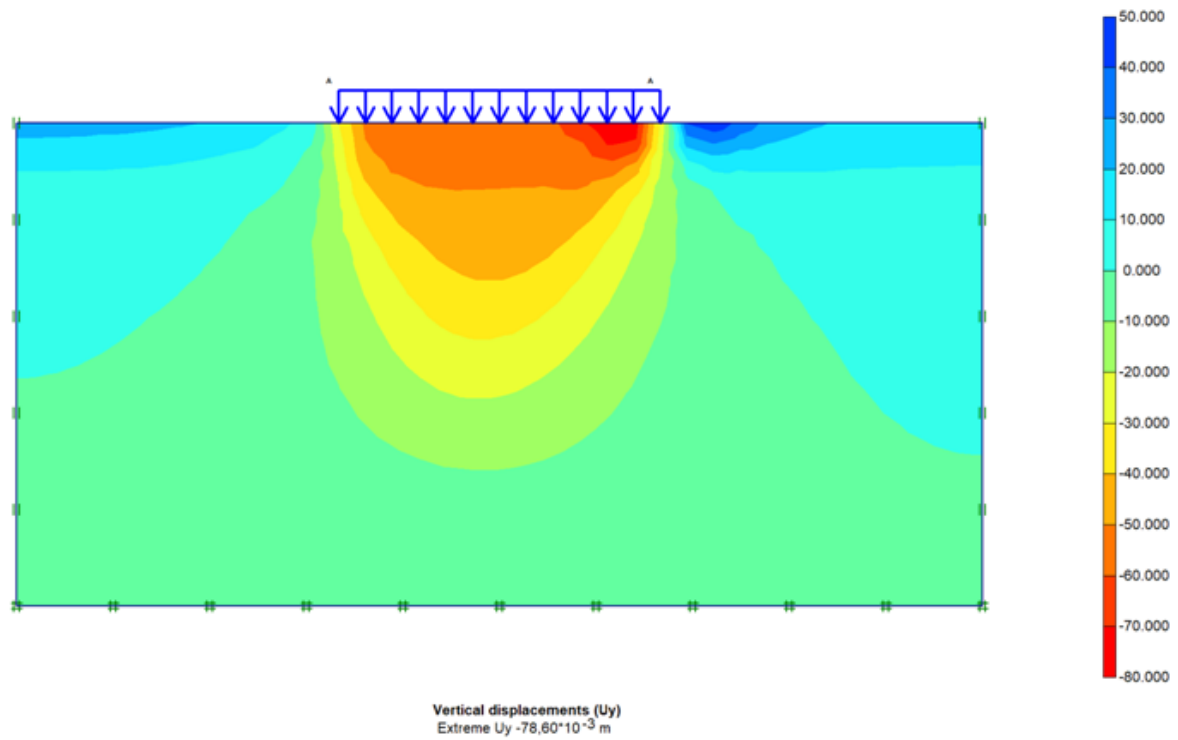


Figure III.11. Représentation des vecteurs déplacements totaux.

III.6 Principaux résultats du cas de sable de dune.

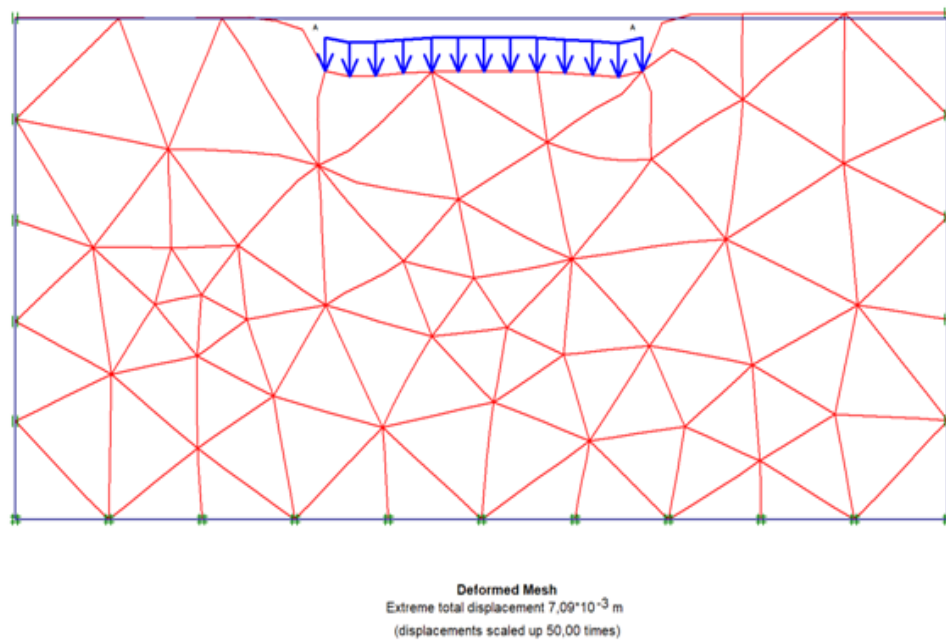


Figure III.12. Maillage déformé.

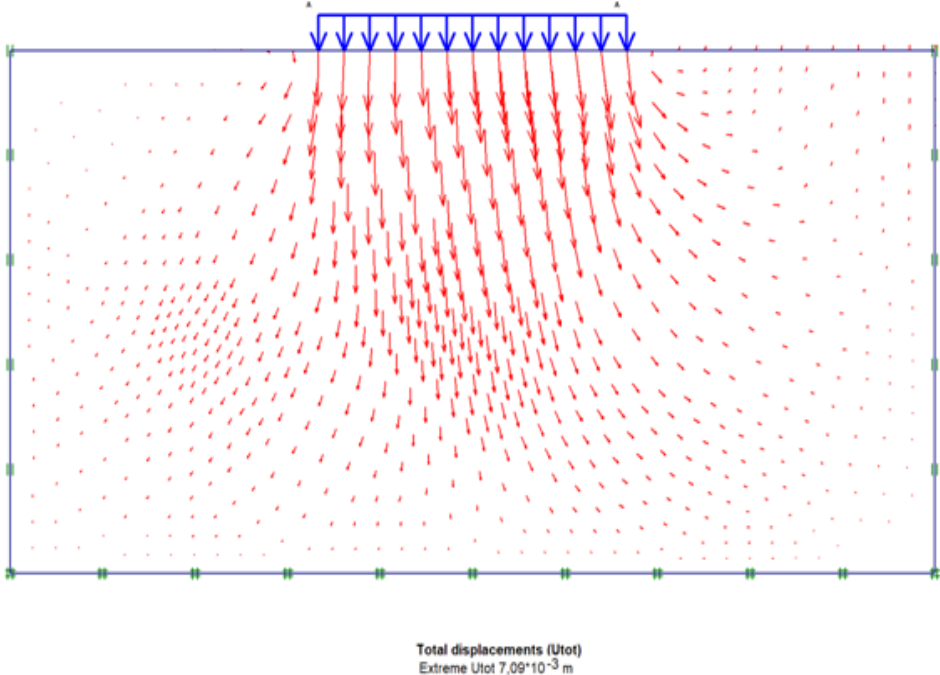


Figure III.13.Représentation des vecteurs déplacements dans la phase ultime.

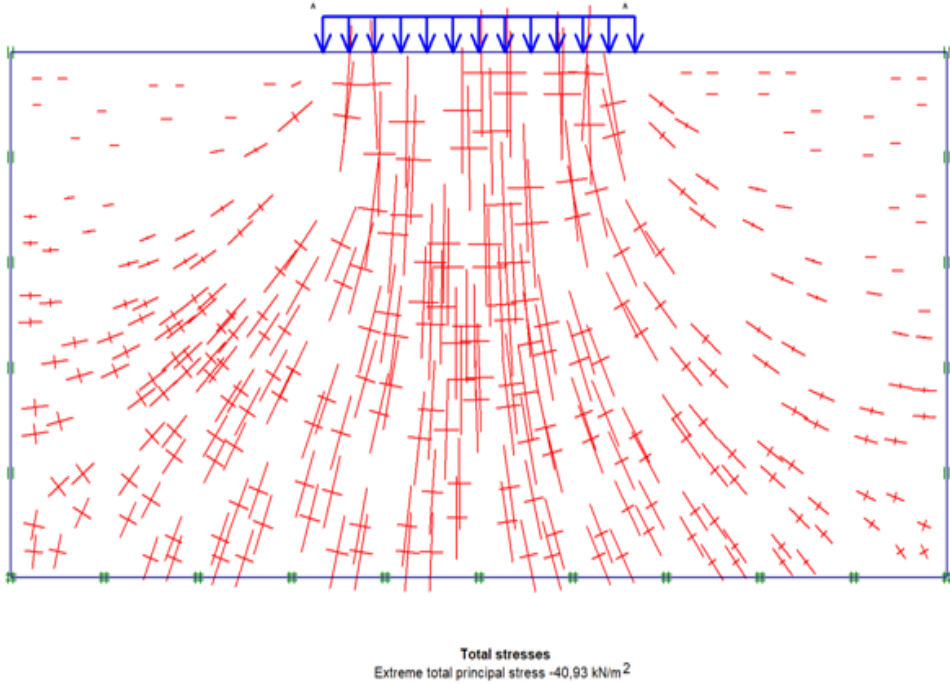


Figure III.14.Représentation des directions principales des contraintes dans la phase ultime

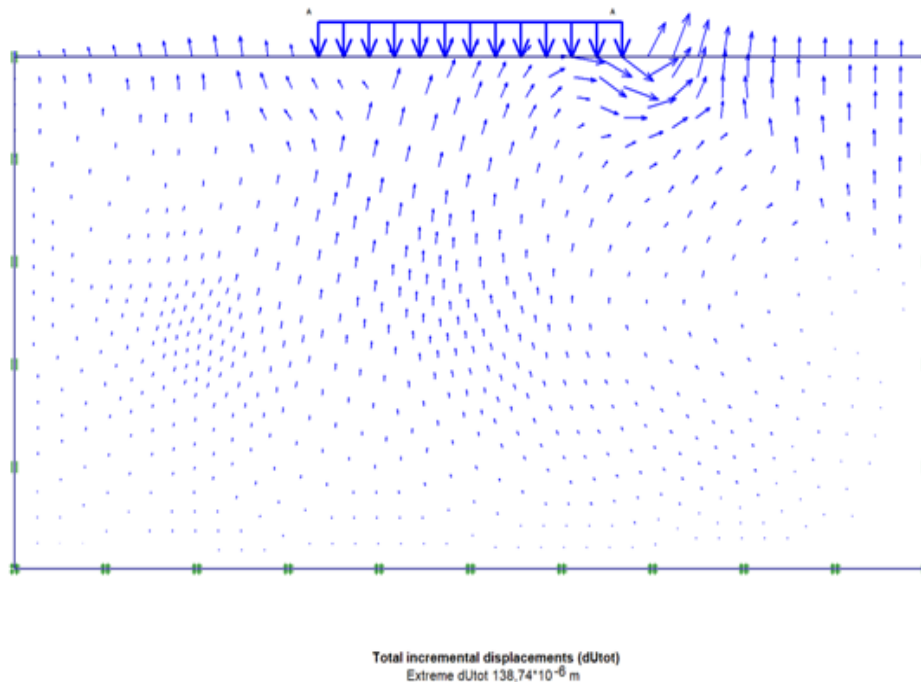


Figure III.15.Déplacement totaux dans la phase ultime.

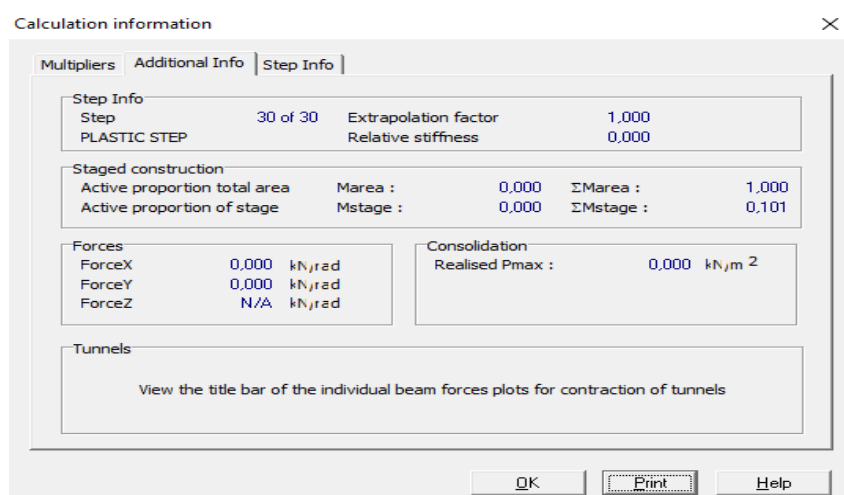


Figure III.16.Bilan du calcul (le sable).

Le calcul ne peut pas aller jusqu'à son terme : Load A = 2000kpa.

L'effort appliqué à la rupture est obtenu en examinant la valeur finale du facteur Mstage. (Output, View, Calculation info).

La capacité portante apparaît être de $2000 \cdot 0,101 = 202$ kpa. (Voir figure III.16).

Les vecteurs des déplacements incrémentaux (c'est-à-dire les déplacements entre les deux derniers pas de calcul) fournissent la forme de la cinématique de rupture (coin rigide sous la charge), (voir la figure III.19).

On peut tracer la courbe contraintes - déformations des points C et D dans la phase ultime qui montre l'évolution des contraintes et des déformations : on observe le premier pas de calcul plastique (Voir figure III.17 et III.18).

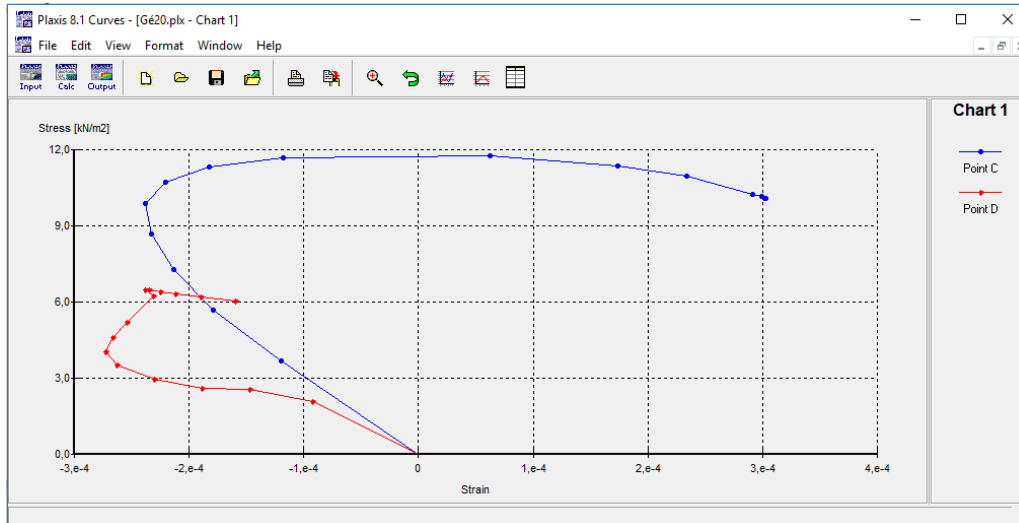


Figure III.17. Courbe contraintes-déformations des points C et D dans la phase ultime par rapport x.

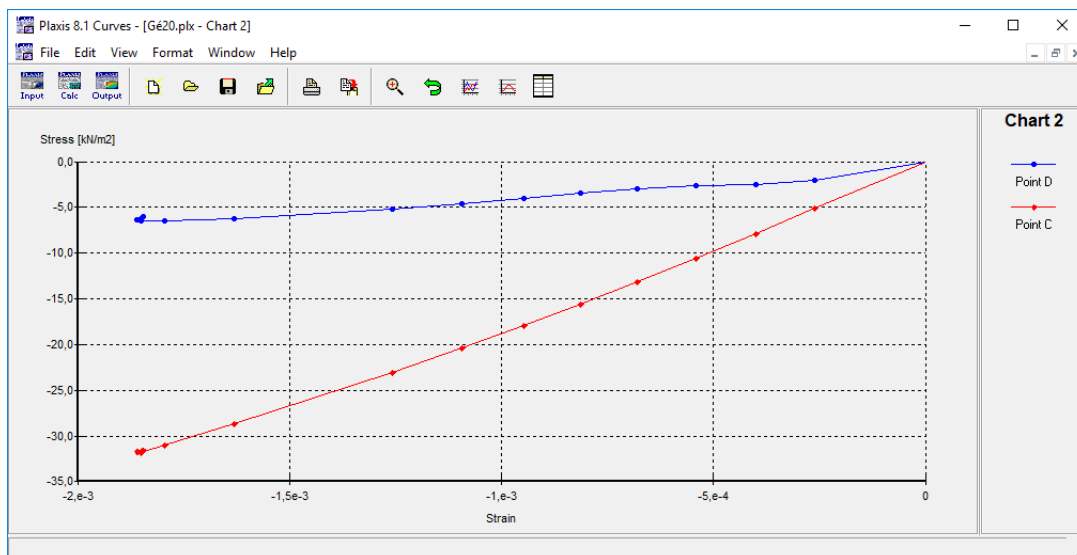


Figure III.18. Courbe contraintes - déformations des points C et D dans la phase ultime par rapport y.

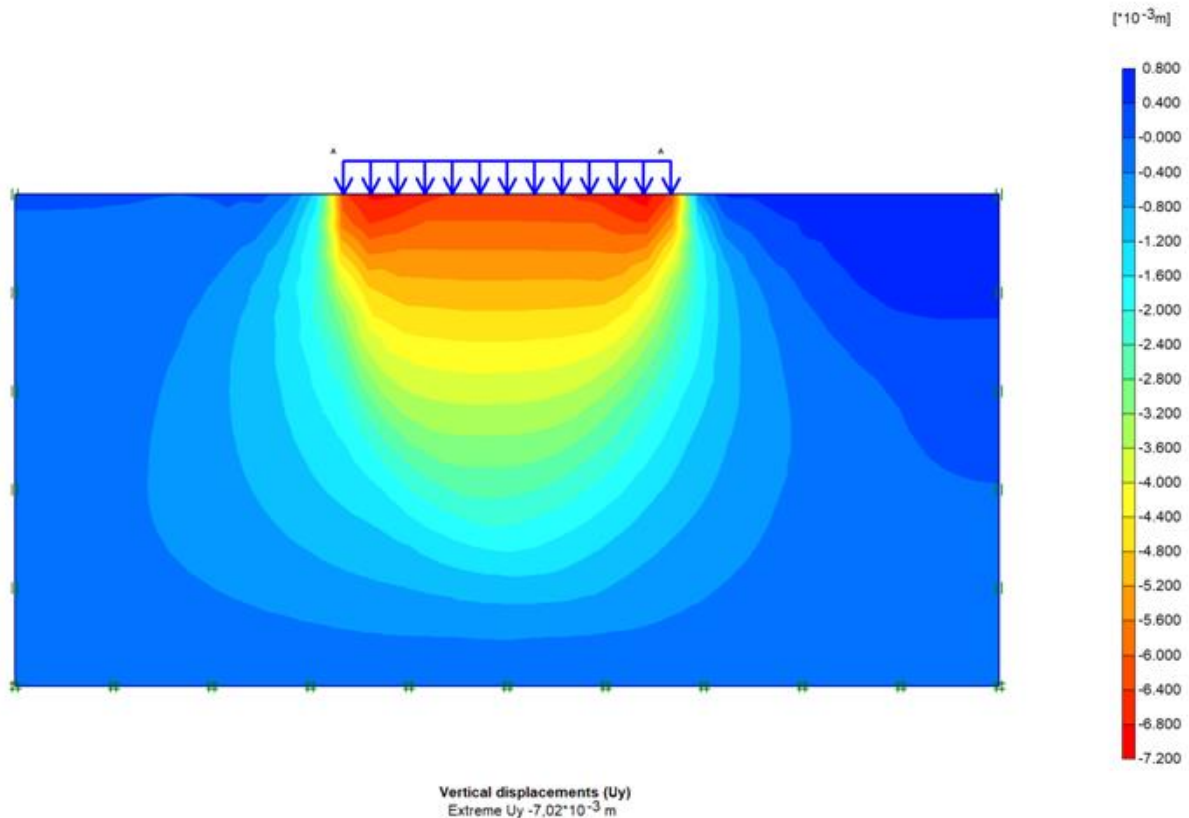


Figure III.19. Représentation des vecteurs déplacements totaux (Sable de dune).

III.7 Résultats de la capacité portante

Il en résulte de ce qui précède que pour les types de sols étudiés (pulvérulent, Cohérent) les valeurs de la capacité portante obtenues par le calcul numérique par le code de calcul Plaxis sont regroupé dans le Tableau III. 3.

Tableau III.3. Capacité portante [kpa] d'après Plaxis.

| Type de sol | c [kpa] / ϕ [°] | Capacité Portante |
|-------------|----------------------|-------------------|
| Sable | 1/31 | 202 |
| Argile | 30/5 | 36 |

III.8 Conclusion

A partir des résultats de la capacité portante obtenus, on peut constater :

- Les plus grandes valeurs de la capacité portante sont toujours obtenues par le sable (2) ($\phi=31^\circ$, $c=1$).
- L'Argile drainée donne la plus petite valeur pour la capacité portante.
- La diminution des paramètres mécaniques ϕ et c diminue la capacité portante.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce mémoire traite la modélisation d'un sol homogène (Argile, Sable de dune) sous un chargement uniformément répartie type compression simple. Cette étude a permis d'identifier les caractéristiques physico-mécanique et chimique de l'argile et le sable de dune de Timimoun.

Suite à cette étude on peut donner quelques constatations :

- l'utilisation des codes de calcul (notre cas PLAXIS) basés sur la méthode des éléments finis a facilité largement la tâche et permet de traiter plusieurs cas avec chargement et conditions aux limites variées.
- La modélisation de la capacité portante d'un sol à l'aide de la méthode des éléments finis, toute en considérant l'ensemble comme le comportement d'un milieu continu avec une géométrie, conditions aux limites et propriétés des matériaux, permet de performer une analyse globale du problème et de déterminer en même temps les déplacements et les contraintes à travers le milieu.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1].**T. Berrehail**, Mémoire de magister, « La terre un matériau de construction, une alternative pour une solution durable », université Constantine (2009), p 71et 73.
- [2].**H. Lamouri-Hannani**, Mémoire de master, « Etude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre anciennes et contemporaines a Timimoun», université d’Adrar (2014), p19et 20.
- [3].**B. Taallah**, thèse de doctorat, « Etude du comportement physico-mécanique du bloc terre comprimée avec fibres » université Mohamed kheider Biskra (2014), p 11.
- [4]. **S. Bendou**, Mémoire de magister, « Utilisation des argiles traitées pour la décoloration des bains de teinture », université M’Ahmed Bougara – Boumerdes (2009), p 1.
- [5].**M. Berkli**, « Les argiles : des nanomatériaux à la croisée des disciplines composition et intérêts scientifiques et industriels », université Moulay Ismail – Aroc, p3.
- [6]. **M. Mme Le Ray Anne**, thèse de Docteur, « l’argile, son utilisation a l’officine », hernet François (2016), p 11.
- [7].**M.A.Zenasni**, thèse de Docteur, « Synthèse et caractérisation des nanocomposites biodégradables élaborés par trois procédés (intercalation en solution, polymérisation in situ et par voie fondue) », université de lorraine (2015), p 9 et 10.
- [8].**M. Harrat**, Mémoire de magister, « Contribution à l’amélioration du procédé de fabrication de la céramique Etude sur site : unité Maghreb céramique de Touggourt », université Kasdi Merbah Ouargla (2007), p 5 et 6.
- [9].**Y. Bentahar**, thèse de Docteur, « Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines : application à l’adsorption de l’arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse » université de Nice-Sophia Antipolis(2016), p33.
- [10].**Z. Mellouki** et F. Souddi, Mémoire de master, « Amélioration et stabilisation des propriétés physico-chimiques et mécaniques des argiles de la région d’Adrar dans des applications dans les centres de stockage des déchets (CSD) », université Ahmed draia Adrar (2017), p 15.
- [11].**L. Mekki**, thèse de doctorat, « Comportement d’une argile expansive frottement sur consolidée », université Mohamed Boudiaf M’sial (2018), P 6, 7 et 8.
- [12].**M. el-Akhdar Krikrou**, Mémoire de master, « Caractérisation et amélioration des propriétés mécaniques de l’argile de DIDOUCHE (Constantine) par ajout de Liants (La chaux) », université l’arbi ben Mhidi (2018), P 10 et 11.
- [13]. **I. Belamri** et **S. Hioul**, Mémoire de master, « Synthèse de molécule pharmaceutique par catalyse hétérogène en présence de la montmorillonite traitée », université Mohammed Seddiki ben yahia- Jijel(2019), p 9.

Références bibliographiques

- [14].**M. Bekhiti**, thèse de Docteur, « Contribution théorique et expérimentale à l'étude de stabilisation des argiles gonflantes par ajout de granulats de caoutchouc des pneus usagés», Université Djilali liables SBA(2019), p 18.
- [15].**C. dad**, Mémoire de master, « Etude comparative de l'utilisation du sable de dune en substitution du sable de rivière : cas des mortiers normalisés », université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou(2018), p32et 43.
- [16].**W. Abdelghani Ayadi et A.Guenoune**, Mémoire de master, « Valorisation des sables locaux dans la formulation de béton ordinaire », université M'Hamed Bougara – Boumerdes (2016), p 42.
- [17]. **H. Belkhiri et A.Derragui**, Mémoire de master, « Contribution à l'étude des comportements mécaniques de mortier à base de sable de dune et fines siliceuses», université Ziane Achour de Djelfa (2016), p 4 et 5
- [18].**H. Azzouz**, Mémoire de master, « Etude des bétons à base des sables de dune », université Mohamed kheider Biskra (2009), p7.
- [19]. [http:// www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com).
- [20]. **A. Temagoult**, Mémoire de magister, « Investigation des paramètres numériques en analyse par éléments finis iso paramétriques des structures planes membranaires et des plaques », université de Constantine, P 3.
- [21].**K. Mammeri**, Mémoire de master, « Etude statique d'un barrage en remblais par la méthode des éléments finis en utilisant une loi elastoplastique », université Saïda – Dr Tahar Moulay (2019), p 23 et 24.
- [22].**M. el Bachir et N.Gheribi**, Mémoire de master, « Modélisation d'une structure en matériaux isotropes par la méthode des éléments finis », université Kasdi Merbah Ouargla (2019), p 5.
- [23]. **N. Nouais**, Mémoire de magister, « Étude et modélisation numérique de l'interaction sol pieu sous chargement latéral cyclique», université des frères Mentouri Constantine (2015), p 49,53 et 54.
- [24].**Y. Sayad**, Mémoire de magister, « La modélisation des plaques de formes géométriques irrégulières par la méthode des éléments finis », université Mohamed kheider Biskra (2012), p 26.
- [25]. **L. Bessais**, Mémoire de magister, « Analyse des structures par la M.E.F basée sur L'approche en déformation », université Mohamed khider – Biskra (2012), p 5.