

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Travaux Publics

Option : Voies et Ouvrage d'Art

Présenté par :

CHOUNI Mohammed

NEZAZRA Ammar

**Thème : Traitement des argiles gonflantes par des Déchets
Végétaux : Etude Expérimentale, Analyse Statistiques et
Optimisation**

Sous la direction de : **Dr. LAFIFI Brahim**

Juin 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

En guise de reconnaissance, nous tenons à témoigner nos sincères remerciements tout d'abord à Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné de la force et de la patience pour accomplir ce modeste travail, ensuite à toutes les personnes qui ont contribués de près ou de loin au bon déroulement de notre projet de fin d'études et à l'élaboration de ce modeste travail et spécialement à notre encadrant Dr. LAFIFI Brahim.

Nous tenons à remercier aussi l'ensemble du personnel de département de Génie Civil et de L'Hydraulique en particulier le personnel du laboratoire pédagogique (Samira ; Sihem et Salima), pour leurs conseils pleins de sens et le suivi et l'intérêt qu'ils ont portaient à nos travaux. Nos remerciements s'étendent également à tous les enseignants et toutes les enseignantes durant les années de nos études, en particulier tous les membres du Laboratoire TP EST Guelma et Laboratoire NHC Guelma, sans oublier les membres de Jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Dans l'impossibilité de citer tous les noms, nos sincères remerciements vont à tous ceux et celles, qui de près ou de loin, ont permis par leurs conseils et leurs compétences la réalisation de ce projet de fin d'études.

Enfin, nous n'oserons oublier de remercier tous nos camarades nos enseignants ainsi que nos familles pour leurs soutiens durant toute cette merveille aventure.

Dédicace

Je commence par rendre grâce à « Allah » de nous aider à accomplir ce travail

"الحمد لله حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه ملئ السموات والأرض ملئ ما شاء ربي"

*Avec pleins de joie et un énorme plaisir que je dédie ce modeste travail comme preuve de gratitude tout d'abord à ma famille, mes yeux dans la vie mes chères mère et père, mon frangin et mes frangines, à toute ma famille oncles et tantes, je les remercie un par un du fond du cœur pour leurs sacrifices et soutiens envers moi .Ce modeste travail est dédié aussi à ma deuxième famille en génie civil mes amis(e), mes chères collègues et enseignants que j'ai passé avec eux de très bons moments à jamais oublier , sans oublier mon frère et mon bras droit mon binôme
CHOUINI. Mohammed.*

NEZAZRA AMMAR



Dédicace

Je dédie ce modeste travail particulièrement mes chers parents, qui ont consacré leur existence à bâtir la mienne, pour leur soutien, patience et soucis de tendresse et d'affection pour tout ce qu'ils ont fait pour que je puisse arriver à ce stade.

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore, qui m'a encouragé durant toutes mes études, et qui sans elle, ma réussite n'aura pas eu lieu ; a toi maman **Aida**.*

A mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde, à toi mon père

Aziz.

*A mes très chères sœurs **Razene** et **Ranime**.*

*A mon frère **Amar**.*

A tout ma famille.

A toute mes amis.

*À mon cher binôme **Ammar**.*

A tous et sans exception je dédie ce modeste travail

CHOUINI Mo'hammed

المخلص

منذ سنوات عديدة، يستخدم المهندسون الجيوتقنيون الإضافات مثل الجير والإسمنت وغبار أفران الإسمنت لتحسين خصائص التربة الطينية. ومع ذلك، زادت تكلفة إدخال هذه الإضافات أيضًا في السنوات الأخيرة. وقد فتح هذا الأمر بابًا واسعًا لتطوير واستخدام أنواع أخرى من الإضافات للتربة، مثل نفايات ألياف النباتات. يمكن استخدام هذه التقنية الجديدة لمعالجة التربة بفاعلية لتقليل كمية النفايات و إنتاج مواد مفيدة من النفايات غير المفيدة. لتحقيق هذا الهدف، سيتم استخدام هذه التقنية الجديدة في البداية، من خلال سلسلة من التجارب المخبرية لدراسة الأداء الميكانيكي للتربة المعززة.

ثم، سنجري تحليل إحصائي للنتائج استنادًا إلى تحليل التباين (*ANOVA*) ومنهجية سطح الاستجابة (*RSM*)، وذلك بهدف اقتراح نماذج رياضية تربط بين معاملات الإضافات المعالجة والخصائص المدروسة، لإمكانية التحسينات المحتملة. وفي النهاية، سيتم ربط النماذج الرياضية المطورة مع تقنية الأمثلية (وظيفة الرغبة) لأجل تحسين معاملات النفايات النباتية المستخدمة.

الكلمات الرئيسية: التربة الطينية - ألياف نباتية - تثبيت - *RSM* - *ANOVA* - تحسين.

RÉSUMÉ

Depuis de nombreuses années, les ingénieurs géotechniciens utilisent des additifs tels que la chaux, ciment et poussière de four à ciment pour améliorer les qualités des sols argileux. Cependant, le coût de l'introduction de ces additifs a également augmenté ces dernières années. Cela a ouvert la porte largement pour le développement et l'introduction d'autres types d'additifs pour le sol tels que les déchets de fibres végétales. Cette nouvelle technique de traitement des sols peut être utilisée efficacement pour réduire les quantités de déchets, produire des matériaux utiles à partir de déchets non utiles. Pour atteindre cet objectif, cette nouvelle technique sera utilisée, à travers une série d'essais effectués au laboratoire en premier pour étudier les performances mécaniques du sol renforcé.

Ensuite, une analyse statistique des résultats basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de surface de réponse (RSM) sera menée et cela dans le but de proposer des modèles mathématiques reliant les paramètres de l'additif de traitement et les caractéristiques étudiées, pour d'éventuelles optimisations. Enfin, les modèles mathématiques développés seront couplé avec une technique d'optimisation (fonction de désirabilité) pour l'optimisation des paramètres du déchet végétal utilisé.

Mots clés : Sol argileux - Fibres végétaux - stabilisation - ANOVA - RSM - Optimisation

ABSTRACT

For many years, geotechnical engineers have been using additives such as lime, cement, and cement kiln dust to improve the qualities of clay soils. However, the cost of introducing these additives has also increased in recent years. This has opened the door widely for the development and introduction of other types of soil additives such as vegetable fiber waste. This new soil treatment technique can be effectively used to reduce waste quantities, produce useful materials from non-useful waste. To achieve this goal, this new technique will be used through a series of laboratory tests first to study the mechanical performance of the reinforced soil.

Then, a statistical analysis of the results based on analysis of variance (ANOVA) and response surface methodology (RSM) will be conducted in order to propose mathematical models relating the treatment additive parameters and the characteristics studied, for possible optimizations. Finally, the developed mathematical models will be coupled with an optimization technique (desirability function) for the optimization of the parameters of the vegetable waste used.

Keywords: Clay soil - Vegetable fiber - Stabilization - ANOVA - RSM - Optimizat

TABLE DES MATIERES

ملخص	I
RESUME	II
ABSTRACT	III
TABLE DE MATIERES	IV
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VI
NOTATION ET ABBREVIATION.....	VII
INTRODUCTION GENERALE	VIII

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SOLS FINS

I.1. Introduction.....	01
I.2. Diverses phases du sol	01
I.2.1 Phase solide	02
I.2.2 Phase liquide	03
I.2.3 Phase gazeuse.....	03
I.3. Différents types des sols fins	03
I.3.1 Les argiles	04
I.3.2 Les limons	05
I.3.3 Les marnes	05
I.3.4 Les vases	06
I.3.5 Les tourbes	07
I.4. Systèmes de classifications des sols	08
I.5. Problèmes liés aux sols fins	09
I.6. Conclusion	10

CHAPITRE II : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE TRAITEMENT DES SOLS ARGILEUX PAR LES FIBRES

II.1. Introduction	11
II.2. Les argiles	12
II.2.1 Définition	12
II.2.2 Classification des argiles	12
II.2.3 Principaux types d'argiles.....	13
II.3.2.1 Kaolinites	14
II.3.2.2 Montmorillonite	14
II.3.2.3 L'illite.....	14
II.2.4 Principaux problèmes	14
II.2.4.1 Problèmes de retrait-gonflement	15

II.2.4.2 Problèmes de glissement.....	16
II.2.4.3 Problèmes de tassement	16
II.3. Les fibres	17
II.3.1 Classification des fibres	18
II.3.1.1 Les fibres naturelles	18
II.3.1.2 Les fibres synthétiques.....	19
II.3.1.3 Les fibres artificielles.....	20
II.3.2 Fibres végétales.....	21
II.3.2.1 Définition de la fibre végétale.....	21
II.3.2.2 Classification des fibres végétales	22
II.3.2.3 Composition chimique des fibres végétales.....	22
II.3.2.4 Propriétés physico-mécanique des fibres végétales	23
II.3.3 Fibre de palmier	23
II.3.3.1 Présentation générale des palmiers	23
II.3.3.2 Présentation des palmiers de Californie (Washingtonia filifera)	23

CHAPITRE III : NOTIONS DE BASE SUR LES PLANS D'EXPERIENCES

III.1. Introduction	26
III.2. Notions de base.....	26
III.3. Plans d'expériences	27
III.3.1 Définition.....	27
III.3.2 But d'un plan d'expérience.....	27
III.3.3 Définir les sorties (Réponses)	28
III.3.4 Définir les entrées (facteurs)	28
III.4. Choix de la méthode d'expérimentation	29
III.5. Comment l'utiliser ?	29
III.6. Notion d'espace expérimental	30
III.7. Notion de surface de réponse	32
III.8. Différents types des plans d'expériences	34
III.8.1. Plan factoriel complet	34
III.8.2. Plans factoriels fractionnaires	34
III.8.3. Plans pour surfaces de réponses	35
III.8.4. Plans de Taguchi	36
III.9. Conclusion	38

CHAPITRE IV : CARACTERISATION EXPERIMENTALE DU SOL D'ETUDE

IV.1. Introduction.....	39
IV.2. Matériaux utilisés.....	39
IV.3. Programme des essais	40

IV.3.1 Teneur en eau w (NF P 94-050)	40
IV.3.2 Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie (NF P 94-057)	41
IV.3.3 Limites d'Atterberg (NF P 94-051)	44
IV 3.3.1 Limite de liquidité wl	44
IV 3.3.2 Limite de plasticité wp	45
IV.3.4 Essai au bleu de méthylène (NF EN 933-9).....	46
IV.3.5 Essai proctor : (NF P 94-093)	47
IV.3.6 Essai C.B.R (NF P 94 078)	50
IV.3.7 Compression simple non confinée	51
IV.3.8 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte (EN 12390-3)	52
IV.3.9 Essai œdométrique (P94-090-1).....	55
IV.4. Conclusion	57

CHAPITRE V : RESULTATS EXPERIMENTAUX DU SOL D'ETUDE

V.1. Introduction	58
V.2. Essai d'identification du sol.....	58
V.2.1 Teneur en eau naturel	58
V.2.2 Analyse granulométrique	58
V.2.3 Limites d'Atterberg	59
V.2.4 Essai au bleu de méthylène.....	60
V.2.5 Essai Proctor	61
V. Classification du sol selon le GTR	62
V.2.6 Essai C.B.R	63
V.2.7 Compression simple non confinée.....	64
V.2.8 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte	65
V.2.9 Essai œdométrique.....	67

CHAPITRE VI :RENFORCEMENT DU SOL PAR LES FIBRES NATURELLES

VI.1. Introduction	69
VI.2. Présentation de l'additif de renforcement	69
VI.3. Matériaux de traitement	70
VI.4. Essai Proctor	71
IV.4.1. Méthodologie expérimentale	71
a. Plan d'expériences adopté	71
b. Discussion des résultats des essais	72
VI.5. Essai CBR	75
VI.5.1. Méthodologie expérimentale	75
a. Plan d'expériences adopté	75
b. Discussion des résultats des essais	76
VI.5.2. Analyse statistique	80

a) Analyse de variance ANOVA	80
b) Prédiction mathématique	81
VI.6. Essai de compression simple non confinée	82
VI.6.1. Méthodologie expérimentale	82
VI.6.2. Analyse statistique	84
a) Analyse de variance ANOVA	84
b) Prédiction mathématique	84
VI.7. Optimisation par la méthode de fonction de désirabilité	86
a. Désirabilité d'une réponse à maximiser	86
b. Désirabilité d'une réponse à minimiser	87
c. Désirabilité d'une réponse à cibler	88
d. Optimisation de la formulation du bio-composite	89
V.8 Conclusion	91
 CONCLUSION GENERALE	 92

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES SOLS FINS

Figure I.1 : Diagramme des phases d'un sol	02
Figure I.2 : Représentation des tétraèdres et des octaèdres	04
Figure I.3 : Différentes couleurs d'argiles	05
Figure I.4 : Représentation de la composition granulométrique en 3 fonctions classification triangulaire des sols fins.	09

CHAPITRE II : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE TRAITEMENT DES SOLS ARGILEUX PAR LES FIBRES

Figure II.1 : Le phénomène de retrait-gonflement	15
Figure II.2 : Problème de tassement.....	17
Figure II.3 : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine	19
Figure II.4 : Photo du palmier de la Californie	25

CHAPITRE III : NOTIONS DE BASE SUR LES PLANS D'EXPERIENCES

Figure III.1 : Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1	30
Figure III.2 : Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental	31
Figure III.3 : Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux	31
Figure III.4 : Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.	32
Figure III.5 : Représentation graphique d'une surface de réponses.....	33

CHAPITRE IV : CARACTERISATION EXPERIMENTALE DU SOL D'ETUDE

Figure IV.1 : Localisation du lieu de prélèvement de l'échantillon.de Hdjer Mengoub (Guelma).....	40
Figure IV.2 : Analyse granulométrique.....	42
Figure IV.3 : pénétromètre a cône manuel	44
Figure IV.4 : méthode de Casagrande	45
Figure IV.5 : Limite de plasticité Wp par la méthode au rouleau	45
Figure IV.6 : appareil essai au bleu de méthylène	47
Figure IV.7 : Essai Proctor	48
Figure IV.8 : matériel essai CBR.....	50
Figure IV.9 : la machine d'essai CBR au niveau de laboratoire de l'université 8mai 45	51
Figure IV.10 : les éprouvettes de l'essai de compression.....	52
Figure IV.11 : appareil de compression.....	52
Figure IV.12 : Principe de l'essai de cisaillement direct.....	53
Figure IV.13:Schéma de la boîte de cisaillement.....	54
Figure IV.14: préparation de l'enchantele au niveau de laboratoire de NHC.....	55
Figure IV.15 : Enceinte cylindrique rigide (oedomètre)	56

CHAPITRE V : RESULTATS EXPERIMENTAUX DU SOL D'ETUDE

Figure V.1: courbe de l'analyse granulométrique et sédimentométrique	59
Figure V.2: classifications des sols basés sur la plasticité	60
Figure V.3: classification des sols selon la valeur de bleu de méthylène	60
Figure V.4: résultats de l'essai de bleu méthylène.....	60
Figure V.5: courbe de compactage.....	61

Figure V.6: tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature, suivant la norme nf p 11-300	62
Figure V.7: variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité	64
Figure V.8: préparation et rupture de l'éprouvette à la compression simple	65
Figure V.9: courbe des résultats de l'essai de cisaillement à la boîte	66
Figure V.10: courbe intrinsèque sol naturel	66
Figure V.11: courbe œdométrique sol naturel (sol non traite)	67

CHAPITRE VI : RENFORCEMENT DU SOL PAR LES FIBRES NATURELLES

Figure VI.1 : Feuilles de palmier utilisées pour l'extraction de fibres	69
Figure VI.2 : Découpage de feuilles de palmier en morceaux de longueur (5mm, 10mm et 15mm)	70
Figure VI.3 : Processus de traitement du produit de renforcement.....	70
Figure VI.4 : Hydroxyde de Sodium(NaOH).....	71
Figure VI.5 : Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol non traité et sol traité avec 0.5% d'aditifs	73
Figure VI.6 : Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol non traité et sol traité avec 1% d'aditifs.....	74
Figure VI.7: Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol non traité et sol traité avec 1.5% d'aditifs.....	75
Figure VI.8 : Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité et du sol traité avec 0.5% d'aditifs (% NAOH = 3%, 6% et 9%).....	78
Figure VI.9 : Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité et du sol traité avec 1.5% d'aditifs (% NAOH = 3%, 6% et 9%).....	78
Figure VI.10 : Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité et le sol traité avec 2.5% d'aditifs (% NAOH = 3%, 6% et 9%).....	79
Figure VI.11: Histogramme des Valeurs de l'indice CBR en fonction du pourcentage d'additifs et de NAOH.	79
Figure VI.12: Valeurs expérimentales et valeurs prédites de l'indice CBR.	82

Figure VI.13: Rupture des éprouvettes traitées sous la compression simple à 28 jours	83
Figure VI.14: Histogrammes de la résistance de compression des sols en fonction des pourcentages d'aditif et de NAOH.	83
Figure VI.15: Valeurs expérimentales et valeurs prédites de l'indice CBR.	85
Figure VI.16: Désirabilité individuelle d_i d'une réponse Y_i	87
Figure VI.17: Fonction de désirabilité d'une fonction à minimiser.....	88
Figure VI.18: Fonction de désirabilité d'une fonction à cibler.....	89
Figure VI.19: Représentation graphique de la procédure d'optimisation	91

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LES SOLS FINS

Tableau II.1 : Classification des phyllosilicates	13
---	----

CHAPITRE III : NOTIONS DE BASE SUR LES PLANS D'EXPERIENCES

Tableau III.1 : Plan factoriel complet 2^2 pour deux facteurs (A, B) à deux niveaux	34
--	----

CHAPITRE V : RESULTATS EXPERIMENTAUX DU SOL D'ETUDE

Tableau V.1 : Les limites d'Atterberg du sol	59
Tableau V.2 : Valeurs de Compactage du sol	61
Tableau V.3 : Résultats	62
Tableau V.4 : valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité.....	63

CHAPITRE VI : RENFORCEMENT DU SOL PAR LES FIBRES NATURELLES

Tableau VI.1 : Niveaux de variation des paramètres de l'étude.	71
Tableau VI.2 : Plan d'expériences de Taguchi L9.....	72
Tableau VI.3 : Résultats de l'essai Proctor selon le plan de Taguchi L9.	72
Tableau VI.4 : Niveaux de variation des paramètres de l'étude.	75
Tableau VI.5 : Plan factoriel complet L15.	76

Tableau VI.6 : Résultats de l'essai CBR selon le plan de L15.	77
Tableau VI.7 : Analyse de la variance pour l'indice CBR.	80
Tableau VI.8 : Analyse de la variance pour l'indice la résistance à la compression Rc.	84
Tableau VI.9 : Contraintes appliquées sur les paramètres à optimiser.	90
Tableau VI.10 : Résultats de l'optimisation	90

NOTATION ET ABREVIATION

W_L : Limite de liquidité.

W_p : Limite de plasticité.

I_p : Indice de plasticité.

I_c : Indice de consistance.

W_{nat} : Teneur en eau de sol naturelle.

VBS : Valeur au Bleu de Méthylène.

S_r : Degré de saturation.

C_g : Indice de gonflement.

C_c : Indice de compressibilité P_c : Pression de consolidation.

e :Indice de vide.

W_{opt} : La teneur en eau optimum. γ_{dmax} : Densité Sèche Maximale.

γ_s : Poids volumique spécifique.

γ_d Poids volumique sèche.

γ_h : Poids volumique humide.

σ : Contrainte normal.

c : La cohésion.

φ :L'angle de frottement interne. A : Activité des sols.

η : Viscosité dynamique.

LNHC : Laboratoire National d'Habitat et de Construction.

LTP EST : Laboratoire des travaux publics EST.

GTR : Guide de terrassement routière.

RSM : méthode des surfaces de repenses

ANOVA : anlysis of variance



INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

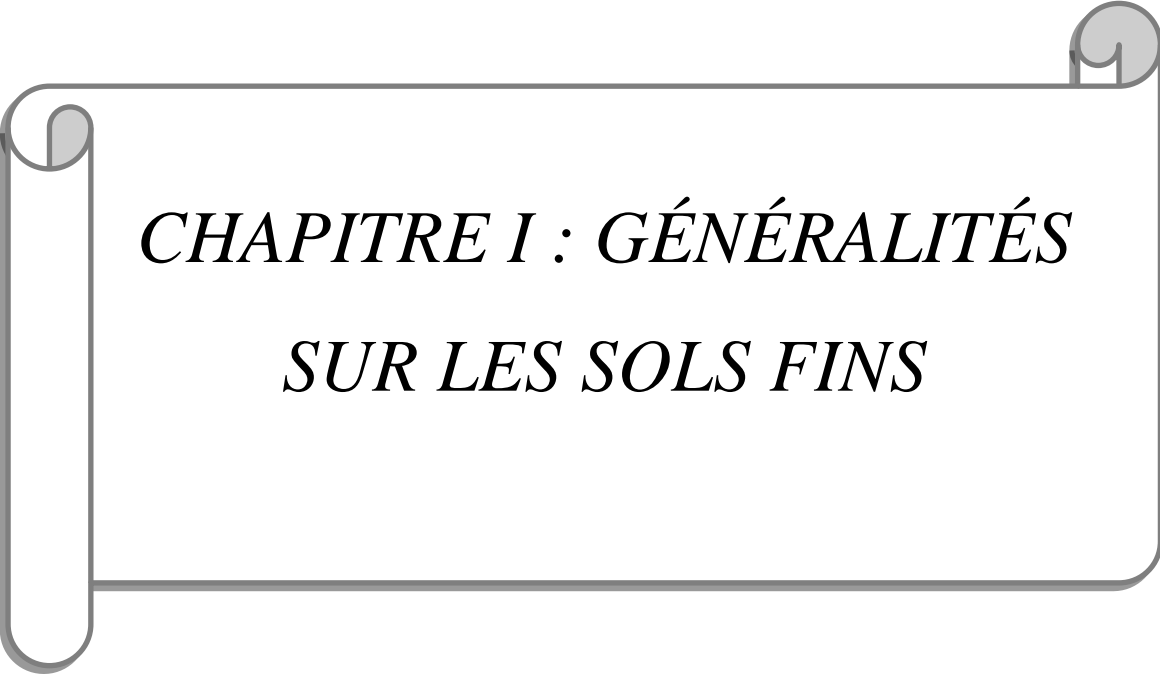
Aujourd'hui, lors de la réalisation d'ouvrages d'infrastructures, la réutilisation des matériaux du site de construction est une préoccupation majeure. L'objectif est de minimiser les impacts négatifs sur l'environnement et les coûts d'investissement du projet. Cependant, la réutilisation des matériaux locaux est souvent difficile en raison de leurs propriétés médiocres qui ne répondent pas aux exigences de l'ouvrage, en particulier lorsqu'il s'agit de sols argileux.

Le traitement des sols ayant des propriétés médiocres favorise le développement durable et la préservation de l'environnement en préservant les ressources naturelles. Des méthodes de traitement classiques permettent d'améliorer ces sols afin de les rendre utilisables à nouveau et capables de supporter les charges des constructions. Cependant, les problèmes d'instabilité des structures persistent, principalement en raison de la forte proportion d'argile dans le sol, ce qui entraîne des problèmes tels que le tassement, le gonflement, le retrait et le glissement.

Les méthodes de traitement des sols sont couramment utilisées pour améliorer les propriétés géotechniques déficientes des sols rencontrés sur un site, afin de les réutiliser dans un ouvrage spécifique. À l'heure actuelle, de nouvelles techniques de stabilisation ont émergé et continuent de se développer, grâce à la disponibilité de moyens de mise en œuvre. Parmi ces techniques, on peut citer la stabilisation chimique, la stabilisation thermique et la stabilisation par l'ajout d'additifs.

Ce mémoire présente une étude expérimentale organisée en six chapitres, répartis en trois parties: La première partie comprend deux chapitres, le premier se concentre sur la description des argiles, tandis que le deuxième est une recherche bibliographique sur le traitement des sols argileux par les fibres. La deuxième partie est une étude expérimentale composée de deux chapitres, le premier contenant des notions de base sur le plan d'expérience, et le deuxième présentant les essais de caractérisation du sol. La troisième partie comporte une étude de comportement du sol d'étude et une analyse statistique et d'optimisation des paramètres de traitement, elle comprend deux chapitres, le premier présentant les résultats des essais de sol non traité, et le deuxième présentant les résultats expérimentaux et une prédiction mathématique des résultats avec une optimisation des paramètres de traitement.

Enfin, cette étude se termine par une conclusion générale sur les objectifs atteints dans ce travail, ainsi que les perspectives visées pour le développement futur de ce travail.



*CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS
SUR LES SOLS FINS*

I.1. Introduction

Les sols fins, tels que les argiles, les limons, les silts et les marnes, sont des types de sols qui présentent des caractéristiques physiques et mécaniques particulières en raison de la taille et de la forme de leurs particules. En effet, ces sols sont composés de particules très fines et plates, ce qui leur confère des propriétés telles que la plasticité, la compressibilité, la perméabilité réduite, la sensibilité à l'eau, la faible portance, etc.

Les sols fins sont répandus dans le monde entier et sont souvent associés à des zones géologiques spécifiques. Ils sont utilisés pour la construction de diverses structures, telles que des fondations de bâtiments, des routes, des ponts, des barrages, etc. Cependant, leur comportement et leur stabilité peuvent être difficiles à prévoir et à contrôler en raison de leurs propriétés particulières.

La connaissance des propriétés des sols fins est donc essentielle pour les ingénieurs et les constructeurs afin de concevoir et de construire des structures sûres et durables. Les techniques de traitement des sols peuvent être utilisées pour améliorer les propriétés des sols fins, mais leur application doit être effectuée avec précaution pour éviter tout effet indésirable. En outre, la classification géotechnique des sols est importante pour comprendre les propriétés des sols fins et leur comportement dans différentes conditions. Il existe différentes méthodes de classification des sols fins, telles que la classification unifiée des sols, la classification AASHTO des sols et la classification des sols de la norme européenne EN 1997-2.

En somme, la connaissance des sols fins et de leurs propriétés est essentielle pour la conception et la construction de structures sûres et durables, ainsi que pour la préservation de l'environnement et de la sécurité des personnes.

I.2. Diverses phases du sol [1]

Le sol est un complexe multiphasique, il est composé principalement de trois phases (Figure I.1) ; solide (grains solides de différentes tailles), liquide (eau), gazeuse (air).

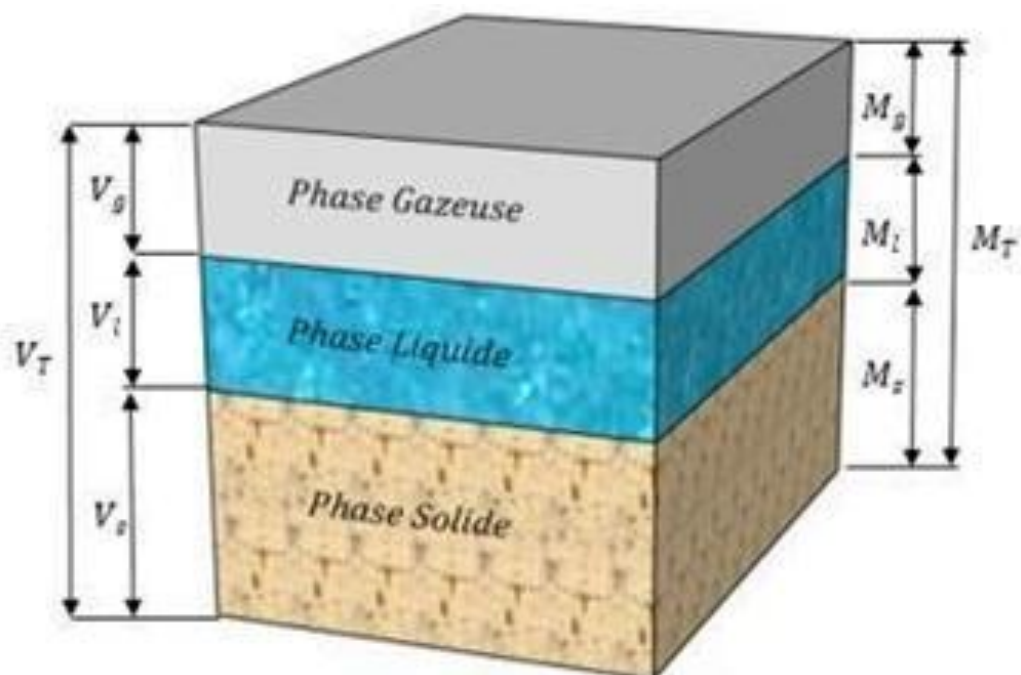


Figure I.1 : Diagramme des phases d'un sol.

I.2.1 Phase solide

La phase solide du sol est en général majoritairement minérale qui comprend :

❖ **Eléments grossiers :**

Ce sont les éléments > 2 mm et on les classe par dimensions :

- ✓ 0,2 cm à 2 cm : graviers.
- ✓ 2 à 5 cm : cailloux.
- ✓ 5 à 20 cm : pierres.
- ✓ 20 cm : blocs.

Leur expression se fait en pourcentage, qu'on donne sur le terrain en fonction du volume et en laboratoire en fonction de la masse (sur un échantillon de sol, au laboratoire, on estime le pourcentage après passage au tamis de 2 mm).

❖ **Terre fine :**

La terre fine est la fraction de terre qu'il reste lorsqu'on retire les éléments grossiers (donc < 2 mm, au tamis). On peut classer les éléments de la terre fine par dimensions :

- 2 mm à 0,2 mm : sable grossiers.

- 0,2 mm à 50 μm : sable fins.
- 50 μm à 20 μm : limons grossiers.
- 20 μ à 2 μ : limons fins.
- < 2 μ : argiles.

Elle comprend aussi une fraction organique dont le taux varie selon le type de sol et les conditions de pédogenèse. Les sols cultivés présentent des taux de matière organique compris dans une gamme allant de moins de 1% à 20% de la masse du sol.

I.2.2 Phase liquide

La phase liquide du sol est souvent désignée par le terme « solution du sol », occupe une partie plus ou moins importante de la porosité du sol, est constituée d'eau où se trouvent diverses substances organiques et minérales dissoutes et des particules en suspension. La composition de la solution du sol varie selon :

- ✓ Le climat,
- ✓ Les apports anthropiques (fertilisants, produits de traitement phytosanitaire...etc.)
- ✓ L'activité biologique du sol (exsudats racinaires, produits de synthèse et de dégradation microbienne ...etc.)

I.2.3 Phase gazeuse

Dans un sol bien aéré, les gaz qui règnent dans l'atmosphère du sol sont :

- ✓ L'azote (78 à 80%) ;
- ✓ L'oxygène (18 à 20%) ;
- ✓ Le dioxyde de carbone (0,2 à 3%).

D'autres molécules gazeuses d'origine anthropique telles que les pesticides peuvent également être détectées dans l'atmosphère du sol. Ces gaz peuvent exister dans le sol soit à l'état libre, soit dissous dans la solution du sol. Cependant, dans certaines conditions tout l'espace poral du sol est alors occupé par l'eau et le sol est dit saturé. Dans ce cas, la phase gazeuse sera totalement absente.

I.3. Différents types des sols fins [2]

Les sols à grains fins regroupent évidemment tous les sols dont les particules sont invisibles à l'œil nu. Le diamètre équivalent de ces particules peut varier d'environ 1nm (10^{-6}) à 0,08 mm. Les sols à grain fin sont généralement identifiés sur la base de leur plasticité.

I.3.1 Argiles

De manière générale, le mot argile sert à désigner l'ensemble des particules dont la taille est inférieure à 2 μm . En termes de taille de grain, le mot argile a deux sens. Il désigne d'abord les particules faites des minéraux argileux dont les cristaux excèdent parfois 2 μm . Les minéraux argileux proviennent essentiellement de l'altération chimique de certains minéraux composant la roche. Cette altération chimique agit de façon que certains minéraux silicates, comme les micas ou les feldspaths sont transformés en d'autres espèces minérales (kaolinite, illite, Montmorillonite), souvent de granulométrie plus fine. Les minéraux argileux sont surtout de la famille de silicates, formés à base de silice (Si) et d'oxygène (O), tels que le quartz et les feldspaths. Le mot minéral argileux comprend les minéraux qui font partie du groupe des phyllosilicates, appelés aussi silicates de structure lamellaires. Un feuillet d'argile est formé par l'association des couches tétraédriques (T) à base de tétraèdres siliciques (SiO_4^{4-}) et de couches octaédriques (O) aluminiques et/ou magnésiques.

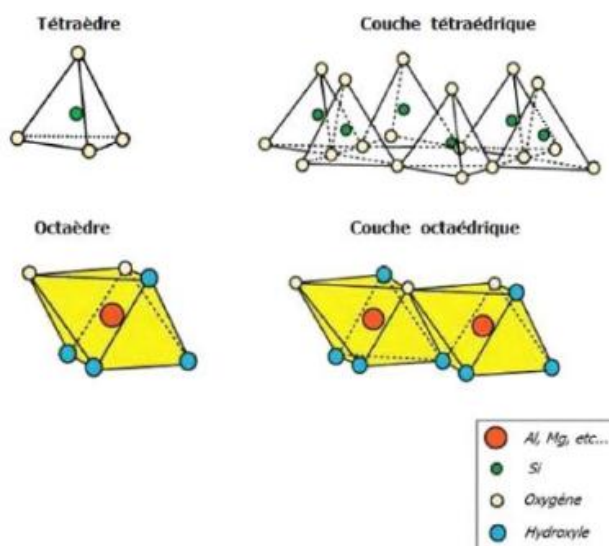


Figure I.2 : Représentation des tétraèdres et des octaèdres.

Le terme argile désigne ensuite les débris les plus fins de la désagrégation-altération physique des roches appelés la farine de roche ($d < 2 \mu\text{m}$). Cette farine peut contenir une proportion de minéraux argileux plus ou moins importante.



Figure I.3 : Différentes couleurs d'argiles.

I.3.2 Limons

Les limons possèdent un squelette siliceux à silicocalcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles (la teneur en argile est variable). Ils sont constitués par des éléments de dimensions comprises entre 2 et 20 μm . Le principal minéral constitutif est le quartz associé le plus souvent l'argile, la calcite, les feldspaths, les oxydes des hydroxydes de fer, le mica ou les minéraux lourds. L'origine du limon peut être fluviale ou éolienne ; dans ce dernier cas, on lui donne souvent le nom de lœss. Le lœss, habituellement de couleur jaunâtre ou brun, est un sol caractérisé par un très bon tri granulométrique dû à son origine éolienne, avec essentiellement des grains compris entre 10 et 50 μm . Il contient, en proportion moindre des sables et des argiles (ces dernières pouvant être agglomérées et former des grains de limon fin). Les limons peuvent contenir des graviers des galets, des concrétions.

I.3.3 Marnes [3]

Les marnes sont des formations sédimentaires, cohérentes, formées dans un milieu marin peu profond. Les marnes sont constituées essentiellement d'un mélange entre les calcaires et les argiles, la proportion de ce dernier varie de 30% à 70%.

Comme les argiles, les marnes sont tendres, finement poreuses, friables quand elles sont sèches, plastiques lorsqu'elles sont mouillées. Mais, à la différence des argiles, elles font effervescence avec les acides à cause de la présence du calcaire. La finesse des particules constitutives (minéraux argileux, carbonates et, parfois, silice en faible quantité) place les marnes dans le groupe des lutites, ou pélites. Suivant la composition minéralogique, on peut

distinguer des marnes dolomitiques, glauconieuses, magnésiennes, gypseuses, micacées, sableuses, humifères.

Utilisation de marnes [4]

Depuis l'âge du bronze, on extrait la marne sous forme de blocs de pierre à destination de la construction. On retrouve ce matériau abondant, facile à extraire et à façonner dans nombre de bâtiments anciens modestes ou prestigieux. Avec l'épuisement des carrières en marne de qualité, la faible dureté du matériau et sa mauvaise résistance conduiront à un abandon progressif de cet usage. Le phénomène des pluies acides constitue depuis le XX^e siècle un redoutable ennemi des bâtiments construits en matériaux marneux. Les derniers gisements de marnes de qualité sont donc réservés à la restauration.

La marne et la chaux broyées étaient utilisées dès l'époque gauloise pour l'amendement des sols acides, par exemple par les Pictons du Poitou comme l'indique Pline l'Ancien au I^{er} siècle⁵. Cet usage perdure encore aujourd'hui, quoique plus anecdotique.

Au XIX^e siècle, on industrialisa la production de chaux. La marne, avec sa composition calcaire élevée et en raison de son abondance, était un ingrédient idéal pour les usages qui ne requéraient pas finalement une chaux d'un haut niveau de pureté ; l'élaboration de mortier, par exemple. Le ciment Portland d'aujourd'hui utilise toujours la marne comme ingrédient principal.

I.3.4 Les vases [5]

Les vases sont des dépôts formés par les marées ou que l'on rencontre dans les lits des lacs et des rivières. Leur composition est extrêmement variable et dépend plus ou moins de leur mode de formation. Elles se composent en grande partie de roche broyée, d'argile et de sable, avec de coquillages (en partie rompus) et des débris organiques (restes végétaux et animaux) en quantités variables. Il existe plusieurs types de vases à savoir :

Vases marines : les vases marines ou de marée ; aussi connues sous les noms de tangué, vases marais, vases salines et parfois de vases rivières sont déposées par la marée à l'embouchure des rivières et des ruisseaux qui se jettent dans la mer et sur les bords peu élevés des baies et des anses. Elles se composent principalement de particules rocheuses broyées, sous forme d'un sable très fin, et de limon et d'argile en différentes proportions.

Vases de moules et de coquillage d'huitres : les vases de coquillages sont importantes en raison du carbonate de chaux qu'elles renferment.

Vases d'étangs, de lacs et de rivières : ces catégories de vases sont généralement formées par le dépôt des fines substances portées par les eaux des rivières et des ruisseaux. Ce sédiment, qui se compose surtout de particules rocheuses finement broyées, contient souvent une quantité considérable de débris organiques, aussi ces vases sont généralement plus riches en matières organiques que les vases de marées ou d'eau salée.

I.3.5 Les Tourbes [6]

La tourbe se définit comme le produit de la fossilisation de débris végétaux par des microorganismes (bactéries, anthroïdes, champignons, microfaune) dans des milieux humides et pauvres en oxygène que l'on appelle tourbière sur un intervalle de temps compris entre 1 000 et 7 000 ans. Les tourbes se présentent comme un matériau de texture fibreuse et elles se forment dans le fond des vallées humides et les dépressions marécageuses. Elles peuvent contenir des éléments détritiques : Sables, graviers, vases. Elles contiennent une très forte proportion d'eau. Si la tourbe est soumise à des conditions particulières de pression et de température causées par son enfouissement, elle se transforme, au bout d'une période de l'ordre du million d'années, en charbon. Il existe plusieurs types de la tourbe à savoir :

La tourbe blonde : qui provient de la transformation des sphaignes. Elle est riche en fibre de cellulose et en carbone. Sa texture est fibrique. Ses autres traits essentiels sont sa faible densité, sa forte teneur en eau et sa pauvre teneur en cendre minérale car elle est souvent jeune (2 000 ans).

La tourbe brune : qui provient de la transformation de débris végétaux ligneux (arbres) et d'éricacées. Elle est composée de fibres mélangées à des éléments plus fins, provenant d'une dégradation plus poussée des végétaux, lui donnant une texture mésique. Elle est plus âgée (5 000 ans) que la précédente.

La tourbe noire : qui provient de la transformation des cypréracées. Elle est riche en particules minérales et organiques fines. Sa texture est saprique, c'est-à-dire que la tourbe est plastique et moins fibreuse. Visuellement, la tourbe noire se distingue facilement de la tourbe blonde par sa couleur foncée. Une tourbe blonde très ancienne tend à se rapprocher, par certains caractères, de la tourbe noire.

I.4. Systèmes de classifications des sols

La classification géotechnique des sols est une méthode de classification des sols basée sur leurs propriétés mécaniques et leur comportement en ingénierie. Cette classification est utilisée pour aider à déterminer les propriétés géotechniques des sols, telles que la résistance à la compression, l'angle de frottement, la perméabilité, la compressibilité, la plasticité, la cohésion, etc.

Le système le plus couramment utilisé pour la classification géotechnique des sols est la classification unifiée des sols (USCS), développée par l'Army Corps of Engineers des États-Unis. La classification unifiée des sols utilise une combinaison de propriétés visuelles et de propriétés d'essai pour classer les sols en deux groupes principaux : les sols fins et les sols grossiers.

Les sols fins, tels que les argiles, les limons et les sédiments fins, sont classés en fonction de leur plasticité, de leur teneur en sable et de leur teneur en gravier. Les sols grossiers, tels que les sables et les graviers, sont classés en fonction de leur courbe granulométrique, de leur forme des grains et de leur densité relative.

En plus de la classification unifiée des sols, d'autres systèmes de classification géotechnique des sols sont également utilisés, tels que la classification AASHTO (Association of State Highway and Transportation Officials) pour les sols routiers, la classification de la British Soil Mechanics Association (BSM) et la classification de la norme européenne EN 1997-2 (Eurocode 7) pour la conception géotechnique.

En résumé, la classification géotechnique des sols est une méthode de classification des sols basée sur leurs propriétés mécaniques et leur comportement en ingénierie. Elle est utilisée pour déterminer les propriétés géotechniques des sols et pour orienter les pratiques de conception et de construction en ingénierie civile et géotechnique.

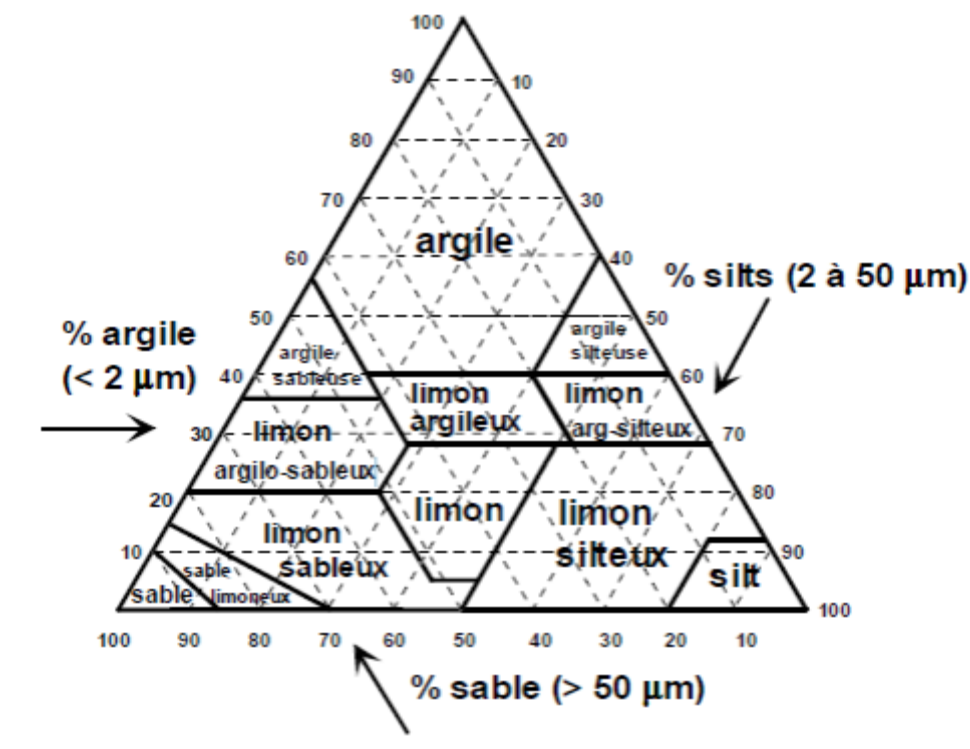


Figure 1.4 : Représentation de la composition granulométrique en 3 fonctions classification triangulaire des sols fins.

I.5. Problèmes liés aux sols fins

Les sols fins, tels que les argiles et les limons, peuvent présenter plusieurs problèmes en ingénierie et en construction en raison de leur composition et de leurs propriétés physiques et mécaniques. Voici quelques-uns des problèmes courants liés aux sols fins :

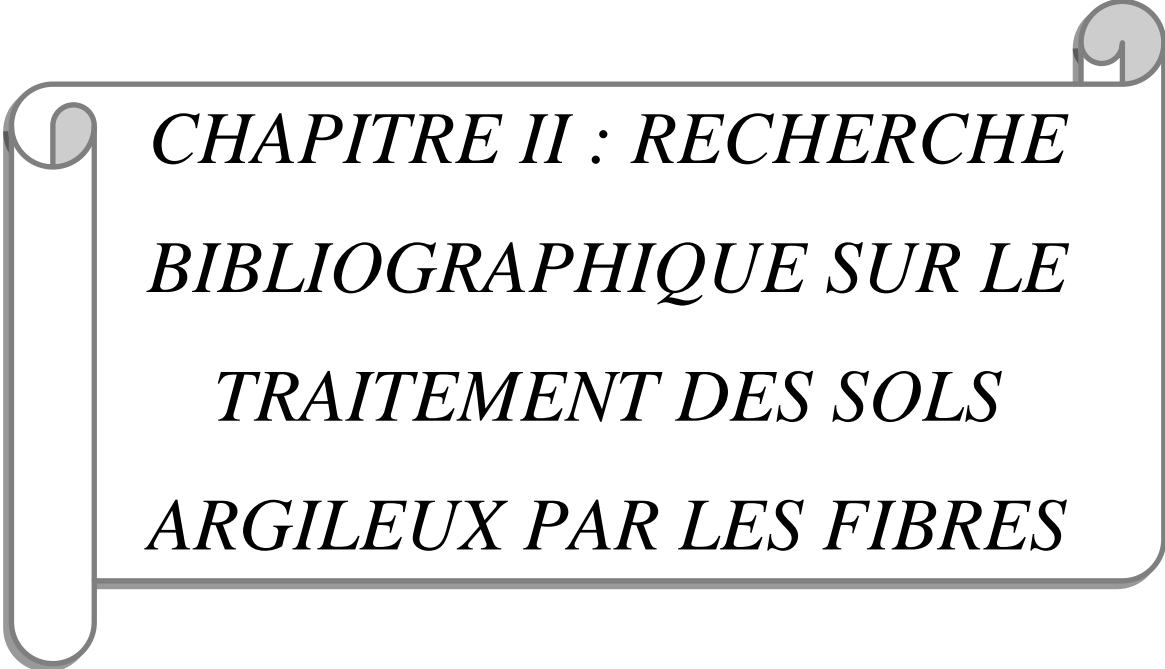
1. **Plasticité** : Les sols fins ont tendance à être très plastiques, ce qui signifie qu'ils peuvent se déformer facilement sous contrainte. Cela peut entraîner une instabilité et une perte de portance sous des charges importantes, telles que les bâtiments et les routes.
2. **Compressibilité** : Les sols fins ont également une faible densité relative, ce qui les rend compressibles sous des charges. Cela peut entraîner un tassement excessif et des dommages aux structures construites sur ces sols.
3. **Gonflement et retrait** : Les sols fins ont tendance à gonfler et à se rétracter en réponse aux variations de l'humidité. Ce gonflement et cette rétraction peuvent entraîner des fissures et des dommages aux fondations des bâtiments et des infrastructures.

- 4. Faible perméabilité** : Les sols fins ont une faible perméabilité, ce qui signifie qu'ils ont une capacité limitée à drainer l'eau. Cela peut entraîner une accumulation d'eau et une saturation du sol, ce qui peut affecter la stabilité des structures construites sur ces sols.
- 5. Érodibilité** : Les sols fins sont souvent très érodables en raison de leur composition fine et de leur faible résistance à l'eau. Cela peut entraîner une perte de sol et une instabilité des pentes, des talus et des remblais.

En raison de ces problèmes, il est important de prendre en compte les propriétés des sols fins lors de la conception et de la construction des infrastructures. Des techniques de traitement et de renforcement des sols peuvent être utilisées pour améliorer la stabilité et la portance des sols fins, telles que l'injection de grout, la stabilisation chimique et la construction de pieux et de colonnes de sol renforcé.

I.6. Conclusion

Les sols fins, tels que les argiles et les limons, sont des matériaux complexes qui présentent des défis uniques pour les ingénieurs et les géotechniciens. En raison de leur texture fine, de leur structure complexe et de leur comportement hydromécanique spécifique, ces sols peuvent être difficiles à caractériser, à prévoir et à modéliser. Cependant, malgré ces défis, les sols fins sont également des matériaux précieux pour la construction de fondations, de barrages, de routes et d'autres infrastructures. Ils peuvent offrir une forte capacité de portance et une bonne étanchéité, ce qui les rend indispensables pour de nombreuses applications géotechniques. Cependant, en raison de leur comportement complexe, les sols fins peuvent également présenter des risques d'instabilité, de tassement et d'expansion. Il est donc crucial de comprendre et de gérer les risques associés à ces sols pour garantir des conceptions géotechniques sûres et durables.



*CHAPITRE II : RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE
TRAITEMENT DES SOLS
ARGILEUX PAR LES FIBRES*

II.1. Introduction

La technique de renforcement des sols argileux par les fibres consiste à incorporer des fibres synthétiques ou naturelles dans la masse de sol afin d'améliorer sa résistance et sa stabilité. Selon les propriétés mécaniques et la composition du sol traité, les fibres peuvent être ajoutées sous forme de fibres courtes ou longues.

Les sols argileux sont vulnérables aux variations d'humidité et peuvent subir des déformations importantes, notamment la fissuration et le gonflement, qui peuvent endommager les structures de surface. Dans ce contexte, le traitement des sols argileux par les fibres est une méthode de renforcement qui permet d'améliorer les propriétés mécaniques et la stabilité de ces sols, tout en minimisant leur sensibilité à l'humidité.

Les fibres peuvent renforcer les sols argileux de plusieurs façons. Tout d'abord, elles peuvent agir comme un renforcement mécanique, augmentant la résistance à la traction et à la flexion du sol traité. De plus, les fibres peuvent améliorer la cohésion des sols argileux, réduisant leur susceptibilité à la fissuration et à la fragmentation sous des charges de cisaillement. Enfin, les fibres peuvent contribuer à réduire la perméabilité des sols argileux, empêchant ainsi la pénétration d'eau dans la masse de sol et atténuant les effets négatifs de l'humidité sur les propriétés du sol.

Plusieurs types de fibres peuvent être utilisés pour le traitement des sols argileux, notamment les fibres synthétiques, les fibres naturelles telles que la paille, les fibres de coco et les fibres de bois, ainsi que les fibres de géotextile. Ces fibres peuvent être incorporées dans le sol argileux par mélange ou par injection.

Le traitement des sols argileux par les fibres présente de nombreux avantages, notamment une amélioration significative des propriétés mécaniques et une réduction de la perméabilité du sol. En outre, cette technique peut être réalisée avec des matériaux relativement peu coûteux et mis en œuvre de manière relativement simple, ce qui en fait une solution économique pour le renforcement des sols argileux.

Il est important de prendre en compte que l'efficacité du traitement des sols argileux par les fibres dépend de plusieurs facteurs, notamment la quantité de fibres utilisées, la composition du sol, les conditions environnementales et la méthode de mise en œuvre. Avant d'utiliser cette technique, une évaluation approfondie doit être réalisée pour déterminer sa faisabilité et

son efficacité. Cela permettra de s'assurer que les résultats attendus sont atteints et que la solution est adaptée aux spécificités du terrain et des contraintes environnementales.

II.2. Les argiles

Les argiles sont des minéraux formés par la décomposition de roches. Ils sont hétérogènes à différentes échelles, étant souvent associés à d'autres minéraux tels que le quartz et le feldspath à l'échelle macroscopique, tandis qu'à l'échelle microscopique, ils présentent une structure en feuillet. La nature physico-chimique des argiles est déterminante pour leur comportement rhéologique, qui est gouverné par les interactions entre les feuillets argileux. Pour mieux comprendre cette nature physico-chimique, il est important de caractériser les différents niveaux d'organisation qui constituent les argiles sur le plan minéralogique.

II.2.1 Définition

Le terme "argile" n'a pas de définition universelle car il est utilisé différemment selon les disciplines scientifiques. Il peut être défini par les propriétés physiques étudiées telles que la plasticité, par son utilisation ou encore par sa structure cristallographique. Dans la nature, l'argile est rarement constituée d'un seul minéral et est plutôt un mélange de phyllosilicates, dont le minéral majoritaire lui donne son nom. D'autres minéraux sont souvent associés, tels que des carbonates, de la silice, des oxydes et hydroxydes d'aluminium ou encore des minéraux ferri-fères. En outre, l'argile est caractérisée par une certaine plasticité et des grains ayant une taille inférieure à 2 μm .

II.2.2 Classification des argiles

Les travaux de l'Association Internationale Pour l'Etude des Argiles (AIPEA) menés de 1966 à 1972, ainsi que d'autres recherches ultérieures, ont conduit à l'établissement d'une classification des argiles (tableau 2.1) basée sur les critères suivants:

- Type de feuillets (2:1 ou 1:1) ;
- Charge globale du feuillet ;
- Nature des cations interfoliaires.

La classification des argiles repose sur les différents types de feuillets qui les composent.

Les minéraux à 7 Å ont un feuillet constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique, ce qui les qualifie de T:O ou de type 1:1.

Les minéraux à 10 Å ont un feuillet constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique, ce qui les qualifie de T:O:T ou de type 2:1.

Les minéraux à 14 Å ont un feuillet constitué de l'alternance de feuillets T:O:T et de couches octaédriques interfoliaires.

Enfin, les minéraux interstratifiés ont une épaisseur de feuillet variable et résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes précédents. La valeur de la charge permanente du feuillet est utilisée comme critère pour établir une classification des phyllosilicates 2:1 (voir le tableau II.1).

Tableau II.1. Classification des phyllosilicates.

Nature du feuillet	Nature des cations Interfoliaires	Groupe	Nature de la couche octaédrique	Exemples
1 :1	Pas de cations ou seulement de l'eau	Kaolinite	Diocatédrigue	Kaolinite, halloysite, nacrite, dickite
2 :1	Pas de cations	Pyrophyllites	Diocatédrigue	Talc
Cations hydratés et échangeables	Smectites	Diocatédrigue	Montmorillonite, nontronite, beidellite, saponite	
Vermiculites	Diocatédrigue	Vermiculite diocatédrigue à trioctatédrigue		
Cations monovalents nonhydratés	Micas	Diocatédrigue	Muscovite, Illite, Paragonite, biotite	
Cations divalents non-hydratés	Micas durs	Diocatédrigue	Margarite, clintonite	
Hydroxyles	Chlorites	Diocatédrigue	Donbassite, sudoite, Clinochore	
2:1 fibré	/	Palygorskites, Sépiolites	Diocatédrigue	Sépiolite, Palygorskite

II.2.3 Principaux types d'argiles [7]

Il existe plusieurs variétés des familles d'argiles qui composent des dizaines d'espèces différentes, comme indiqué dans le tableau 2-1. Les trois principales familles d'argiles, à savoir la kaolinite, l'illite et la montmorillonite, sont présentes dans le monde entier en différentes proportions.

II.2.3.1 Kaolinites

Effectivement, la kaolinite est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). Ces deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre

ne forment qu'une seule et même couche. La kaolinite est un minéral argileux relativement stable et peu réactif, ce qui lui confère des propriétés intéressantes pour diverses applications industrielles. Elle est utilisée dans la fabrication de la céramique, du papier, du caoutchouc, des cosmétiques, des médicaments et de nombreux autres produits.

II.2.3.2 Montmorillonite

En effet, la montmorillonite, parfois appelée Smectites, est un minéral argileux important qui est constitué de deux feuillets de silice et d'un feuillet d'alumine (gibbsite). Dans la structure de la montmorillonite, les feuillets en octaèdre se trouvent entre deux feuillets de silice, et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche. Les sols contenant de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsqu'ils sont exposés à des niveaux élevés d'eau, ce qui peut entraîner des pressions de gonflement qui peuvent causer des dommages aux structures légères et aux pavages. La montmorillonite est également utilisée dans diverses applications industrielles telles que la fabrication de la céramique, le traitement des eaux usées, et la production de matériaux composites.

II.2.3.3 L'illite

L'illite est une autre composante importante des sols argileux, avec une structure similaire à celle de la montmorillonite. Cependant, il y a des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques dans la structure de l'illite. Cette présence d'ions de potassium renforce la liaison entre les feuillets de l'argile, ce qui empêche pratiquement l'intercalation des molécules d'eau. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et l'adsorption de cations. Ces cations échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles, car leur échange avec les cations présents dans les solutions environnantes peut affecter les propriétés physiques et chimiques des sols argileux. Les cations échangeables sont responsables de la capacité d'échange cationique des argiles, qui est une mesure de leur capacité à échanger des cations avec leur environnement.

II.2.4 Principaux problèmes [8]

En effet, dans de nombreux pays du monde, les problèmes liés au gonflement des sols argileux sont très courants et peuvent causer des dommages importants aux ouvrages légers tels que les bâtiments, les routes, les ponts et les canalisations. Aux États-Unis, les coûts associés aux dommages causés par le gonflement des sols sont supérieurs à ceux de toutes les catastrophes naturelles.

En Algérie, l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes sont confrontées à des problèmes liés au gonflement, au tassement et au glissement des sols argileux. Ces problèmes peuvent être causés par des variations de la teneur en eau des sols, des variations de la pression de l'eau souterraine, ou encore par des changements dans les conditions environnementales. Il est donc crucial de prendre en compte les propriétés des argiles et leur comportement rhéologique lors de la planification et de la construction de projets d'infrastructure pour éviter ou minimiser les dommages causés par le gonflement des sols argileux.

II.2.4.1 Problèmes de retrait- gonflement

Le phénomène de gonflement des sols argileux est lié aux variations de l'humidité de ces sols. Les sols argileux ont la capacité de retenir l'eau disponible, mais peuvent également la perdre en se rétractant en cas de sécheresse. Le phénomène de retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux. La variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle peut causer des désordres dans les constructions, tels que la fissuration et le décollement d'éléments jointifs. Les conséquences du retrait-gonflement peuvent être importantes et coûteuses pour les propriétaires de bâtiments et les collectivités locales. C'est pourquoi il est important de prendre en compte les propriétés des sols argileux lors de la construction et de la planification des projets d'infrastructure.

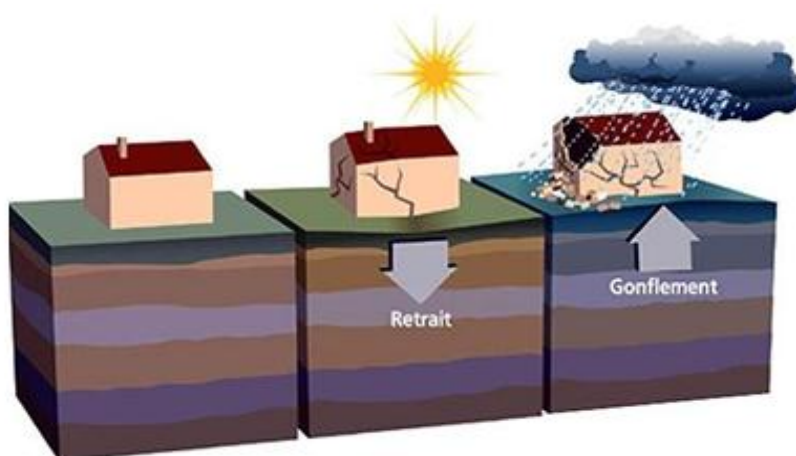


Figure II.1: Le phénomène de retrait-gonflement.

II.2.4.2 Problèmes de glissement

En effet, les glissements de terrain sont des mouvements qui affectent les talus et les versants naturels, et peuvent causer des dommages importants aux constructions et aux ouvrages. Ces mouvements consistent en un déplacement plus ou moins continu d'une masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés, qui est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures telles que l'hydraulique ou les secousses sismiques, ou d'une modification des conditions aux limites. Le déplacement se produit le long d'une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes.

On distingue généralement trois types de glissements de terrain :

- Le glissement plan, qui correspond à un déplacement le long d'une surface plane de rupture.
- Les glissements rotationnels simples, qui correspondent à un déplacement le long d'une surface de rupture courbe.
- Les glissements rotationnels complexes (composés), qui correspondent à un déplacement le long de plusieurs surfaces de rupture courbes, souvent superposées ou imbriquées les unes dans les autres.

Ces différents types de glissements peuvent avoir des conséquences très graves sur les infrastructures et les populations locales, c'est pourquoi il est important de prendre en compte les risques de glissements de terrain lors de la planification et de la construction de projets d'infrastructure. Les mesures préventives incluent l'étude géotechnique des sols, la stabilisation des pentes, la mise en place de systèmes de drainage et de protection, et la surveillance régulière des zones à risque.

II.2.4.3 Problèmes de tassement

Le tassement des sols est une déformation généralement lente qui peut affecter certains sols compressibles, tels que les vases, les tourbes et les argiles, sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation. Le tassement se manifeste par un enfoncement vertical du sol, qui peut être accompagné d'un déplacement latéral sous l'emprise du remblai, ou d'un déplacement latéral du sol de fondation hors de l'emprise du remblai.

Les déplacements verticaux peuvent être importants, jusqu'à plusieurs mètres dans certains cas si les sols compressibles sont très épais, tandis que les déplacements horizontaux sont généralement plus faibles, de l'ordre de dizaines de centimètres dans les cas les plus importants. La vitesse des tassements dépend du degré de consolidation des sols d'assise, qui peut être évalué à l'aide de l'essai œdométrique. Les tassements résiduels peuvent être importants, de l'ordre de plusieurs centimètres sur des périodes de plusieurs années.

Le tassement des sols peut causer des dommages importants aux infrastructures et aux constructions, tels que des fissures, des déformations et des affaissements, ce qui peut compromettre leur stabilité et leur durabilité.

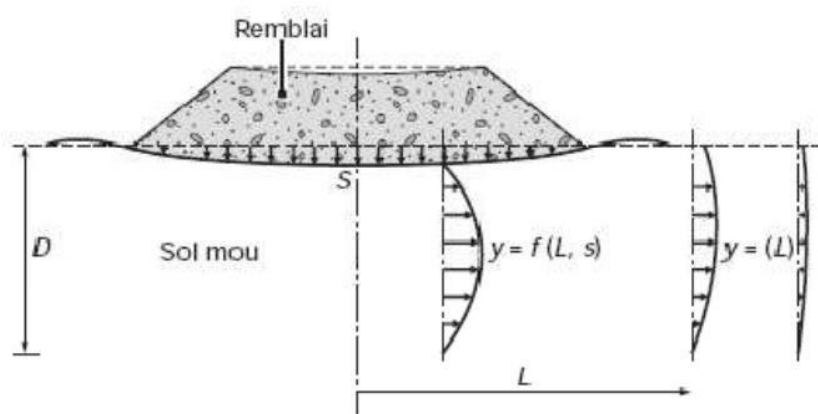


Figure II.2 : Problème de tassement.

II.3. Les fibres

Tout à fait, les fibres sont des filaments de matière longs et fins, ayant un diamètre compris entre 7 et 30 microns. Les fibres peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux, tels que les polymères, les métaux, les céramiques, le verre, le carbone, ou encore des matériaux naturels tels que le coton ou la laine. Les fibres ont un rapport longueur/diamètre élevé, ce qui leur confère des propriétés uniques, telles qu'une résistance mécanique élevée, une grande rigidité et une flexibilité.

En raison de leur finesse, les fibres peuvent être tissées et drapées pour créer des formes complexes et des structures légères, tout en conservant leur résistance mécanique. Les fibres sont largement utilisées dans de nombreux domaines, tels que la construction, l'aérospatiale, l'automobile, le textile, la médecine, l'électronique, etc. Les applications de fibres incluent la

fabrication de tissus techniques, de composites renforcés de fibres, de câbles de ponts, de pneus, de renforts de béton, de prothèses médicales, de fils électriques, et bien plus encore.

En outre, les fibres peuvent également être traitées pour améliorer leurs propriétés, telles que la résistance à la corrosion, la conductivité électrique, la résistance à la chaleur, la résistance aux produits chimiques, ou encore la résistance à la fatigue. Les fibres de carbone, par exemple, sont particulièrement réputées pour leur résistance et leur légèreté, et sont largement utilisées dans l'industrie aérospatiale pour la fabrication de composants structurels.

II.3.1 Classification des fibres

Les fibres peuvent être classées en différentes catégories en fonction de leur origine, de leur composition, de leur forme ou de leur structure. Voici quelques exemples de classifications courantes :

II.3.1.1 Les fibres naturelles

Les fibres naturelles sont des fibres produites à partir de sources végétales, animales ou minérales. Elles sont souvent appréciées pour leur aspect durable, leur toucher doux et leur respirabilité. On peut classer les fibres naturelles en trois groupes principaux selon leur origine :

1. Les fibres végétales : elles sont extraites des plantes, telles que le coton, le lin, le chanvre, le jute, le sisal, le bambou, la ramie, etc. Les fibres végétales sont souvent utilisées dans l'industrie textile pour la fabrication de tissus, de vêtements, de sacs, de cordages, etc.

2. Les fibres animales : elles sont issues de poils, de fourrures ou de soies d'animaux, telles que la laine de mouton, le cachemire, la soie, le mohair, l'alpaga, etc. Les fibres animales sont souvent utilisées dans l'industrie textile pour la fabrication de vêtements, de tapis, de couvertures, etc.

3. Les fibres minérales : elles sont produites à partir de matières minérales, telles que le verre, la céramique, le basalte, le graphite, etc. Les fibres minérales sont souvent utilisées dans l'industrie de la construction pour la fabrication de matériaux isolants, de panneaux composites, de tissus de verre, etc.

Les fibres naturelles présentent plusieurs avantages par rapport aux fibres synthétiques, notamment leur caractère renouvelable, leur biodégradabilité, leur faible impact environnemental et leur confort. Cependant, elles ont aussi des inconvénients, tels que leur

coût souvent élevé, leur résistance mécanique limitée et leur sensibilité aux insectes et aux moisissures.

De plus, les fibres naturelles peuvent être utilisées seules ou combinées avec d'autres fibres naturelles ou synthétiques pour créer des tissus et des matériaux hybrides avec des propriétés spécifiques, tels que la résistance à la traction, l'isolation thermique, la respirabilité, etc.

Les fibres naturelles sont utilisées dans de nombreux domaines, tels que l'industrie textile, la construction, l'ameublement, la papeterie, etc. Les fibres végétales, telles que le coton et le lin, sont largement utilisées dans l'industrie textile pour la fabrication de vêtements, de draps, de serviettes, de sacs, etc. Les fibres animales, telles que la laine et la soie, sont également utilisées dans l'industrie textile pour la fabrication de vêtements, de couvertures, de tapis, etc. Les fibres minérales, telles que le verre, sont utilisées dans l'industrie de la construction pour la fabrication de matériaux isolants, de panneaux composites, de tissus de verre, etc.

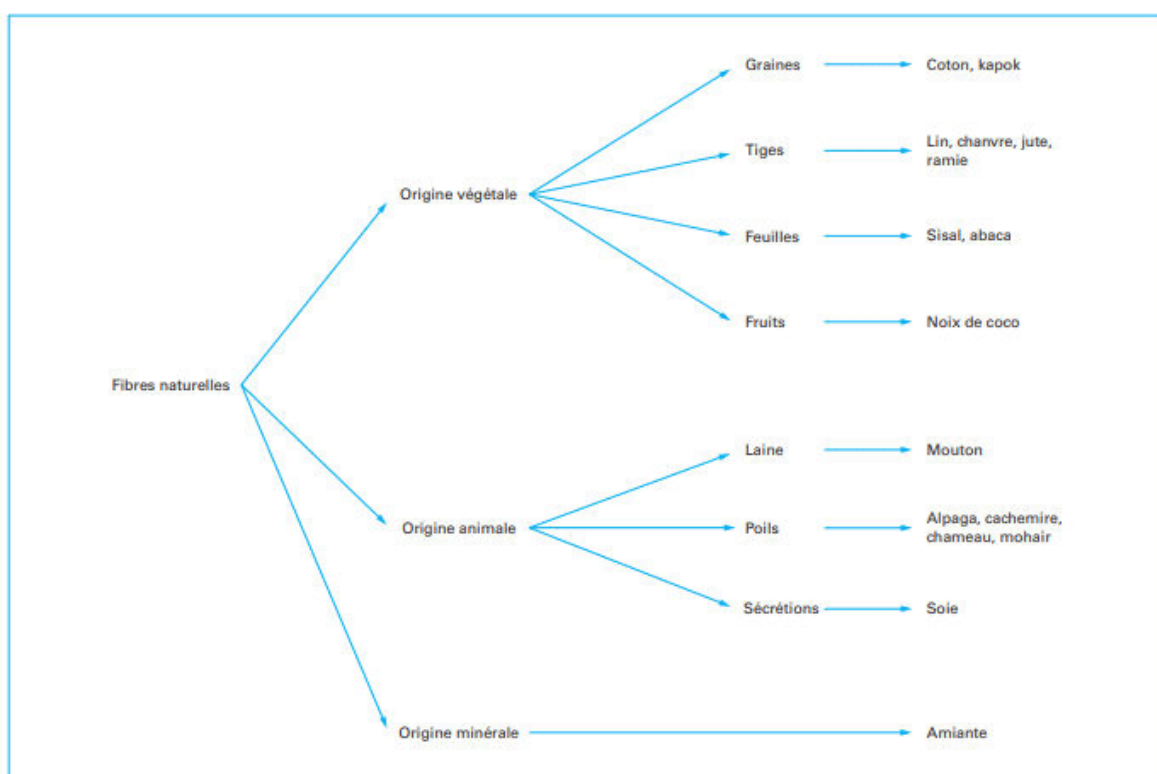


Figure II.3 : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine.

II.3.1.2 Les fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont produites à partir de matières plastiques et sont souvent appréciées pour leur durabilité, leur résistance aux taches et leur résistance à l'usure.

Elles sont également faciles à entretenir et souvent moins coûteuses que les fibres naturelles. Voici quelques exemples de fibres synthétiques :

- a) **Le polyester** : c'est une fibre durable et résistante, qui est souvent utilisée pour les vêtements de sport, les textiles d'ameublement et les matériaux de construction. Le polyester est également facile à teindre et à imprimer, ce qui lui permet de prendre une grande variété de motifs et de couleurs.
- b) **Le nylon** : c'est une fibre résistante et élastique, qui est souvent utilisée pour les vêtements de sport, les bas et les collants, les cordages et les matériaux de construction. Le nylon est également résistant aux insectes et aux moisissures, ce qui en fait un choix populaire pour les tentes et les sacs de couchage.
- c) **L'acrylique** : c'est une fibre douce et chaude, qui est souvent utilisée pour les vêtements d'hiver, les couvertures et les textiles d'ameublement. L'acrylique est également résistant aux taches et à l'usure, et peut imiter l'aspect et la texture de la laine et d'autres fibres naturelles.
- d) **Le spandex** : c'est une fibre élastique et résistante, qui est souvent utilisée pour les vêtements de sport, les sous-vêtements et les maillots de bain. Le spandex est également léger et respirant, ce qui en fait un choix populaire pour les vêtements de sport qui nécessitent une grande mobilité.

En plus de ces fibres synthétiques, il existe de nombreuses autres fibres synthétiques, telles que le rayon, le kevlar, le dacron, le modacrylique, le téflon, etc. Chacune de ces fibres a des propriétés uniques qui les rendent adaptées à certaines applications.

Malgré leurs avantages, les fibres synthétiques ont également des inconvénients, tels que leur impact environnemental lorsqu'elles sont produites et éliminées, leur sensibilité à la chaleur et aux flammes, et leur potentiel de libération de microfibres dans les eaux usées. Cependant, des recherches sont en cours pour développer des fibres synthétiques plus durables et respectueuses de l'environnement.

II.3.1.3 Fibres artificielles [9]

Tout à fait, les fibres artificielles sont produites à partir de matières premières naturelles qui subissent un traitement chimique pour obtenir une pâte qui peut être filée à travers une filière. Contrairement aux fibres synthétiques, les fibres artificielles sont produites à partir de matières premières renouvelables.

En ce qui concerne l'habillement, les fibres artificielles sont principalement dérivées de la cellulose, qui est le principal composant des plantes. Les fibres dérivées de la cellulose comprennent la viscose, le lyocell, le modal, le cupro, etc. Ces fibres artificielles sont souvent utilisées pour la fabrication de vêtements, de sous-vêtements, de draps, de serviettes, etc. Les fibres artificielles à base de cellulose sont appréciées pour leur douceur, leur confort et leur absorption de l'humidité.

Les fibres artificielles peuvent également être dérivées de protéines, telles que le soja et la caséine de lait. Ces fibres sont souvent utilisées pour la fabrication de vêtements et de tissus de haute qualité. Les fibres artificielles à base de protéines sont appréciées pour leur douceur, leur résistance et leur respirabilité.

Les fibres artificielles sont souvent considérées comme une alternative plus durable et respectueuse de l'environnement aux fibres synthétiques, car elles sont produites à partir de matières premières renouvelables et peuvent être biodégradables. Cependant, le traitement chimique nécessaire pour produire des fibres artificielles peut être polluant et énergivore, et certaines fibres artificielles peuvent être difficiles à recycler.

II.3.2 Fibres végétales

II.3.2.1 Définition de la fibre végétale

Une fibre végétale est une fibre naturelle dérivée des plantes et est largement utilisée dans la production de textiles, de cordages, de papier, de tissus d'ameublement et d'autres produits. Les fibres végétales sont souvent appréciées pour leur résistance, leur durabilité, leur respirabilité et leur capacité à être facilement teintées ou blanchies. Les exemples courants de fibres végétales comprennent :

- a) **Le coton** : c'est une fibre douce et respirant qui est l'une des fibres le plus couramment utilisées dans l'industrie textile. Le coton est souvent utilisé pour la production de vêtements, de draps, de serviettes, de sacs, etc.
- b) **Le lin** : c'est une fibre durable et résistante qui est souvent utilisée pour la production de tissus d'ameublement, de vêtements d'été, de serviettes de cuisine, etc.
- c) **Le chanvre** : c'est une fibre résistante et durable qui est souvent utilisée pour la production de cordages, de sacs, de tissus d'ameublement, etc.
- d) **Le jute** : c'est une fibre douce et durable qui est souvent utilisée pour la production de sacs, de tapis, de tissus d'ameublement, etc.

- e) **Le sisal** : c'est une fibre robuste et résistante à l'eau qui est souvent utilisée pour la production de cordages, de tapis, de sacs, etc.
- f) **La ramie** : c'est une fibre lisse et brillante qui est souvent utilisée pour la production de tissus d'ameublement, de vêtements d'été, de serviettes, etc.
- g) **Le kenaf** : c'est une fibre douce et respirant qui est souvent utilisée pour la production de papier, de matériaux isolants et de tissus d'ameublement.

Les fibres végétales sont souvent considérées comme une alternative plus durable et écologique aux fibres synthétiques, car elles sont renouvelables et biodégradables. Cependant, la production de fibres végétales peut avoir un impact environnemental négatif si elle est réalisée de manière intensive, avec l'utilisation de pesticides et d'engrais chimiques. De plus, certaines fibres végétales peuvent nécessiter une grande quantité d'eau pour leur culture et leur transformation.

II.3.2.2 Classification des fibres végétales [10]

Les fibres végétales se différencient selon plusieurs critères. D'abord, leur origine organique permet de les classer en deux types : les fibres de tiges, telles que le kenaf, le jute, le lin et la ramie, et les fibres de feuilles, telles que le sisal, l'abaca et la paille de graminées. Ensuite, leur composition en holocellulose (cellulose et hémicellulose) et en lignine permet de distinguer les fibres ligneuses, provenant de matériaux ligneux tels que le bois d'œuvre ou les résidus de l'industrie du bois, et les fibres non ligneuses, issues de végétaux non ligneux souvent annuels comme le kenaf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin, qui sont plus souples et moins riches en lignine. Enfin, les fibres végétales peuvent également être regroupées selon leur longueur en deux catégories : les fibres longues, appelées libériennes, qui proviennent des tiges et de l'écorce de tiges de plantes annuelles, et les fibres courtes ou étoupes, qui sont associées aux fibres longues. Les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbres sont plus rigides et dures en raison de leur forte teneur en lignine.

II.3.3.3 Composition chimique des fibres végétales

Les fibres végétales sont principalement constituées de cellulose, une chaîne linéaire de molécules de glucose. Cependant, elles renferment également d'autres composés tels que l'hémicellulose, la lignine, la pectine et les cires. La proportion de ces composants varie selon la plante et la partie de la plante utilisée. Les fibres de bois, par exemple, contiennent une proportion plus élevée de lignine, ce qui les rend plus dures et rigides que les fibres de

chanvre ou de lin, qui sont plus riches en cellulose et en hémicellulose. En outre, les fibres végétales peuvent contenir des minéraux, des protéines, des acides aminés et des sucres.

II.3.3.4 Propriétés physico-mécanique des fibres végétales [11]

La structure, les dimensions cellulaires, les défauts et la composition chimique des fibres déterminent principalement leurs propriétés. En général, une teneur plus élevée en cellulose se traduit par une résistance à la traction et un module d'élasticité plus élevés. Les fibres végétales sont souvent considérées comme de bons renforts pour les matrices thermoplastiques ou thermodurcissables en raison de leur résistance relativement élevée et de leur faible densité.

II.3.4 Fibre de palmier

II.3.4.1 Présentation générale des palmiers

Les palmiers appartiennent à l'ordre des Arecales et à la famille des Arecaceae et sont présents dans les régions tropicales et subtropicales du monde. Leur apparence est caractérisée par une tige droite, souvent non ramifiée, appelée stipe, couronnée par un bouquet de grandes feuilles en forme d'éventail ou de plume, également appelées frondes, qui peuvent être vertes ou argentées selon l'espèce. Ces plantes pérennes peuvent atteindre des hauteurs impressionnantes, allant de quelques mètres à plus de 30 mètres. Les palmiers sont adaptés à différents environnements, allant des régions désertiques aux forêts tropicales humides. Outre leur valeur esthétique, les palmiers ont une grande importance économique. Ils sont largement cultivés pour leurs fruits, tels que les dattes, les noix de coco et les palmistes, qui sont utilisés dans l'alimentation et l'industrie. En outre, les palmiers fournissent des matières premières précieuses, telles que le bois, les fibres et les huiles, qui sont utilisées dans diverses applications, notamment la construction, la fabrication de meubles et la production de textiles.

II.3.4.2 Présentation des palmiers de Californie (*Washingtonia filifera*)

Le palmier de la Californie, également connu sous le nom de *Washingtonia filifera*, est une espèce de palmier originaire du sud-ouest des États-Unis et du nord-ouest du Mexique. C'est un palmier solitaire qui peut atteindre jusqu'à 18 mètres de hauteur. Il se distingue par son stipe mince et élancé, qui peut atteindre plus d'un mètre de diamètre à la base, et par ses feuilles palmées, vertes ou bleu-vert, qui mesurent jusqu'à 4 mètres de longueur.

Le palmier de la Californie est résistant à la sécheresse et est adapté aux climats chauds et arides. Il est souvent planté comme plante ornementale dans les régions chaudes et sèches du monde entier.

Le palmier de la Californie est également utilisé pour la production de fibres, de bois de construction et de matériaux de toiture. Les feuilles sont utilisées pour la fabrication de paniers, de chapeaux et d'autres objets artisanaux. Les graines de ce palmier sont utilisées pour la production d'huile de palme.

Cependant, le palmier de la Californie est menacé par la destruction de son habitat naturel et par des maladies telles que le « bayoud du palmier », qui est causé par un champignon pathogène. Des efforts sont en cours pour protéger cette espèce et pour maintenir sa durabilité à long terme.

a) Caractéristiques

Les palmiers de la Californie (*Washingtonia filifera*) se caractérisent par un stipe mince et élancé, qui peut atteindre plus d'un mètre de diamètre à la base, et par des feuilles palmées, vertes ou bleu-vert, qui mesurent jusqu'à 4 mètres de longueur. Les feuilles sont attachées à un pétiole épineux et produisent de longs fils de fibre, d'où le nom scientifique de « filifera », qui signifie « porteur de filaments ».

En termes de propriétés mécaniques, les palmiers de la Californie sont relativement résistants à la flexion et à la compression axiale. Leur résistance à la traction est également élevée, bien que cela dépende de la qualité de la fibre et des conditions de culture de l'arbre. La résistance à l'impact des palmiers de la Californie est également relativement élevée, ce qui les rend adaptés pour être utilisés dans la construction de structures légères telles que les pergolas, les abris de voiture, et les gazebos.

En raison de leur apparence attrayante et de leur résistance à la sécheresse, les palmiers de la Californie sont souvent utilisés comme plantes ornementales dans les régions chaudes et arides. En outre, les feuilles de ce palmier sont utilisées pour la fabrication de paniers, de chapeaux et d'autres objets artisanaux.

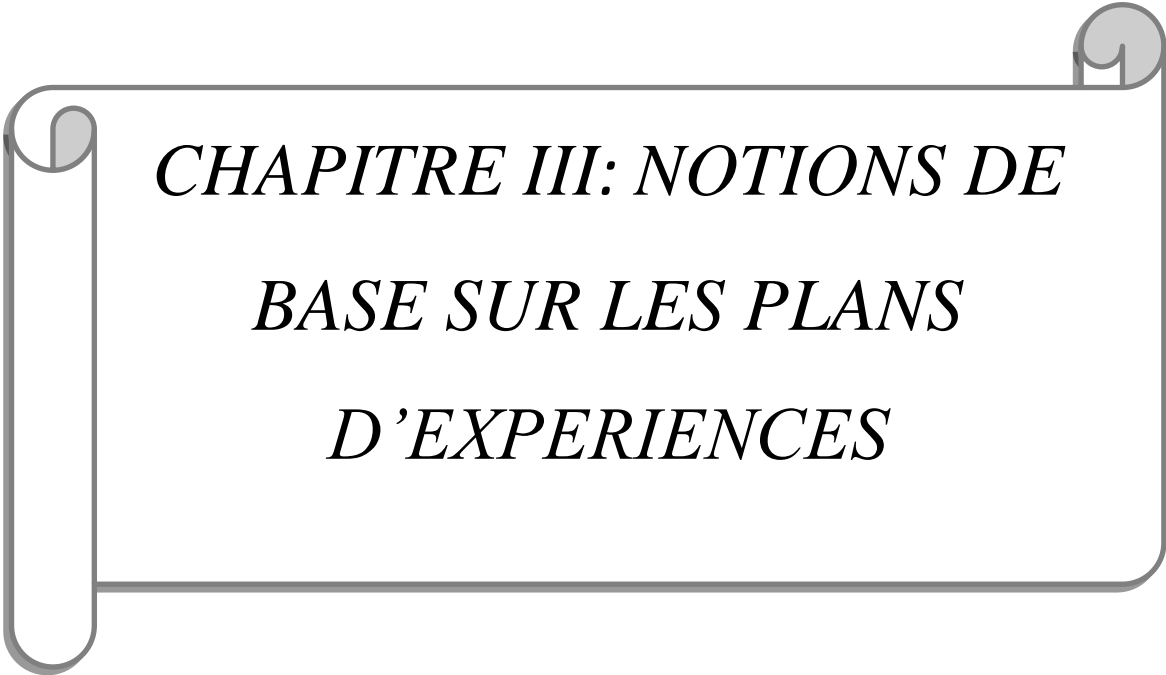
Cependant, il est important de noter que les propriétés mécaniques des palmiers de la Californie peuvent varier considérablement en fonction de l'âge de l'arbre, des conditions de culture, de la qualité de la fibre et d'autres facteurs.

b) Terminologie

- Stipe : la tige droite et non ramifiée du palmier, qui peut atteindre plus d'un mètre de diamètre à la base.
- Frondes : les grandes feuilles en forme d'éventail ou de plume du palmier, qui sont attachées à la couronne du stipe.
- Pétiole : la partie de la feuille qui relie la fronde au stipe.
- Rachis : la partie centrale de la fronde d'un palmier, qui relie les segments de la feuille entre eux.
- Limbe : la partie large et plate de la fronde, qui est divisée en segments plus petits.
- Filaments : des fibres longues et minces qui se développent à partir de la base du pétiole et de la partie inférieure de la fronde.



Figure II.4 : Photo du palmier de la Californie.



*CHAPITRE III: NOTIONS DE
BASE SUR LES PLANS
D'EXPERIENCES*

III.1. Introduction

Le plan d'expériences est une technique statistique introduite par Ronald Fisher en Angleterre au début des années 1920 dans le cadre de recherches agronomiques pour étudier l'effet des variables comme la quantité de pluie, d'eau, de rayons solaires, etc. nécessaires pour produire de bonnes récoltes.

Les plans d'expériences peuvent être considérés comme des techniques d'optimisation des processus qui possèdent des entrées contrôlables et des sorties mesurables. Ces plans sont utilisés aussi bien dans les scénarios de production que de conception. [12]

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées. [13]

Au début des années 1920, Ronald Fisher a introduit une technique statistique appelée le plan d'expériences. Cette méthode a été développée dans le cadre de recherches agronomiques pour étudier l'impact de variables telles que la quantité de pluie, d'eau et de rayons solaires sur les rendements des cultures. Les plans d'expériences sont des techniques d'optimisation des processus qui permettent de contrôler les variables d'entrée et de mesurer les résultats. Ces plans sont utilisés dans les scénarios de production et de conception. La méthode des plans d'expériences est basée sur deux concepts fondamentaux : l'espace expérimental et la modélisation mathématique des variables étudiées. [12]

III.2. Notions de base

L'expression « plan d'expériences » contient deux notions :

- La notion de « plan »,
- La notion d'« expériences ».
 - a) **Notion de « plan »** Ce terme renvoie aux mots planification, organisation et exploitation :
 - Planification : action de diriger suivant un plan déterminé ;
 - Organisation : action de préparer en vue d'un but précis ;
 - Exploitation : action de tirer profit d'une chose (ici des expériences).

b) Notion d'« expériences »

Modification volontaire des paramètres d'un système pour en observer ou en mesurer les effets. [14]

III.3. Plans d'expériences

III.3.1 Définition

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt (réponse) et des variables (facteur).

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

Les plans d'expériences sont une méthode qui permet d'optimiser les essais menés dans le cadre de la recherche scientifique ou des études industrielles. Ils peuvent être appliqués à une grande variété de disciplines et d'industries, dès lors qu'il est nécessaire d'analyser la relation entre une grandeur d'intérêt (la réponse) et des variables (les facteurs). Cette approche permet d'obtenir le maximum d'informations avec le minimum d'expériences en suivant des règles mathématiques et une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à toutes les situations auxquelles un expérimentateur peut être confronté.

III.3.2 But d'un plan d'expérience

Dans le but d'optimiser le nombre des essais, et par suite le temps et le coût de réalisation des essais, nous avons utilisé une approche statistique pratique et informatisée dite « plans d'expériences ». L'utilisation de cet outil demande une connaissance préalable de son principe et de son mode de fonctionnement. Pour cela et avant d'entamer la procédure expérimentale [15]. Un plan d'expériences permet de connaître le comportement d'un système, c'est-à-dire de :

- Connaître les facteurs qui ont le plus grand impact sur les résultats (sur la conformité d'un produit). [14]

- Dans l'objectif d'optimiser le nombre d'essais, le temps et les coûts de réalisation, nous avons opté pour une approche statistique pratique et informatisée appelée « plans d'expériences ». L'utilisation de cet outil requiert une compréhension préalable de son principe et de son fonctionnement, avant de débiter la procédure expérimentale [15]. Les plans d'expériences permettent d'analyser le comportement d'un système, en identifiant les facteurs ayant le plus grand impact sur les résultats, tels que la conformité d'un produit ([14]).

III.3.3 Définir les sorties (Réponses)

La réponse Y (variable de sortie) correspond à un paramètre de sortie du système étudié. Une réponse doit être représentative, quantifiable et la moins dispersée possible pour des variables d'entrées maîtrisées et constantes. Pour appliquer la méthodologie des plans d'expériences, il est conseillé d'avoir une réponse exprimée sous forme quantitative. En effet, les méthodes d'analyses des résultats d'essais telles que l'analyse de variance ou l'analyse de régression au sens des moindres carrés, s'appuient sur des données exclusivement quantitatives. Par ailleurs, les réponses qualitatives comme par exemple la morphologie d'un dépôt (lisse, poreux...etc.) qui n'est pas un critère quantitatif, pourront s'interpréter à partir d'un codage spécifique des modalités des réponses.[16]

La variable de sortie Y représente un paramètre du système étudié, qui doit être représentatif, quantifiable et avoir la plus faible dispersion possible pour des variables d'entrée constantes et maîtrisées. Pour appliquer la méthodologie des plans d'expériences, il est recommandé d'exprimer la réponse sous forme quantitative. En effet, les méthodes d'analyse des résultats d'essais telles que l'analyse de variance ou l'analyse de régression au sens des moindres carrés s'appuient sur des données exclusivement quantitatives. Toutefois, les réponses qualitatives, telles que la morphologie d'un dépôt (lisse, poreux, etc.) qui ne peut être mesurée quantitativement, peuvent être interprétées à partir d'un codage spécifique des modalités des réponses [16].

III.3.4 Définir les entrées (facteurs)

Un paramètre d'entrée d'un système (variable d'entrée) est appelé facteur X. Ce facteur est une cause possible de variation de la réponse Y. Le choix d'un facteur se fait souvent en plusieurs phases : une phase de recensement faisant appel à la créativité du groupe, une phase de classement et une phase de sélection où les modalités des facteurs devant être étudiés de façon prioritaire seront définies. [16]

Un paramètre d'entrée d'un système, également appelé variable d'entrée, est désigné comme facteur X. Ce facteur peut être une cause potentielle de variation de la réponse Y. Le choix des facteurs est généralement réalisé en plusieurs étapes : une phase de recensement qui sollicite la créativité du groupe, une phase de classement, ainsi qu'une phase de sélection où les modalités des facteurs à étudier en priorité sont définies [16].

III.4. Choix de la méthode d'expérimentation

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum. [17]

La méthode d'expérimentation sélectionnée doit faciliter l'interprétation des résultats et minimiser le nombre d'essais, tout en garantissant la qualité des résultats obtenus. La théorie des plans d'expériences permet de trouver les conditions optimales pour obtenir la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. Cette approche permet d'obtenir le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences, ce qui se traduit par un coût minimal [17].

III.5. Comment l'utiliser ?

Étapes :

- Identifier la façon dont la qualité du " produit " à mettre au point peut se mesurer ;
- Choisir l'indicateur le plus pertinent pour analyser la réponse pendant l'expérimentation ;
- Identifier les différents paramètres qui influencent le résultat. Ils s'appellent couramment les facteurs ;
- Définir le nombre de valeurs à étudier pour chaque facteur ;
- En déduire le type de plans à réaliser (il dépend du nombre de facteurs, du nombre de valeurs) ;
- Effectuer les essais en respectant les variations de facteurs et de niveaux mentionnées dans le plan ;
- Analyser et interpréter les résultats (l'analyse de variance et le calcul de régression linéaire sont réalisables avec des logiciels spécifiques) ;
- Modéliser la réponse en fonction de tous les paramètres ;

- Valider la modélisation par des expériences aléatoires de vérification ;
- Ajuster les facteurs pour optimiser la réponse en fonction de la modélisation retenue. [18]

III.6. Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la **réponse**, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot **facteur**. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure 1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée **niveau**. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas, la borne supérieure est le niveau haut. [13]

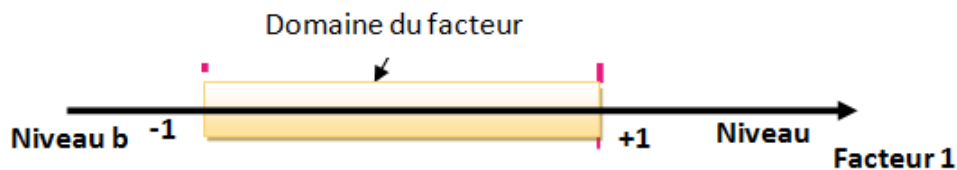


Figure III.1 : Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1.

Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le **domaine** du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé **l'espace expérimental** (Figure III.2).

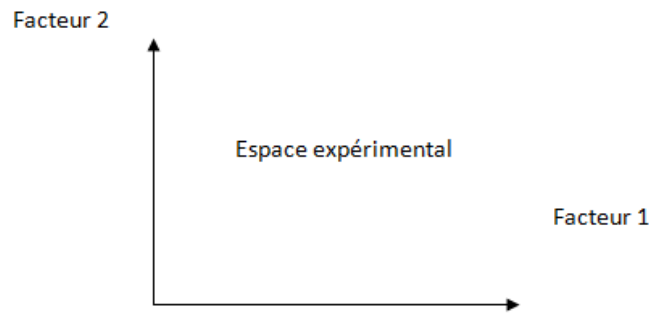


Figure III.2 : Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure II.3). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

Le regroupement des domaines des facteurs définit le «**domaine d'étude**». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure II.4).

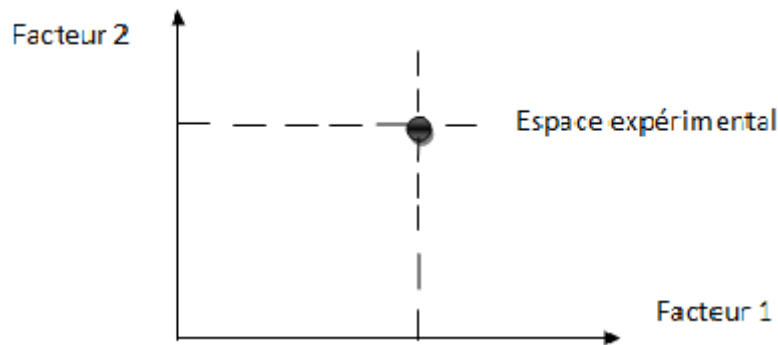


Figure III.3 : Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux.

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

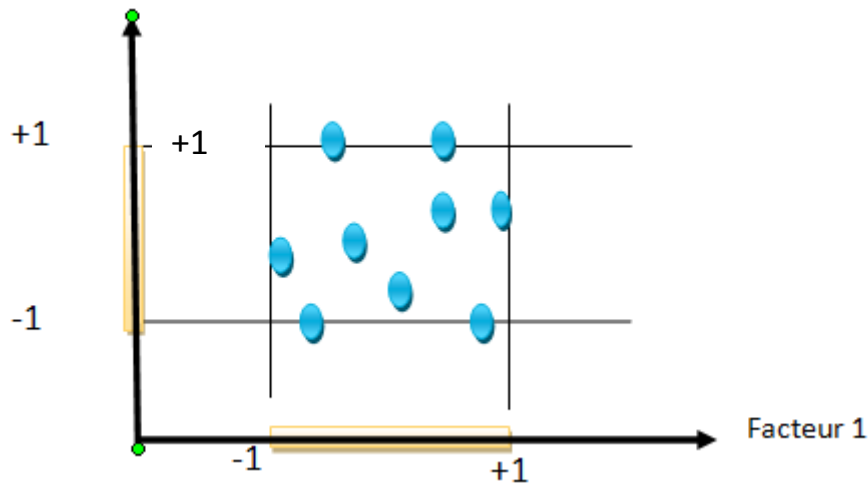


Figure III.4 : Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes comme par exemple des personnes : Julien, Arthur, Louis, Simon et Nathan. On peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues. Il y a également les grandeurs ordonnables comme par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers.

III.7. Notion de surface de réponse

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure III.5).

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental, tandis qu' y correspond à la valeur de la réponse en ce point. Pour représenter la réponse, on définit un axe orthogonal à l'espace expérimental. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse

nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Par exemple, un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse et deux dimensions pour les facteurs. Chaque point de l'espace expérimental correspond à une réponse, et l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond à un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (voir Figure III.5).

Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences. Elle vient pour enrichir les méthodes des plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires. [18]

Le choix du nombre et de l'emplacement des points d'expériences constitue le problème fondamental des plans d'expériences. L'objectif est d'obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse, tout en limitant le nombre d'essais nécessaires. L'approche D-optimal est une méthode qui améliore considérablement les plans factoriels complets et fractionnaires, en enrichissant les méthodes des plans d'expériences [18].

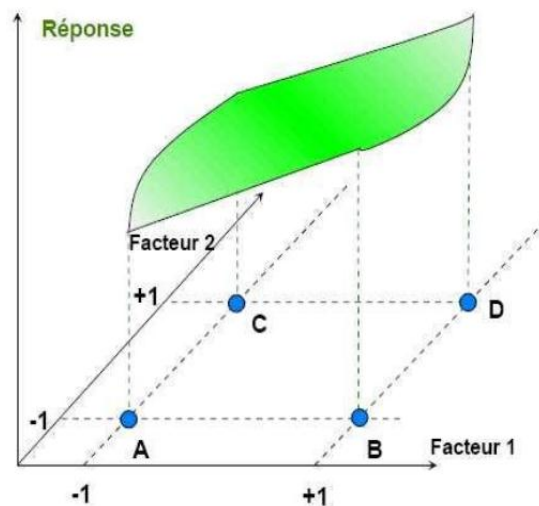


Figure III.5 : Représentation graphique d'une surface de réponses.

III.8. Différents types des plans d'expériences

III.8.1. Plan factoriel complet

La réalisation d'un PE peut être très simple ou très compliquée suivant le nombre des facteurs étudiés et les hypothèses formulées. L'étude d'un plan complet consiste à étudier toutes les combinaisons possibles des facteurs pris en considération dans l'expérience. On note ce plan X^k , ce qui signifie que cette expérimentation concerne un système comportant k facteurs à X niveaux. Le principal inconvénient d'une telle méthode réside dans le nombre d'expériences nécessaires, vite dissuasif lorsque k devient important. Pour étudier une réponse y en fonction de k facteurs, les expériences correspondant à toutes les combinaisons possibles des facteurs sont réalisées.

Par exemple, pour deux facteurs à deux niveaux, le nombre de combinaisons possibles entraîne $2^2 = 4$ configurations (Tableau II.1). Dans le cas d'un plan comportant des facteurs ayant des niveaux différents, le calcul du nombre d'expériences du plan complet est effectué de manière similaire. Par exemple, pour un plan complet de 3 facteurs à 2 niveaux et 4 facteurs à 2 niveaux, $2^3 \times 2^4 = 128$ expériences sont nécessaires. [19]

Tableau III.1. Plan factoriel complet 2^2 pour deux facteurs (A, B) à deux niveaux.

N° essai	Facteurs		Réponse
	Facteur A	Facteur B	
1	-1(niveau bas)	-1	Y_1
2	+1(niveau haut)	-1	Y_2
3	-1	+1	Y_3
4	+1	+1	Y_4

III.8.2. Plans factoriels fractionnaires

Le principal inconvénient des plans factoriels complets est le nombre excessif d'essais à réaliser lorsque le nombre de facteurs devient important. La question est alors de savoir s'il

est possible d'estimer les coefficients du modèle avec une précision acceptable sans pour autant réaliser tous les essais du plan factoriel. Les travaux de Box et Hunter [20] d'une part et Taguchi [17] d'autre part ont débouché sur les plans fractionnaires présentés sous forme de tables standards en fonction des éléments que l'on souhaite prendre en compte dans l'expérimentation et qui concernent les facteurs, les valeurs (ou niveaux) de ces facteurs, et les interactions entre facteurs [17]. L'hypothèse faite dans l'élaboration de plans fractionnaires est que certaines interactions sont insignifiantes et qu'elles peuvent donc être confondues avec des facteurs dont l'influence est significative. L'inconvénient majeur des plans fractionnaires est qu'ils occasionnent par conséquent des risques potentiels d'erreurs. Les avantages de ces plans résident dans le fait qu'ils sont beaucoup plus économiques, plus rapides et demandent moins d'essais. [16]

Le principal inconvénient des plans factoriels complets est le nombre excessif d'essais requis lorsque le nombre de facteurs à étudier devient important. Ainsi, il est nécessaire de déterminer s'il est possible d'estimer les coefficients du modèle avec une précision acceptable sans réaliser tous les essais prévus dans le plan factoriel. Les travaux de Box et Hunter (1978) d'une part, et Taguchi (1987) d'autre part, ont donné lieu au développement de plans fractionnaires présentés sous forme de tables standards comprenant les facteurs, leurs niveaux et les interactions entre facteurs. L'hypothèse sous-jacente à l'utilisation de plans fractionnaires est que certaines interactions sont insignifiantes et peuvent donc être confondues avec des facteurs dont l'influence est significative. Le principal inconvénient de ces plans est le risque potentiel d'erreurs qu'ils impliquent. Toutefois, leurs avantages résident dans leur économie, leur rapidité et leur nécessité d'un nombre réduit d'essais [20].

III.8.3. Plans pour surfaces de réponses

Les plans examinés précédemment n'avaient que deux niveaux d'étude par facteur et les modèles mathématiques utilisés étaient du premier degré (avec ou sans interactions) par rapport à chaque facteur. Ces plans sont les plus employés car ils permettent le criblage des facteurs et conduisent parfois à des modélisations simples mais suffisantes. Pourtant, il existe de nombreux cas où il est nécessaire d'avoir une bonne modélisation des phénomènes étudiés et où il faut passer à des modèles mathématiques du second degré. On fait alors appel aux plans pour surfaces de réponse. Ces plans utilisent des modèles polynomiaux du second degré. Nous étudierons les trois plus importants plans de ce type : **les plans composites, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehlert.** [17]

Le modèle mathématique postulé utilisé avec les plans pour surfaces de réponse est un modèle du second degré avec interactions d'ordre 2 :

Les plans d'expériences précédemment présentés utilisaient seulement deux niveaux d'étude par facteur et des modèles mathématiques de premier degré (avec ou sans interactions) pour chaque facteur. Ces plans sont couramment utilisés car ils permettent de cribler les facteurs et conduisent parfois à des modélisations simples mais suffisantes. Toutefois, dans de nombreux cas, une modélisation plus approfondie des phénomènes étudiés est nécessaire, ce qui nécessite l'utilisation de modèles mathématiques de second degré. Les plans pour surfaces de réponse sont utilisés dans ces situations et utilisent des modèles polynomiaux de second degré. Les trois plans les plus couramment utilisés pour les surfaces de réponse sont les plans composites, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehlert [17].

Le modèle mathématique utilisé avec les plans pour surfaces de réponse est un modèle de second degré avec des interactions d'ordre 2 :

Pour deux facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + e \quad (\text{III.1})$$

Pour trois facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + e \quad (\text{III.2})$$

III.8.4. Plans de Taguchi

Un plan de Taguchi est un plan d'expériences qui vous permet de choisir un produit ou un procédé qui fonctionne de manière plus cohérente dans son environnement d'exploitation. Les plans de Taguchi partent du principe que les facteurs à l'origine de la variabilité ne peuvent pas tous être contrôlés. Ces facteurs incontrôlables sont appelés facteurs de bruit. Les plans de Taguchi essaient d'identifier les facteurs contrôlables (facteurs de contrôle) qui minimisent l'effet des facteurs de bruit. Pendant l'expérimentation, vous manipulez les facteurs de bruit de manière à imposer une variabilité, puis vous déterminez les paramètres de facteurs de contrôle optimaux qui rendent le procédé ou le produit plus robuste ou plus résistant face à la variation provoquée par les facteurs de bruit. Un procédé conçu dans cette optique produira des

résultats plus cohérents. Un produit conçu dans cette optique aura des performances plus cohérentes, quel que soit l'environnement dans lequel il sera utilisé.

Les plans de Taguchi utilisent des répertoires orthogonaux, qui évaluent les effets des facteurs sur la moyenne et sur la variation de la réponse. Avec un répertoire orthogonal, le plan est équilibré de telle sorte que les niveaux de facteurs sont également pondérés. Ainsi, chaque facteur peut être évalué indépendamment de tous les autres et l'effet d'un facteur n'influence pas l'estimation d'un autre facteur. Cela peut réduire la durée et le coût de l'expérience en cas d'utilisation des plans fractionnés.

Vous pouvez également ajouter un facteur de signal au plan de Taguchi, afin de créer une expérience à réponse dynamique. Une expérience à réponse dynamique vise à améliorer la relation fonctionnelle entre un signal et une réponse de sortie. [21]

Un plan de Taguchi est un plan d'expériences qui permet de choisir un produit ou un procédé fonctionnant de manière plus cohérente dans son environnement opérationnel. Les plans de Taguchi supposent que tous les facteurs à l'origine de la variabilité ne peuvent pas être contrôlés, et que certains d'entre eux, appelés facteurs de bruit, sont incontrôlables. Les plans de Taguchi cherchent à identifier les facteurs de contrôle qui minimisent l'effet des facteurs de bruit. Pendant l'expérimentation, les facteurs de bruit sont manipulés pour imposer une variabilité, puis les paramètres de facteurs de contrôle optimaux sont déterminés pour rendre le processus ou le produit plus robuste ou plus résistant à la variation causée par les facteurs de bruit. En utilisant cette approche, un processus conçu sera plus cohérent, tandis qu'un produit conçu aura des performances plus cohérentes quel que soit l'environnement dans lequel il sera utilisé.

Les plans de Taguchi utilisent des tableaux orthogonaux pour évaluer les effets des facteurs sur la moyenne et sur la variation de la réponse. Les tableaux orthogonaux sont équilibrés de telle sorte que les niveaux de facteurs sont pondérés de manière égale. Ainsi, chaque facteur peut être évalué indépendamment des autres, et l'effet d'un facteur n'influence pas l'estimation d'un autre facteur. Cette approche peut réduire la durée et le coût de l'expérience, notamment en utilisant des plans fractionnés.

Il est également possible d'ajouter un facteur de signal aux plans de Taguchi pour créer une expérience à réponse dynamique. Ces expériences visent à améliorer la relation fonctionnelle entre un signal et une réponse de sortie.

En résumé, les plans de Taguchi permettent de concevoir des produits ou des processus plus robustes et plus résistants à la variabilité causée par les facteurs de bruit en identifiant les facteurs de contrôle optimaux. Les tableaux orthogonaux utilisés dans ces plans permettent une évaluation indépendante des effets des différents facteurs, réduisant ainsi la durée et le coût de l'expérience.

III.9. Conclusion

Les plans d'expériences sont une méthode d'expérimentation efficace pour la mise au point de produits, services ou procédés industriels. Cette approche consiste à faire varier simultanément tous les paramètres plutôt que de ne faire varier qu'un seul paramètre à la fois, permettant ainsi de gagner du temps et de réduire les coûts financiers, tout en obtenant des informations précises sur les effets des différents paramètres étudiés. Les plans d'expériences peuvent également être utilisés pour la modélisation mathématique de phénomènes complexes, en utilisant des plans pour surfaces de réponse et des modèles mathématiques de second degré. Enfin, les plans de Taguchi sont une méthode spécifique de plan d'expériences qui permettent d'identifier les facteurs de contrôle optimaux pour minimiser l'effet des facteurs de bruit et rendre un produit ou un processus plus robuste et plus résistant à la variabilité. Dans l'ensemble, les plans d'expériences sont une méthode puissante pour l'optimisation de produits et de processus, permettant d'obtenir des résultats de haute qualité tout en économisant du temps et des ressources.



CHAPITRE IV :
CARACTERISATION
EXPERIMENTALE DU SOL

IV.1.Introduction

Lors de la conception et de l'exécution de projets de construction, il est essentiel de comprendre les propriétés et le comportement du sol sur lequel repose toute l'infrastructure. La caractérisation expérimentale du sol d'étude joue un rôle fondamental dans cette compréhension.

La caractérisation expérimentale du sol consiste à réaliser des tests et des analyses sur des échantillons prélevés sur le site d'étude. Ces tests fournissent des données précieuses sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du sol, qui sont ensuite utilisées pour évaluer sa capacité portante, sa stabilité, sa perméabilité et d'autres aspects importants.

Les différentes étapes de la caractérisation expérimentale du sol comprennent la collecte d'échantillons représentatifs, l'identification visuelle du sol, l'analyse granulométrique pour déterminer la distribution des tailles des particules, les tests de limite d'Atterberg pour évaluer la plasticité du sol, les mesures de densité et de teneur en eau, les tests de cisaillement pour évaluer la résistance du sol au cisaillement, les tests de perméabilité pour évaluer la capacité du sol à permettre le passage de l'eau, et d'autres tests spécifiques en fonction des besoins du projet.

Les résultats de la caractérisation expérimentale du sol permettent de mieux comprendre le comportement du sol et de prendre des décisions éclairées lors de la conception des fondations, des structures de soutènement, des remblais, des routes et d'autres infrastructures. Ils aident également à évaluer les risques géotechniques potentiels et à mettre en place des mesures d'atténuation appropriées.

IV.2. Matériaux utilisés

Le sol argileux utilisé dans cette étude vient de la zone de Hdjer mengoub (voir figure IV.1), daïra de Guelaât Bou Sbaâ (Guelma), Algérie. Les prélèvements d'échantillons effectués par une pelle à main et ce dans le but d'obtenir une éventuelle homogénéité des sols à étudier. Le prélèvement a été effectué sur une profondeur de 1 m environ. Après l'extraction, le sol a été placé dans des sachets en plastique et transporté au laboratoire pour préparation et exécution des essais géotechniques d'identification et de caractérisation.

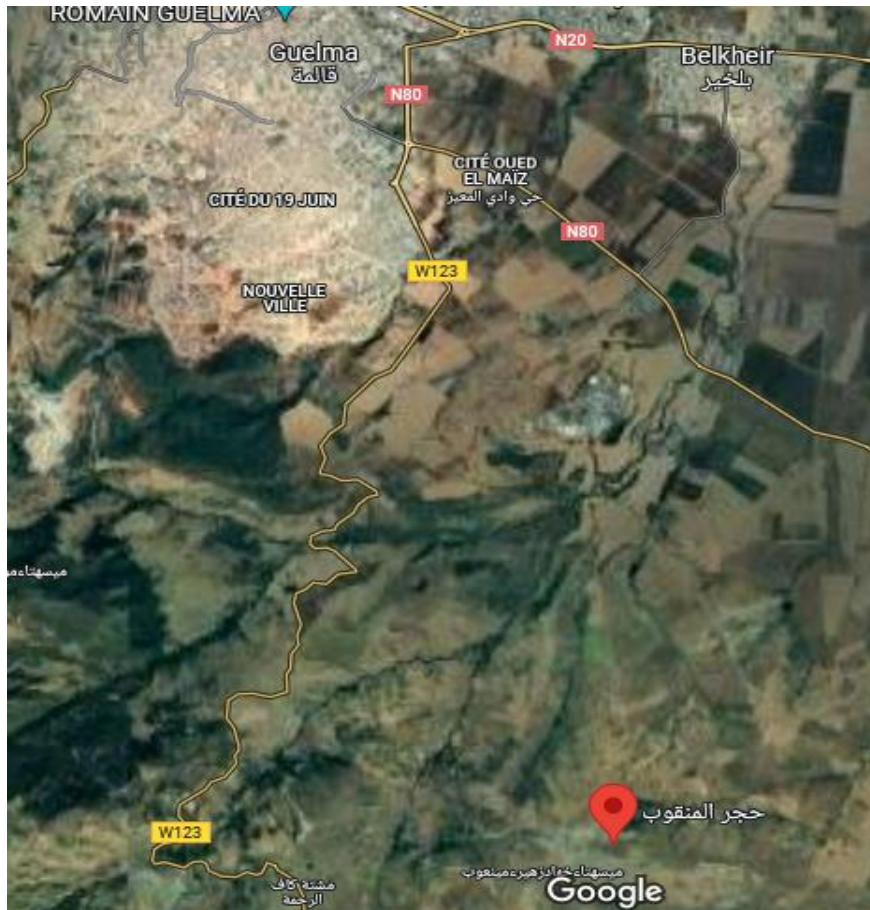


Figure IV.1 : Localisation du lieu de prélèvement de l'échantillon de Hdjer Mengoub (Guelma).

IV.3. Programme des essais

IV.3.1 Teneur en eau w (NF P 94-050)

C'est le quotient de la masse de l'eau interstitielle par la masse des grains solide. La teneur en eau naturelle d'un sol est celle déterminée lorsque les conditions de prélèvement en place, de transport et de conservation de l'échantillon entraînent aucune modification de cette teneur en eau.

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} 100 = \frac{M_w}{M_s} 100 \quad (\text{IV.1})$$

- a) **But d'essai** : Détermination de la quantité d'eau contenue dans un sol.
- b) **Principe d'essai** : L'échantillon de matériau humide est pesé, puis placé dans une étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (masse du matériau sec).

IV.3.2 Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) et sédimentométrie

(NF P 94-057) :

▪ **Analyse granulométrique (NF P 94-056)**

L'analyse granulométrique est l'opération qui consiste à étudier la distribution des différentes particules d'un granulat en fonction de ses propriétés (poids, taille, etc.).

a) **But d'essai** : Le but de l'essai est de déterminer la distribution granulométrique des éléments de sol étudiés en poids. Il est obtenu par deux opérations consécutives et complémentaires.

b) **Principe d'essai**

Le test consiste à utiliser une série de tamis pour trier les différents grains qui composent l'échantillon, emboîtés les uns dans les autres, dont les ouvertures diminuent de taille de haut en bas.

Le matériau à étudier est placé sur la partie supérieure du tamis, et la classification des particules est obtenue par la vibration de la colonne du tamis.

c) **Mode opératoire**

- Prélever 1.5 kg de matériau sec ;
- Imbiber cette quantité dans l'eau pendant 24 h ;
- Laver le sol dans tamis 0.08 mm Le passant utilisé pour la sédimentation et le refus utilisé pour analyse granulométrique ;
- Sécher le refus dans l'étuve 24 h ;
- Verser le matériau sur la colonne et la fixer soigneusement sur la tamiseuse ;
- Agiter pendant cinq minutes ;
- Peser chacun des tamis et porter les résultats sur la feuille de calcul.

Les résultats sont tracés sur un repère semi logarithmique, la courbe obtenue est appelée courbe granulométrique.



Figure IV.2 : Analyse granulométrique.

▪ **Analyse Sédimentométrique (NF P 94-057)**

L'analyse sédimentométrique, selon la norme NF P 94-057, est un test qui complète l'analyse granulométrique en se concentrant sur les composants minces du sol, d'un diamètre inférieur à 0,08 mm. Lors de ce test, des particules de différentes tailles se déposent à des vitesses différentes dans un milieu liquide stationnaire, et la relation entre le diamètre des particules et la vitesse de sédimentation est régie par la loi de Stokes. Étant donné que cette relation est déjà établie pour les particules sphériques, son application au sol ne fournit que les "diamètres équivalents". Ainsi, l'analyse sédimentométrique permet d'obtenir des informations supplémentaires sur les fractions fines du sol et leur comportement de sédimentation.

a) **But d'essai**

La méthode sédimentométrique, conforme à la norme NF P 94-057, complète l'analyse granulométrique en se focalisant sur les particules fines du sol, dont le diamètre est inférieur à 0,08 mm. Au cours de ce test, les particules de différentes tailles se déposent à des vitesses distinctes dans un liquide immobile, conformément à la loi de Stokes qui régit la relation entre le diamètre des particules et leur vitesse de sédimentation. Étant donné que cette relation est déjà établie pour les particules sphériques, son application au sol permet uniquement d'obtenir les "diamètres équivalents". Ainsi, l'analyse sédimentométrique fournit des informations supplémentaires sur les fractions fines du sol et leur comportement de sédimentation.

b) **Principe d'essai**

Lorsque des grains de différentes tailles sont placés dans un liquide immobile, ils se déposent à des vitesses différentes. La sédimentométrie repose sur la loi de Stokes, qui établit la relation entre la vitesse limite de sédimentation (V) et le diamètre (D) d'une particule solide

sphérique. En appliquant cette loi à des grains de formes variées, on obtient uniquement les diamètres équivalents. Cette loi peut être exprimée par...

$$V = \frac{D^2(\gamma_s - \gamma_w)}{18\eta} \quad (\text{IV.2})$$

V: Vitesse limite de chute des grains (m/s).

D: Diamètre de la particule en (m).

γ_s : Poids volumique des grains solides en KN/m³ (valeur moyenne 26,5KN/m³).

γ_w : Poids volumique de l'eau: 10KN/m³.

η : Viscosité dynamique de la solution en Pa.s.

c) Appareillage

- Appareillage spécifique

- Un densimètre gradué de 0.995 à 1.030g/cm³.
- Deux éprouvettes de 1 litre de contenance, de 85mm de diamètre et de 450mm de hauteur de graduation.
- Un agitateur mécanique dont la vitesse de rotation varie de 0 à 10000tr / min.
- Un défloculant : hexametaphosphate de sodium.
- Un agitateur manuel pour homogénéisation de la suspension avant essai.

- Appareillage courant

- Un thermomètre gradué de 0 à 50°C ;
- Un chronomètre ;
- Eau déminéralisée (distillé) ;
- Une balance ; précise au décigramme ;
- Un tamis de 0,08mm ;
- Un mortier avec pilon en caoutchouc ;

- Une étuve de dessiccation avec thermostat 105 °C.

IV.3.3 Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau caractéristiques des sols fins permettant entre autre d'établir leur classification et d'évaluer leur consistance. Ces valeurs de teneurs en eau permettent de caractériser également les différents états des sols : liquide, plastique, solide et solide sans retrait de ces matériaux. L'essai doit être réalisé sur la fraction 0-400 µm

IV.3.3.1 Limite de liquidité WL

Il existe deux méthode pour définir la teneur en eau que répandant :

- L'essai au cône de pénétration
- Méthode de la coupelle de Casagrande

IV.3.3.1.1 L'essai au cône de pénétration (NF P94-052-1)

Basée sur la relation entre la teneur en eau et la pénétration d'un cône dans un échantillon de sol, la méthode d'essai du pénétromètre à cône (figure 3.8) pour la limite de liquidité fournit une valeur immédiate de la pénétration. La limite de liquidité est déduite pour une pénétration de 17 mm



Figure IV.3 : pénétromètre a cône manuel.

IV.3.3.1.2 Méthode de la coupelle de Casagrande (NF P94-051)

Teneur en eau pour laquelle une entaille est refermée sur 10mm après 25 coups



Figure IV.4 : méthode de Casagrande.

IV3.3.2 Limite de plasticité Wp

Teneur en eau correspondant à une limite arbitraire entre les états plastique et solide avec retrait de la consistance d'un sol. En formant un cylindre de 3mm de diamètre se brisant en tronçons de 10 à 20 mm.



Figure IV.5 : Limite de plasticité Wp par la méthode au rouleau.

Former une boulette à partir à la pâte préparée, rouler la boulette sur une plaque lisse à la main de façon à obtenir un rouleau de 3mm de diamètre et de 10 cm de longueur et ne doit pas être creux. La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3 mm. Si aucune fissure n'apparait, le rouleau est réintégré à la boulette. La pâte est malaxée tout en étant séchée légèrement, éventuellement sous un flux d'air chaud à une température inférieure à 50 °C.

Indice de plasticité I_p

$$I_p = W_L - W_p \quad (\text{IV.3})$$

Activité A_c

$$A_c = \frac{I_p}{\text{teneur en eau}} \quad (\text{IV.4})$$

IV.3.4 Essai au bleu de méthylène (NF EN 933-9)

L'essai au bleu de méthylène, conforme à la norme NF EN 933-9, est une méthode utilisée pour évaluer la porosité d'un matériau granulaire. Il permet de déterminer la proportion d'espaces vides (ou pores) à l'intérieur des particules du matériau.

L'essai consiste à immerger un échantillon du matériau dans une solution de bleu de méthylène. Le bleu de méthylène pénètre dans les pores du matériau, colorant ainsi les surfaces internes des particules. Après un certain temps d'immersion, l'échantillon est retiré de la solution et rincé pour éliminer l'excès de colorant de la surface externe. Ensuite, l'échantillon est séché et pesé.

La teneur en bleu de méthylène est calculée en comparant la masse initiale de l'échantillon à sa masse après séchage. Cette différence de masse représente la quantité de bleu de méthylène qui a pénétré dans les pores du matériau. La teneur en bleu de méthylène est généralement exprimée en pourcentage de la masse initiale de l'échantillon.

L'essai au bleu de méthylène est couramment utilisé dans le domaine de la géotechnique pour caractériser la porosité des sols et des matériaux granulaires. Il fournit des informations sur la perméabilité, la capacité de rétention d'eau et la compacité du matériau. Cette caractérisation est essentielle pour évaluer le comportement hydrique et mécanique du matériau dans diverses applications d'ingénierie, telles que la conception de fondations, de remblais et de structures de drainage.



Figure IV.6 : appareil essai au bleu de méthylène.

IV.3.5 Essai Proctor (NF P 94-093)

La capacité portante d'un sol est la caractéristique qui définit sa capacité à supporter les charges qui lui sont imposées. Cela dépend de la nature du sol, du pourcentage d'eau et du degré de compactage.

Quel que soit le sol, sa résistance mécanique augmente avec sa densité sèche grâce à de multiples passages dans de la machinerie lourde pour assurer le compactage.

a) But d'essai

L'essai Proctor a pour but de déterminer, pour une intensité de compactage donnée, la teneur en eau du sol qu'il faut compacter pour obtenir une densité sèche maximale. La teneur en eau ainsi déterminée est appelée ; teneur en eau optimale.



Figure IV.7 : Essai Proctor.

b) Principe d'essai

Le principe de cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de la teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

c) Appareillage

- Un socle de compactage constitué d'un bloc de béton présentant une surface plane horizontale d'au moins 30 cm x 30 cm et une épaisseur d'au moins 30 cm ;
- Le moule Proctor normal constitués d'un corps de moule, d'une embase et d'une rehausse. Le corps de moule peut être monobloc ou fendu ;
- Une dame de compactage manuel «dame Proctor normal» constituée d'un mouton cylindrique de $51 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre. Ce mouton coulisse dans un fourreau qui lui autorise une hauteur de chute de $305 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. La masse de l'équipage mobile est de $2490 \pm 2,5 \text{ g}$;
- Une règle à araser constituée par une lame en acier

d) Mode opératoire

❖ Préparation du matériau

- Prendre 2.5 kg du matériau ;
- Humidifier soigneusement le matériau ainsi préparé à la teneur en eau désiré ;
- L'homogénéiser à la truelle, puis en le malaxant à la main ou dans un malaxeur.

❖ Exécution de l'essai

- Fixer la hausse sur le moule. Lubrifier l'intérieur du moule et celui de la hausse ;
- Mettre une quantité de matériaux dans le moule, suffisante pour qu'une fois compactée chacune des trois couches ait sensiblement la même épaisseur (la dernière couche devant avoir sa face supérieure au-dessus du niveau supérieur du moule, c'est-à-dire à l'intérieur de la hausse) ;
- Compacter chaque couche à l'aide de dame de compactage en 25 coups. S'arranger pour que le compactage soit uniforme ;
- Une fois les trois couches compactées, enlever la hausse avec beaucoup de soin afin d'éviter la rupture de l'échantillon ;
- Araser le moule à l'aide de la règle ;
- Nettoyer l'extérieur du moule à l'aide d'un pinceau ;
- Peser le moule : on obtient le poids total humide ;
- Enlèvement la base du moule ;
- Prélever deux échantillon à la partie supérieure et à la partie inférieure du moule, et effectuer les mesure de la teneur en eau (passage à l'étuve à 105° pendant 24 heures) ;
- Démontez le moule, et enlever le matériau humide, et malaxer une quantité de matériau et rajouter de l'eau pour obtenir une teneur en eau supérieure (+2). Effectuer un autre essai ;
- Arrêter l'essai quand on obtient par deux fois consécutives une diminution du poids total humide par rapport à l'essai précédent.

IV.3.6 Essai C.B.R (NF P 94 078)

L'essai CBR est utilisé pour évaluer la capacité portante des remblais et des couches de forme compactées dans les ouvrages routiers. Son objectif est de déterminer expérimentalement des indices portants tels que l'Indice Portant Immédiat (IPI) et le CBR (California Bearing Ratio). Ces indices ont plusieurs applications :

- Classification des sols : Ils permettent d'établir une classification des sols conformément au Guide Technique des Remblais (GTR).
- Évaluation de la traficabilité des engins de terrassement : Les indices portants donnent des indications sur la capacité des sols à supporter le trafic des engins de terrassement.
- Détermination de l'épaisseur des chaussées : En fonction de la valeur du CBR, il est possible d'ajuster l'épaisseur des chaussées. Plus le CBR est élevé, moins l'épaisseur requise sera importante.
- En résumé, l'essai CBR est un outil essentiel dans la conception et la construction des ouvrages routiers. Il permet de prendre des décisions éclairées quant à la classification des sols, la traficabilité des engins et l'épaisseur nécessaire des chaussées.

$$CBR = \frac{P}{P_s} \times 100 \quad (VI.5)$$

P = est la pression mesurée dans les sols du site [N / mm²]

P_s = est la pression pour atteindre la pénétration égale sur sol standard [N / mm²].



Figure IV.8 : matériel essai CBR.

On mesure 3 types d'indice en fonction des buts fixés :

- **L'indice portant immédiat (IPI) :** Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux (H=0) (pas de surcharge S).

- **L'indice C.B.R immédiat** : Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneur en eau.

- **L'indice C.B.R après immersion** : Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support(ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneur en eau et soumis à des variations de régime hydrique.

a) **Mode opératoire : (L'indice C.B.R immédiat) :**

- L'essai est réalisé sans immersion dans l'eau, où un poids annulaire est placé sur l'échantillon afin de simuler la surcharge appliquée sur le sol.

- L'ensemble comprenant la plaque de base, le moule CBR et l'éprouvette est positionné de manière centrale sur la presse, par rapport au piston.

La mise à zéro du dispositif dynamométrique et du comparateur est réglée pour mesurer l'enfoncement du poinçon.

- Il est important de noter les efforts de poinçonnement correspondant aux enfoncements de 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 4, 7, 10.5 et 12.5 unités.



Figure IV.9 : la machine d'essai CBR au niveau de laboratoire de l'université 8mai 1945.

IV.3.7 Compression simple non confinée (l'EN 12390-4)

Essai de compression simple non confinée a pour but de déterminer la résistance à la compression simple R_c qui est définie comme la contrainte mesurée à la rupture.

Les éprouvettes sont chargées jusqu'à la rupture dans une machine pour essai de compression conforme à l'EN 12390-4. La charge maximale F de la force atteinte est enregistrée qui permet de calculer la résistance en compression non confinée R_c du sol : $R_c = F/S$ avec S est la surface de la section de l'éprouvette



Figure IV.10 : Eprouvettes de l'essai de compression.

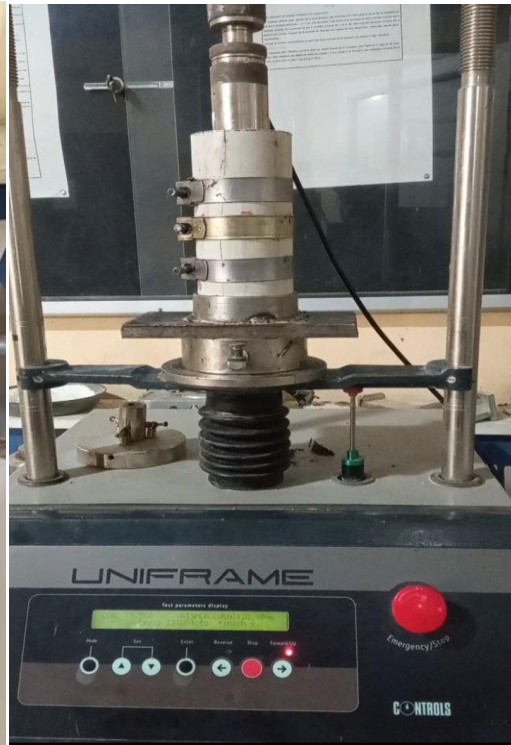


Figure IV.11 : Appareil de compression.

IV.3.8 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte (NF P 94 - 071-1)

L'essai a pour objet de mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol fin saturé soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante.

En vitesse lente et conditions drainées peuvent être déduites les valeurs de l'angle de frottement effectif f' et la cohésion effective c' , paramètres utilisés pour dimensionnement de fondations, les calculs de vérification des coefficients de sécurité à la rupture de talus et pour la détermination des actions de poussée et de butée sur les ouvrages de soutènement.

a) **But de l'essai**

La conception des différents ouvrages (talus, soutènement, fondations) est influencée par la résistance au cisaillement des terrains. Cette conception doit conduire à éviter les ruptures ou les déformations trop importantes lorsque les ouvrages sont soumis à des charges maximales.

Il est donc important de connaître la résistance ultime ou limite des terrains. L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer ces paramètres de résistance au cisaillement, l'angle de frottement interne ϕ et la cohésion C .

b) Principe de l'essai

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre.

L'essai consiste à appliquer une charge verticale constante N par l'intermédiaire d'un piston. Puis on tire horizontalement la demi-boîte inférieure par une vitesse constante jusqu'à la rupture complète de l'échantillon. La force totale de cisaillement T est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte supérieure. On mesure les déplacements horizontaux Δl et verticaux Δh .

L'échantillon subit donc un cisaillement direct et rectiligne suivant un plan imposé sur lequel on exerce une contrainte normale déterminée.

La détermination de τ et σ lors de la rupture permet de préciser un point de la courbe intrinsèque du sol étudié. En réalisant plusieurs essais avec différentes valeurs de contraintes verticales, on peut déterminer le critère de rupture de Mohr-Coulomb et définir ses valeurs de cohésion c et d'angle de frottement ϕ .

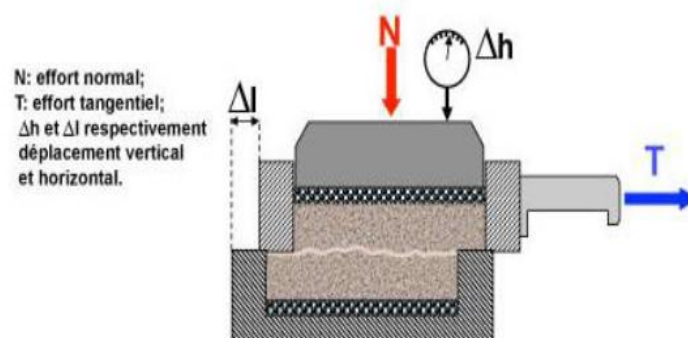


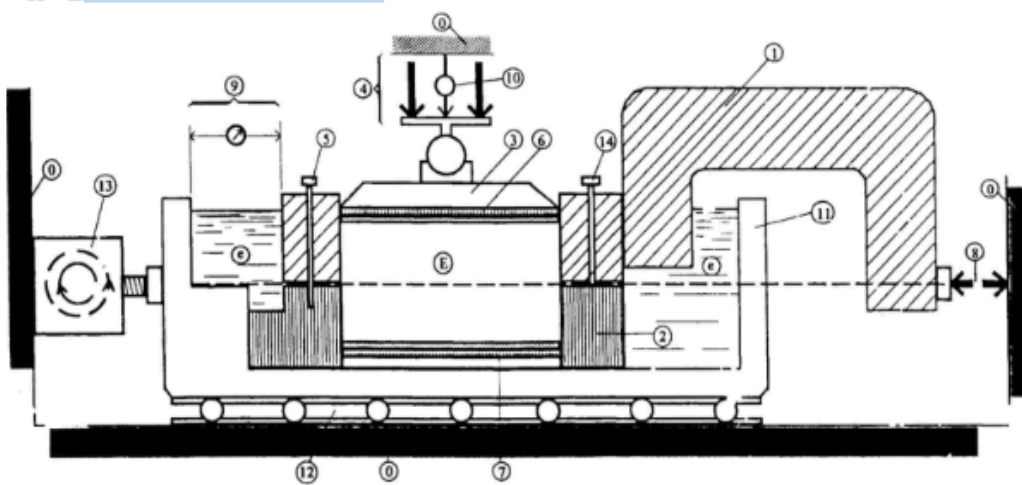
Figure IV.12 : Principe de l'essai de cisaillement direct.

c) Appareillage de l'essai

L'appareillage spécifique à l'essai comprend

- la boîte de cisaillement,

- le bâti,
- le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette,
- le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes,
- le système de mesurage des efforts, des déplacements et du temps,
- série de poids,
- balance précise au 1/100 g



- | | |
|--|---|
| 0 Bâti | 9 Dispositif de mesure du déplacement relatif horizontal δl |
| 1 Demi-boîte supérieure | 10 Dispositif de mesure du déplacement vertical δh |
| 2 Demi-boîte inférieure | 11 Châssis étanche |
| 3 Piston rigide | 12 Glissière sans frottement |
| 4 Dispositif d'application de l'effort vertical N centré sur le piston | 13 Système de déplacement à vitesse constante |
| 5 Solidarisation des demi-boîtes | 14 Vis de soulèvement de la demi-boîte |
| 6 Plaque drainante supérieure | e Eau déminéralisée |
| 7 Plaque drainante inférieure amovible | E Éprouvette de sol |
| 8 Dispositif de mesure de l'effort horizontal T | |

Figure IV.13 : Schéma de la boîte de cisaillement.

d) Préparation de l'échantillon

- Tailler le sol dans une trousse coupante ayant les mêmes dimensions intérieures que la boîte de cisaillement ;
- Poser la plaque drainant à sa place ;
- Mettre la pierre poreuse puis le papier filtre ;

- Intégrer l'échantillon dans la boîte de cisaillement ;
- Mettre la boîte à sa place dans l'appareil.

e) Exécution de l'essai

- L'essai de cisaillement s'effectue sur 3 éprouvettes du même échantillon de mêmes dimensions, préparées dans les mêmes conditions mais chaque éprouvette soumise à des contraintes normales différentes.

IV.3.9 Essai œdométrique (P94-090-1)

La compression peut être considérée comme unidimensionnelle lorsque la couche de sol est soumise à des contraintes importantes (pavage, remblai, etc.). La déformation verticale qui en résulte est appelée tassement. Pour simuler ces charges unidimensionnelles en laboratoire, des échantillons de sol intact sont comprimés dans un appareil appelé œdomètre.

a) But d'essai

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

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



Figure IV.14 : préparation de l'échantillon au niveau de laboratoire de NHC.

b) Principe d'essai

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une enceinte cylindrique rigide (Edométrique).

- Diamètre de la boîte : $D \geq 60 \text{ mm}$
- Hauteur de l'éprouvette : $\text{Max}(10 \text{ mm} ; 6) \leq H_i \leq 0,4 D$

Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai. La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissants et décroissants suivant un programme défini.

Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

Les paliers de chargement et de déchargement sont maintenus au moins 24 heures et prolongés si nécessaire dans les conditions fixées par la norme.

c) Appareillage

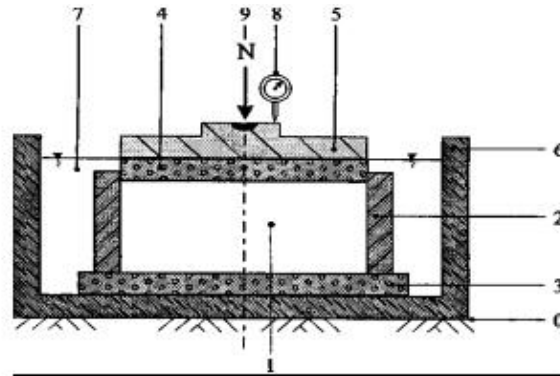


Figure III.21 : Enceinte cylindrique rigide (oedomètre).

0 Bâti	5 Dispositif de chargement
1 Éprouvette de matériau	6 Réservoir
2 Enceinte oedométrique	7 Liquide d'imbibition
3 Disque drainant inférieur	8 Mesurage du déplacement
4 Disque drainant supérieur	9 Effort N sur l'éprouvette

Figure IV.15 : Enceinte cylindrique rigide (oedomètre).

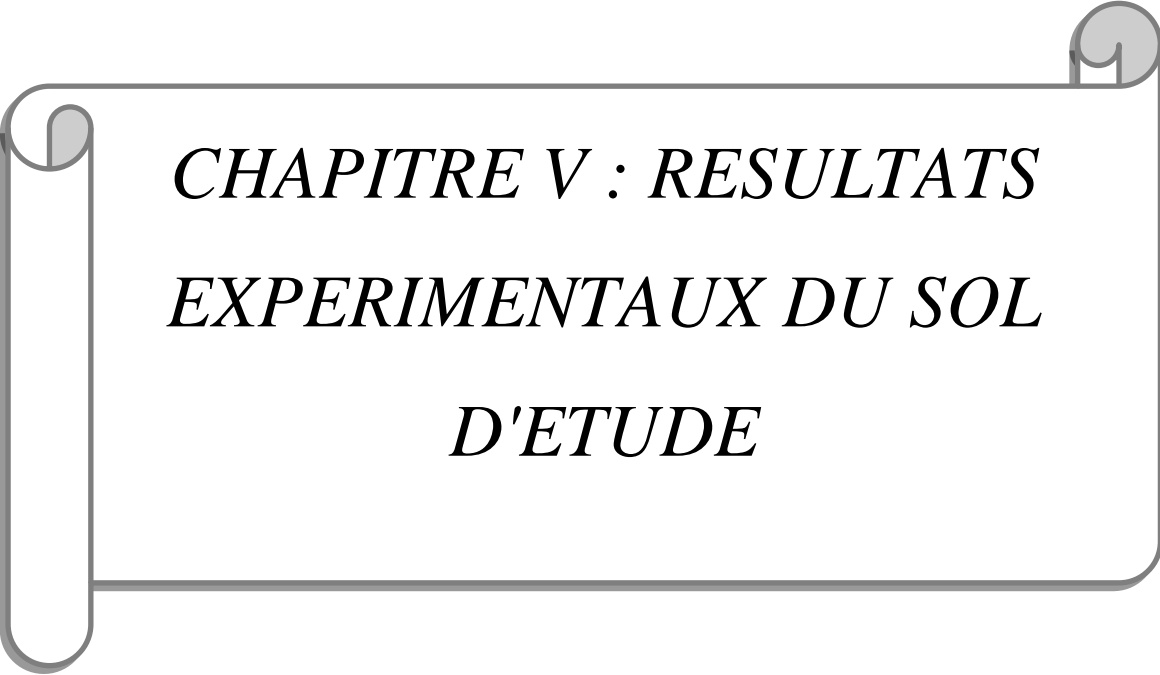
d) Mode opératoire

- Tailler le sol dans la bague jusqu'à ce qu'il remplisse le volume V ;
- Mesurer la masse initiale de l'éprouvette soumise à l'essai ;
- Mesurer la hauteur de l'éprouvette ;
- Mesurer le diamètre de l'éprouvette ;
- Poser les disques drainants à leurs places ;
- Intégrer l'échantillon dans la bague œdométrique ;
- Mettre la cellule œdométrique à la place et remplir le réservoir d'eau ;
- Commencer l'observation de la variation de la hauteur de l'éprouvette ;
- Maintenir les paliers de chargement 24 heures. Pour les sols gonflants: cette durée est réduite de telle sorte que l'éprouvette ne présente aucun gonflement. Les paliers de déchargement sont maintenus au moins 24 heures.

IV.4. Conclusion

Les essais de laboratoire sont des techniques utilisées pour caractériser les propriétés physiques et mécaniques des sols. Ces essais sont essentiels pour comprendre le comportement des sols dans différentes conditions de charges et d'environnements, et pour concevoir de manière sûre et efficace des structures et des fondations. Les essais de laboratoire comprennent une variété de techniques, telles que les essais de compression, les essais de cisaillement, les essais de perméabilité et les essais de compactage. Chacune de ces techniques fournit des informations spécifiques sur les propriétés du sol, telles que sa capacité portante, sa résistance à la déformation, sa perméabilité et sa densité.

En conclusion, les essais de laboratoire de géotechnique sont des techniques essentielles pour caractériser les propriétés des sols et pour concevoir de manière sûre et efficace des structures et des fondations. Cependant, il est important de comprendre que les résultats des essais de laboratoire doivent être utilisés avec prudence et en tenant compte des conditions du sol sur le site.



*CHAPITRE V : RESULTATS
EXPERIMENTAUX DU SOL
D'ETUDE*

V.1. Introduction

Dans toute étude géotechnique, il est essentiel de commencer par l'identification des sols. Cette procédure permet d'orienter les analyses géotechniques ultérieures et surtout d'effectuer une classification des matériaux rencontrés. Ce chapitre est un ensemble des essais géotechniques au laboratoire avec des résultats obtenus pour l'identification de sol étudié et la situation géographique de la zone d'étude.

V.2. Essai d'identification du sol

L'essai d'identification du sol est une procédure utilisée en géotechnique pour déterminer les caractéristiques et les propriétés d'un échantillon de sol. Cet essai vise à obtenir des informations essentielles sur la nature du sol, telles que sa classification, sa composition, sa plasticité et d'autres caractéristiques importantes pour l'ingénierie géotechnique.

Avant de commencer tout projet de construction, il est essentiel d'obtenir des informations sur les caractéristiques du sol. Ces informations sont nécessaires pour aider l'ingénieur

Géotechnicien à :

- Sélectionner le type de sol, qu'il s'agisse d'argile, de limon, de sable, etc.
- Identifier les problèmes potentiels tels que le tassement ou le gonflement du sol, afin d'établir des solutions appropriées.

L'étude géotechnique des sols repose sur deux types d'essais :

- Les essais in situ, qui sont réalisés directement sur le site de construction. Ces essais comprennent des méthodes telles que les sondages, les essais de pénétration et les essais de pressiométrie.
- Les essais au laboratoire, qui sont effectués sur des échantillons de sol prélevés sur le site. Ces essais permettent d'obtenir des informations plus détaillées sur les caractéristiques du sol. Parmi les essais réalisés au laboratoire, on peut citer :

V.2.1 Teneur en eau naturel

La teneur en eau naturel du sol étudié est : $W_{nat} = 15.64\%$.

V.2.2 Analyse granulométrique

Les résultats obtenus par cet essai sont présentés sur la courbe suivante :

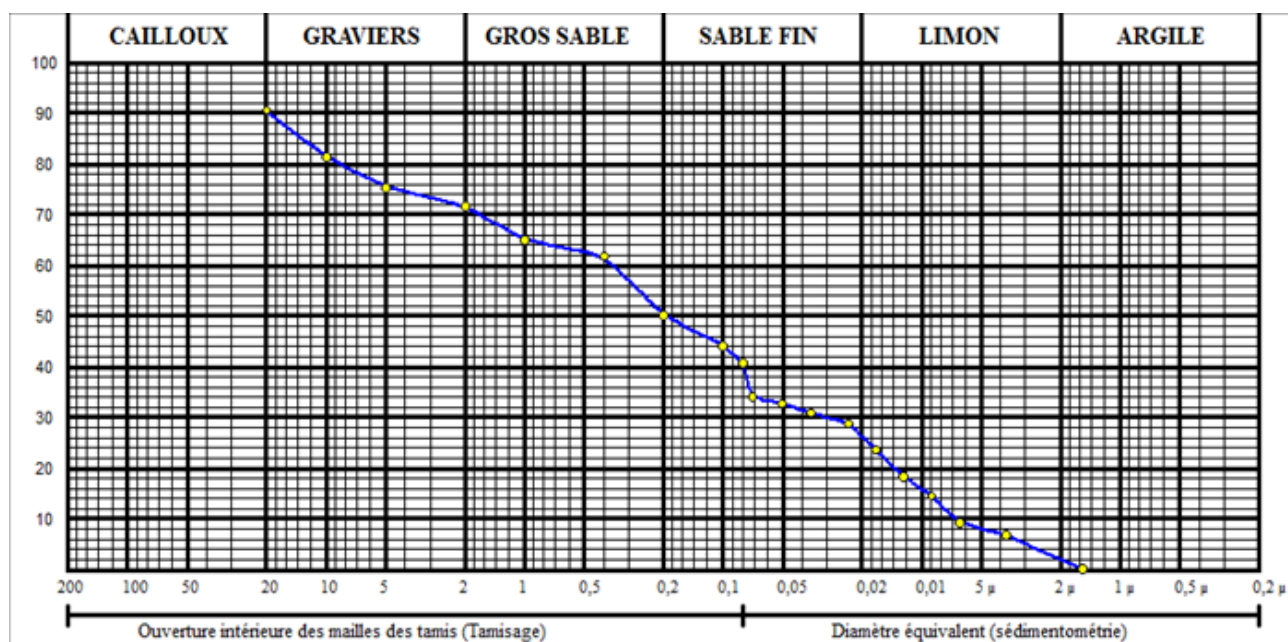


Figure V.1 : Courbe de l'Analyse Granulométrique et Sédimentométrique.

$D_{max} = 2,0 \text{ mm}$; $D_{min} = 0,018 \text{ mm}$

Coefficient d'uniformité : $C_u = D_{60}/D_{10} \rightarrow C_u = 53.340$

Coefficient de courbure : $C_c = D_{30} / D_{60}D_{10} \rightarrow C_c = 0.370$

V.2.3 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg permettent d'analyser les variations de consistance des sols fins en fonction de la teneur en eau. Comme pour la granularité, des études statistiques ont été faites afin de définir les limites d'Atterberg les mieux adaptées pour les blocs de terre et de prévoir rapidement les possibilités constructives d'un sol

Tableau V.1. Les limites d'Atterberg du sol.

W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)
38.63	22.30	16.33

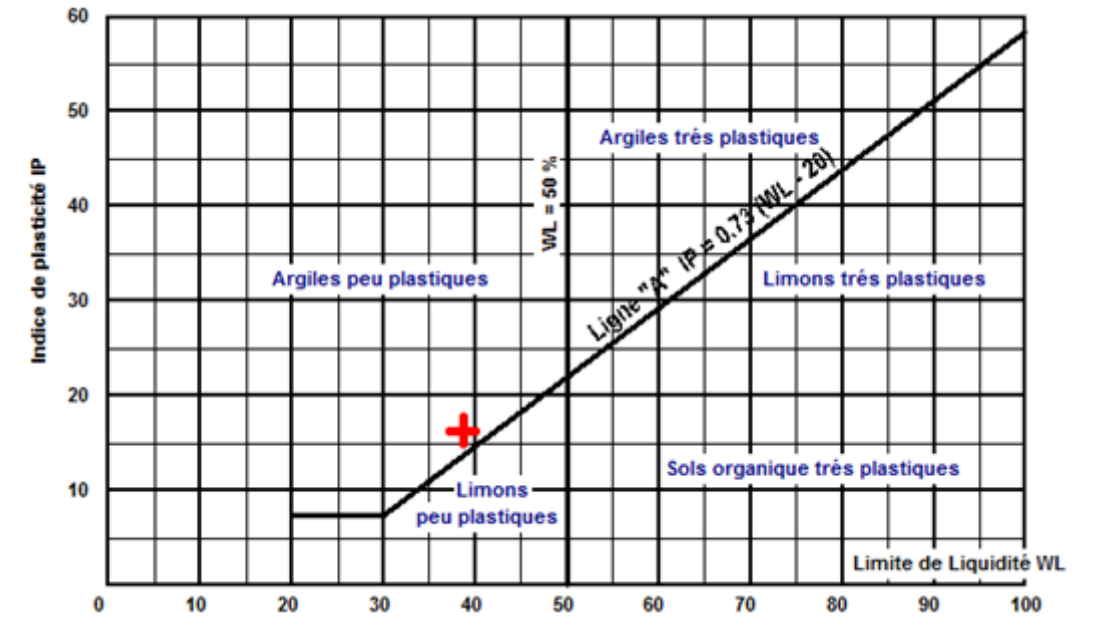


Figure V.2 : Classifications des sols basés sur la Plasticité.

V.2.4 Essai au bleu de méthylène

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur la prise d'essai.

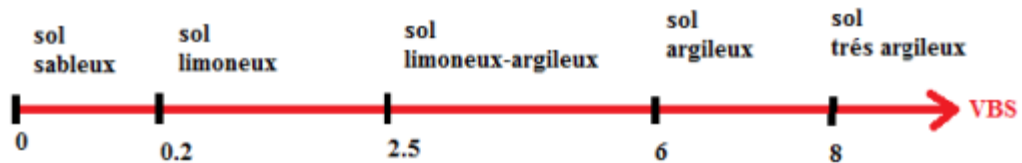


Figure V.3 : classification des sols selon la valeur de bleu de méthylène.



Figure V.4 : résultats de l'essai de bleu méthylène.

La valeur obtenue par l'essai au bleu de méthylène : $VBS = 2$.

V.2.5 Essai Proctor

La capacité portante d'un sol est sa capacité à supporter les charges appliquées sur lui. Cette capacité dépend de la nature du sol, du taux d'humidité et du degré de compactage. Dans tous les cas, la résistance mécanique du sol augmente avec sa densité sèche, qui est obtenue en utilisant des équipements lourds pour compacter le sol.

L'objectif de l'essai est de déterminer la capacité portante du sol, c'est-à-dire sa capacité à supporter les charges sans défaillance.

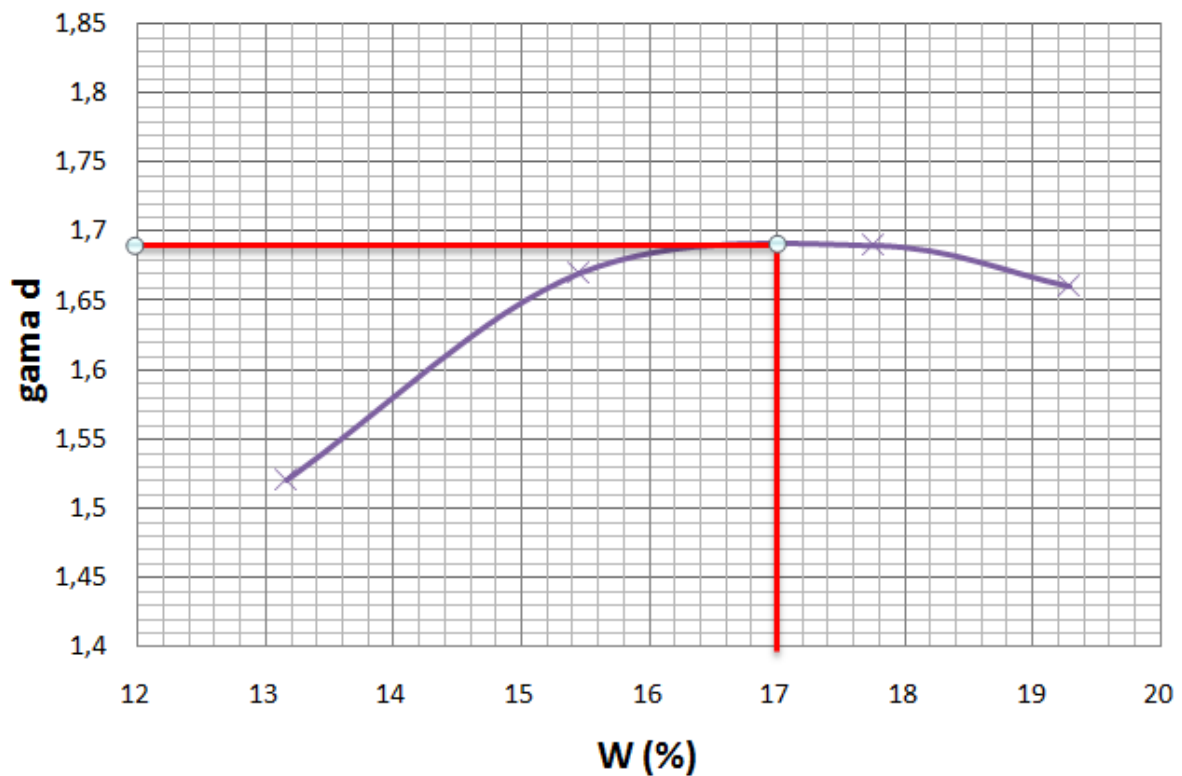


Figure V.5 : Courbe de Compactage.

Tableau V.2. Valeurs optimales de la Compaction du sol.

W_{OPT} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)
17	1.69

Expression des résultats

Le tableau résume les résultats des essais précédant les différentes caractéristiques du sol utilisé ainsi que sa classification.

Tableau V.3. Récapitulatif des résultats.

Essais	Résultat
Teneur en eau Naturelle	$W_{nat} = 15.64 \%$
Analyse Granulométrique	Teneur en fines ($<80 \mu m$)=40.80 %
Les Limites d'Atterberg	$W_L = 38.63 \%$
	$W_P = 22.30 \%$
	$I_P = 16.33 \%$
Compactage (Proctor normale)	$W_{OPT} = 17 \%$
	$\gamma_{dmax} = 1.69 (g/cm^3)$

• **Classification du sol selon le GTR**

L'utilisation des terres en remblai est d'abord directement liée à leur classification et à leur comportement lors de leur mise en place. Le GTR 92 (Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme) et la norme qui en découle NF- P 11-300 (septembre 1992) proposent une classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Ils permettent de définir la classe du matériau à partir des résultats précédant (Figure FV.6)

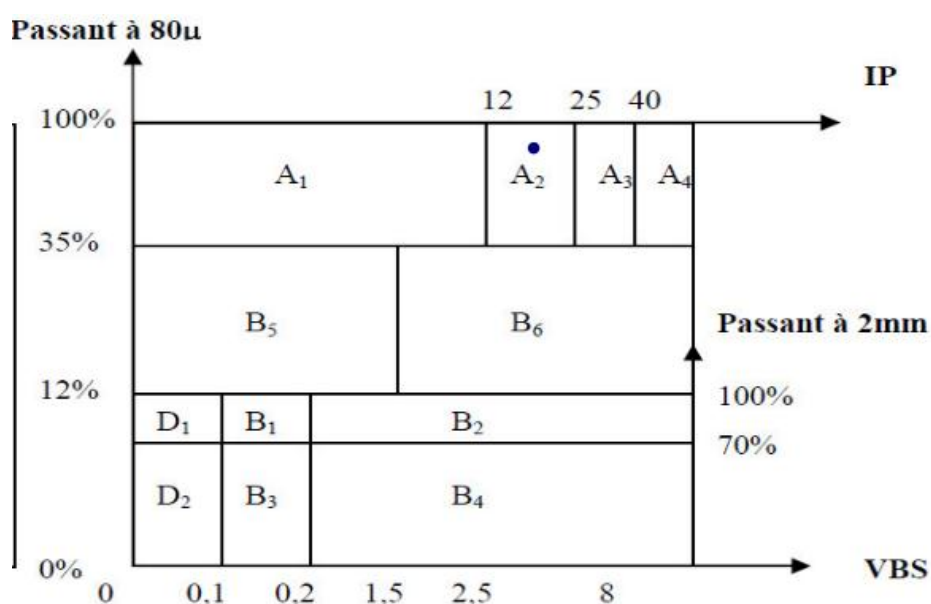


Figure V.6 : Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature, suivant la norme (NF P 11-300).

- A la lumière des résultats trouvés (VBS 2 et passant à 0.08 mm de 40.80 % et I_p EGALE 16.33 %) donc notre sol est de classe **A2**.

V.2.6 Essai C.B.R

L'essai de C.B.R est l'un des principaux essais routiers, il permet la détermination de l'indice C.B.R immédiat (C.B.R immédiat), c'est pour déterminer la portance du matériau sous les surcharges de la chaussée. La variation de l'indice C.B.R a été étudiée en fonction de la teneur en eau optimum

Le **Tableau V.4** et la **Figure V.7** présentent les valeurs des efforts de poinçonnement en fonction des enfoncements pour le sol non traité

Tableau V.4. valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité.

Enfoncement (mm)	Force (KN)
0	0
0.5	0,41175388
1	0,64336544
1.5	0,79777314
2	0,90071161
2.5	0,97791547
4	1,18379241
5	1,23526164
7	1,36393473
10	1,54407705
12.5	1,6212809

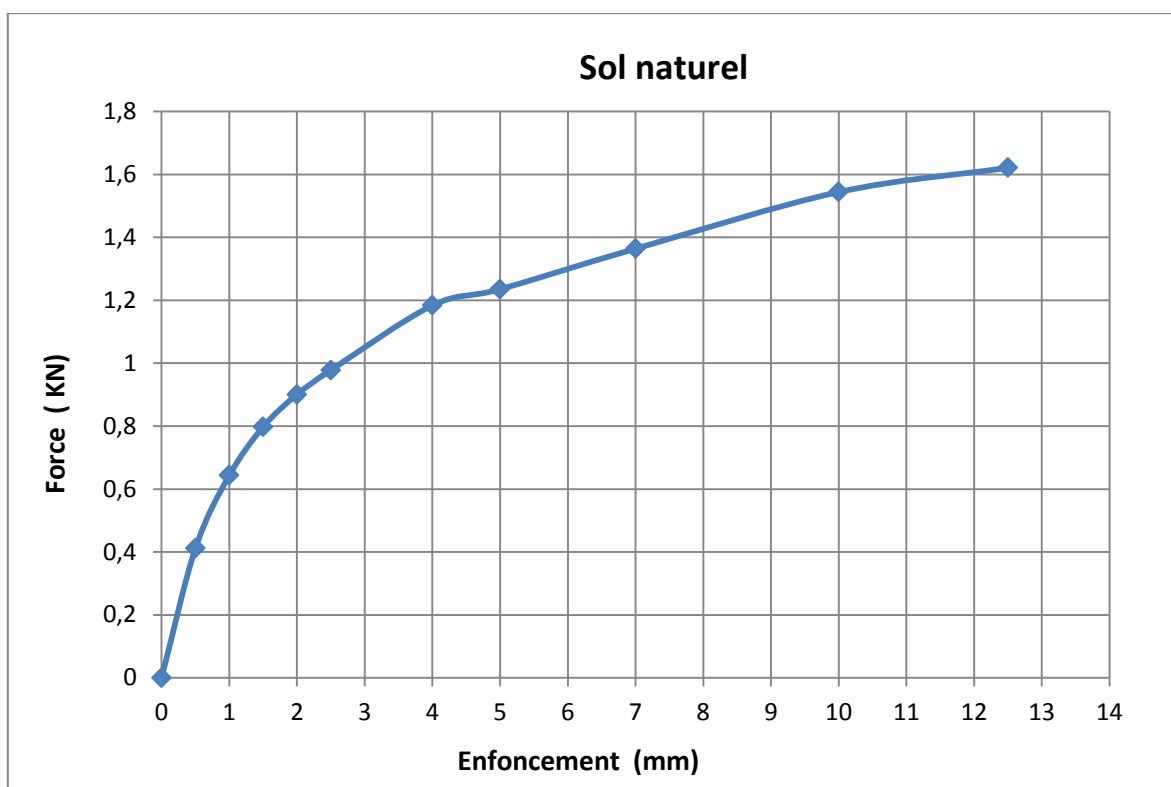


Figure V.7 : Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité.

V.2.7 Compression simple non confinée

La résistance à la compression a été évaluée en utilisant une presse hydraulique avec une vitesse de chargement de 20 mm/min. L'essai implique la mesure de la résistance à la

Compression d'échantillons de forme cylindrique (diamètre de 7.5 cm et hauteur de 15 cm) préparés avec les caractéristiques optimales obtenues par le compactage Proctor et conservés pendant 28 jours.



Figure V.8 : Préparation et rupture de l'éprouvette à la compression simple.

Le calcul de valeur de la résistance a la compression

$$R_c = \frac{F(\text{KN})}{S(\text{m}^2)} \dots \dots \dots (\text{V.1})$$

F : La charge maximale appliquée au cours de l'essai (en KN)

S : la section de l'éprouvette cylindrique (en m²)

$$R_c = \frac{0.337}{0.0044} = 76.41 \text{KPa}$$

La résistance a la compression de sol naturel (non traité) $R_c = 76.41 \text{ KN/m}^2$

V.2.8 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte

Dans cette étude, l'essai de la boîte de cisaillement a été réalisé afin de déterminer l'évolution de l'angle de frottement et de la cohésion du sol avant le traitement. En raison du manque de temps, le type d'essai de cisaillement consolidé et drainé (CD) a été proposé.

Les contraintes normales utilisées dans cet essai sont de 0.5 bar, 1 bars et 1.5 bars. Les contraintes de cisaillement correspondantes à la rupture, τ_1 , τ_2 et τ_3 , sont déterminées. La

courbe intrinsèque est tracée dans le diagramme de Mohr en utilisant les coordonnées (σ_i et τ_i). Généralement, cette courbe se situe dans le domaine des contraintes $\sigma_i \leq 300$ kPa (3 bars). Elle est représentée par une droite avec une pente ϕ , appelée angle de frottement, et une ordonnée à l'origine C, appelée cohésion.

Les **Figures V.9** et **V.10** présentent les courbes de cisaillement

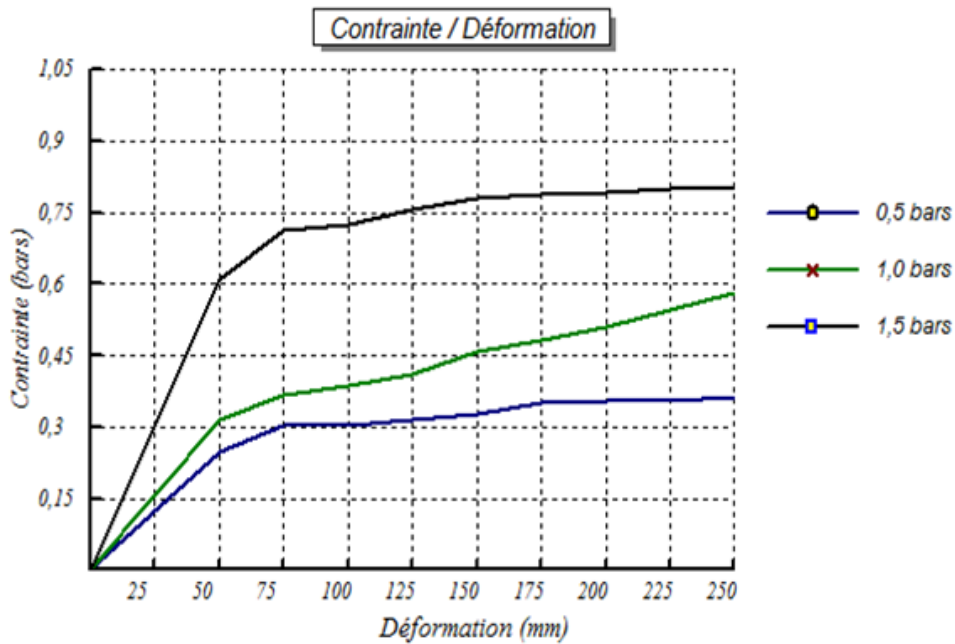


Figure V.9 : courbe des résultats de l'essai de cisaillement à la boîte.

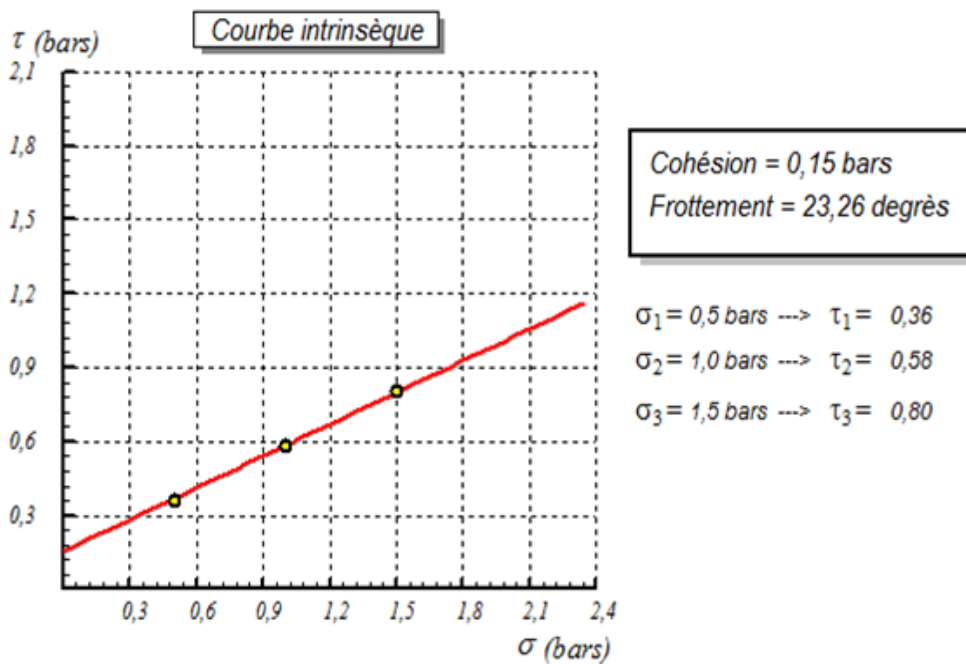


Figure V.10 : courbe intrinsèque sol naturel.

Donc les caractéristiques mécaniques intrinsèques du sol sont :

- $C = 15 \text{ KPa}$;
- $\phi = 23.26^\circ$.

V.2.9 Essai œdométrique

L'essai de l'œdomètre est utilisé pour évaluer le comportement en compression d'un sol. Il consiste à appliquer des charges sur un échantillon de sol confiné dans un dispositif appelé œdomètre. L'objectif de cet essai est de mesurer les déformations et les contraintes induites dans le sol pendant les différentes étapes de la compression. Ces données permettent de déterminer les paramètres de compressibilité du sol, tels que la compressibilité, la consolidation et le module de déformation. L'essai de l'œdomètre est largement utilisé en géotechnique pour prédire les tassements et le comportement à long terme des sols.

La figure V.11 présente la courbe d'essai œdométrique

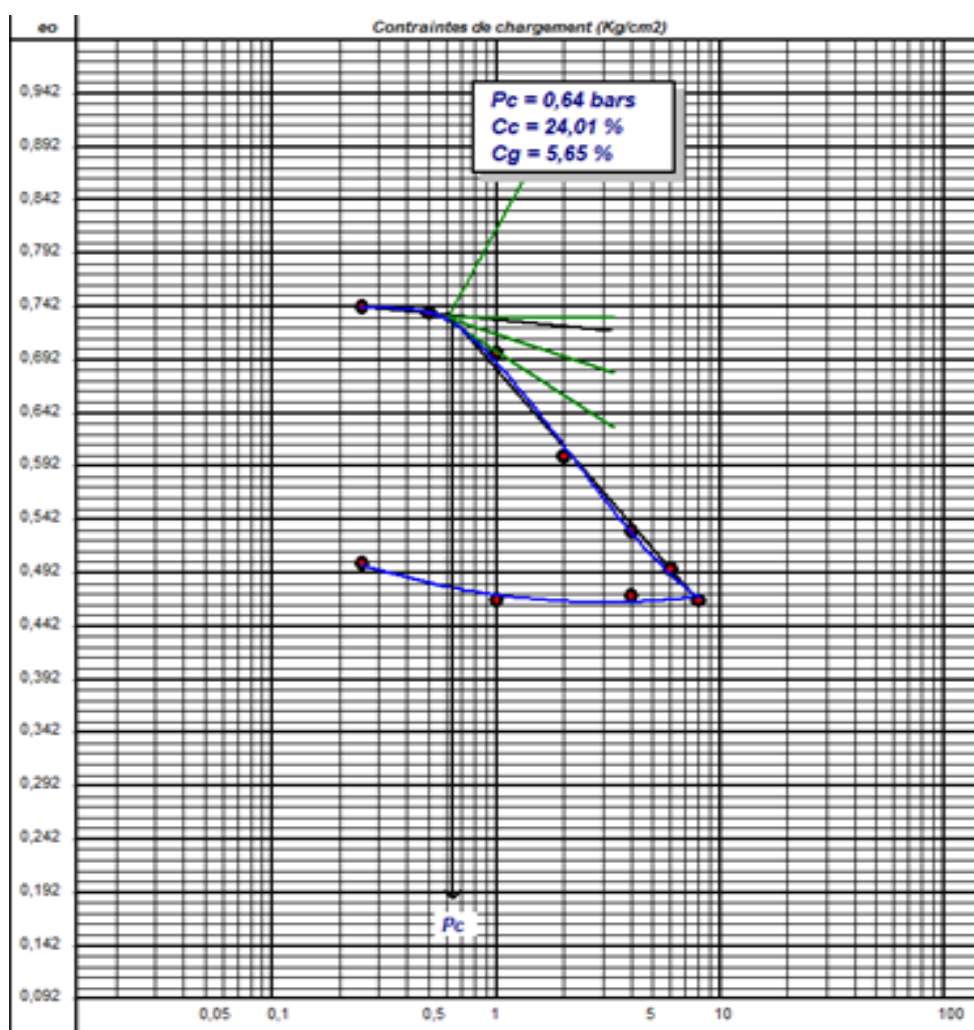
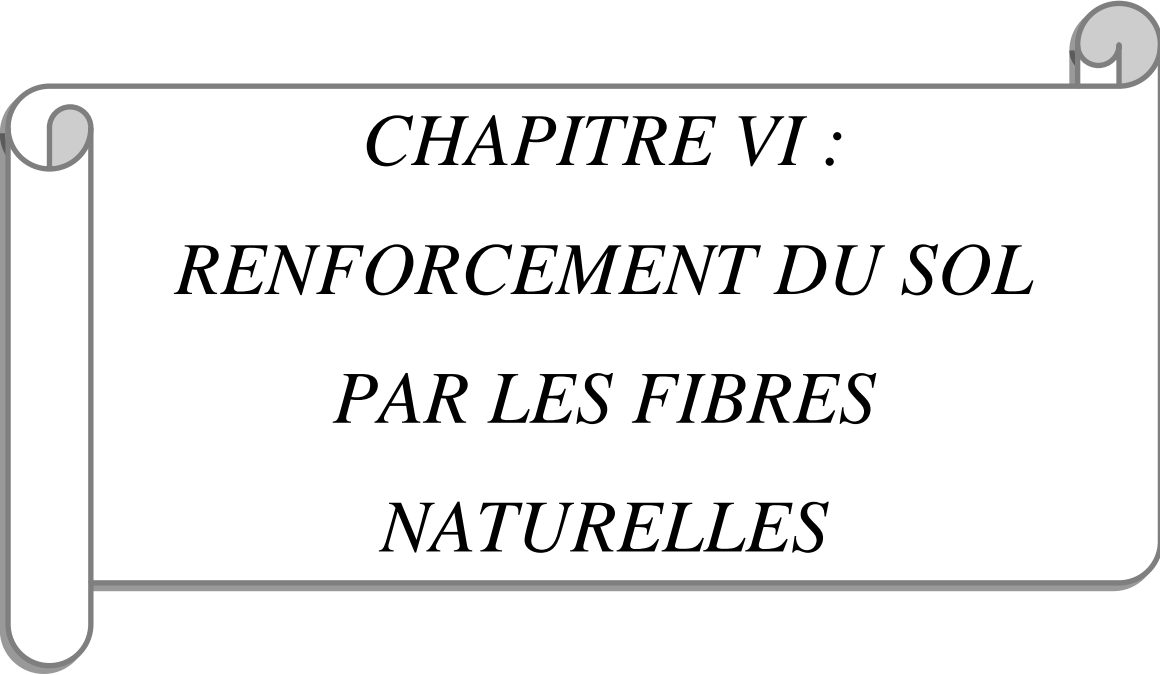


Figure V.11 : Courbe œdométrique sol naturel (sol non traité).

On constate d'après la **Figure V.11** Que pour le sol non traité, on trouve que l'indice de compressibilité atteint 0.2401 et l'indice de gonflement atteint 0.0565.



CHAPITRE VI :
RENFORCEMENT DU SOL
PAR LES FIBRES
NATURELLES

VI.1. Introduction

Cette section présente une étude sur l'utilisation d'un additif de renforcement pour stabiliser le sol, en utilisant des fibres extraites des feuilles du palmier de la Californie. Les fibres ont été traitées chimiquement avec de l'hydroxyde de sodium (NaOH) à différentes concentrations (3%, 6% et 9%) et pour différentes durées de traitement (60, 120 et 180 minutes). L'additif de renforcement a été utilisé sous deux formes différentes. Tout d'abord, les fibres ont été utilisées sous forme de morceaux de différentes longueurs (5 mm, 10 mm et 15 mm). Ensuite, elles ont été utilisées sous forme de poudre tamisée à travers un tamis de 1,6 mm de diamètre.



Figure VI.1 : Feuilles de palmier utilisées pour l'extraction de fibres.

VI.2. Présentation de l'additif de renforcement

Les fibres ont été obtenues à partir des feuilles du palmier de Californie. Les feuilles ont été découpées en longueurs appropriées avant d'être séchées au four à une température de 60°C pendant 72 heures jusqu'à atteindre une masse constante, afin de minimiser l'influence de la teneur en humidité et de standardiser les caractéristiques physiques des tiges. La température de séchage a été choisie à 70°C car elle permet un séchage relativement rapide des fibres, ce qui est favorable pour le développement industriel du processus, sans modifier la structure chimique des fibres.

Après le processus de séchage, les fibres ont été soumises à un traitement chimique en utilisant de l'hydroxyde de sodium à différentes concentrations et pour différentes durées de traitement, afin de quantifier l'effet de la concentration et du temps de traitement sur les propriétés des fibres.



Figure VI.2 : Découpage de feuilles de palmier en morceaux de longueur (5mm, 10mm et 15mm).

Ce traitement chimique a été suivi d'un lavage avec de l'eau distillée pour éliminer les sucres et les extraits. Les fibres ont ensuite été lavées à plusieurs reprises avec de l'eau distillée pour nettoyer leur surface jusqu'à ce que l'eau devienne propre. Après le lavage, les fibres ont été laissées à égoutter avant d'être séchées à nouveau au four à une température de 70°C jusqu'à atteindre une masse constante.



a) séchage avant traitement.

b) Traitement par NaOH.

c) Séchage après traitement.

Figure VI.3 : Processus de traitement du produit de renforcement.

VI.3. Matériaux de traitement

L'Hydroxyde de sodium, appelé également soude caustique, c'est un corps chimique composé minéral de formule chimique NaOH, qui est à température ambiante un solide ionique, fusible vers 318°C, il se présente généralement sous forme de pastilles, de paillettes ou de billes blanches ou d'aspect translucide, corrosives et très hygroscopiques. Il est très soluble dans l'eau et légèrement soluble dans l'éthanol. Nous l'avons utilisé dans ce travail pour traiter les fibres utilisées.



Figure VI.4 : Hydroxyde de Sodium (NaOH).

VI.4. Essai Proctor

IV.4.1. Méthodologie expérimentale

a. Plan d'expériences adopté

Pour aboutir à notre objectif fixé dans cette étude, c'est à dire le renforcement de notre sol d'étude par des fibres de feuilles de palmier de la Californie, traitées par la solution NaOH, il faut tout d'abord choisir les facteurs et leurs niveaux de variation. Dans notre étude, nous considérons 4 facteurs et affectons 3 niveaux à chacun d'entre eux.

Ces facteurs sont: le pourcentage des fibres (%Fibres), la longueur de ces fibres (L), le pourcentage de la solution de traitement (%NaOH) et le temps de traitement (T). Les niveaux de variation de chaque paramètre sont présentés dans le tableau ci-dessous:

Tableau VI.1. Niveaux de variation des paramètres de l'étude.

Paramètres	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Pourcentage de fibres (%Fibres) (%)	0.5	1.0	1.5
Longueur de fibres (L), (mm)	5	10	15
Pourcentage du NAOH (%NAOH) (%)	3	6	9
Temps de traitement (T), (mn)	60	120	180

A partir des données du tableau ci-dessus, un plan d'expériences sera adopté, c'est-à-dire une liste ordonnée d'essais permettant de varier les différents paramètres d'étude. Dans notre cas, un plan d'expérience de Taguchi L9 sera adopté.

Tableau VI.2. Plan d'expériences de Taguchi L9.

N°	% Fibres (%)	Longueur L (mm)	%NaOH (%)	Temps (mn)
1	0,5	5	3	60
2	0,5	10	6	120
3	0,5	15	9	180
4	1.0	5	6	180
5	1.0	10	9	60
6	1.0	15	3	120
7	1,5	5	9	120
8	1,5	10	3	180
9	1,5	15	6	60

b. Discussion des résultats des essais

L'essai est réalisé pour déterminer les caractéristiques de compactage Proctor (optimum Proctor) du sol initial et des sols traités. . Le mode opératoire est conforme à la norme NF P94-093. Les valeurs des paramètres de réponse considérés sont présentées dans le tableau VI.3. Ces résultats ont été obtenus en suivant le plan d'expérience de Taguchi, qui comprend 9 essais avec 4 facteurs à 3 niveaux (L9). Ce plan d'expérience permet une évaluation efficace de l'influence des facteurs sur les réponses étudiées, tout en minimisant le nombre d'essais requis.

Tableau VI.3. Résultats de l'essai Proctor selon le plan de Taguchi L9.

Désignation		Caractéristiques de compactage	
		Teneur en eau optimale Wopt(%)	$\gamma_{d_{max}}$ (g/cm ³)
sol naturel		17	1.69
0.5% aditif	5mm_3%NaOH_60min	12.4	1.81
	10mm_6%NaOH_120min	12.4	1.76
	15mm_9%NaOH_180min	12.8	1.72
1% aditif	5mm_6%NaOH_180min	12.2	1.69
	10mm_9%NaOH_60min	12.5	1.74
	15mm_3%NaOH_120min	12.16	1.76
1.5% aditif	5mm_9%NaOH_120min	12.7	1.77
	10mm_3%NaOH_180min	12.5	1.67
	15mm_6%NaOH_60min	12.4	1.60

La figure VI.5 présente l'évolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour un sol non traité et un sol traité avec 0.5% d'additifs, différents pourcentages de NaOH et différentes longueurs de fibres. Les résultats montrent que l'ajout de 0.5% de fibres de différentes longueurs a entraîné une diminution de la teneur en eau optimale et une augmentation considérable de la densité sèche maximale. Cette augmentation s'explique par le fait que les fibres ont réduit la porosité du sol, permettant ainsi à l'eau de s'évaporer plutôt que d'occuper les vides dans le sol. La diminution de l'indice des vides a donc entraîné une augmentation de la densité sèche maximale du sol. Les valeurs extrêmes de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale ($W_{opt} = 12.4\%$, $\gamma_{d_{max}} = 1.81 \text{ (g/cm}^3\text{)}$), ont été obtenues pour un renforcement avec 0.5% de fibres, 5mm de longueur, 3% de NAOH et 60 mn pour la durée de traitement.

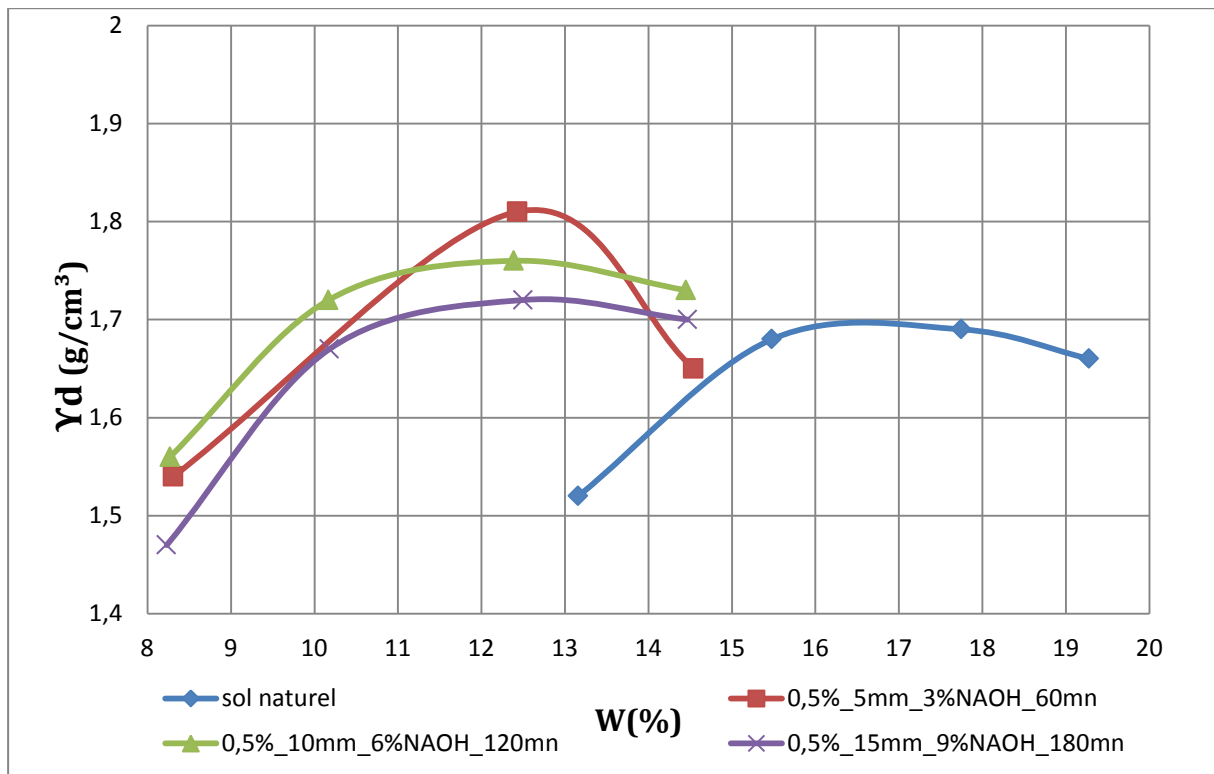


Figure VI.5 : Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol non traité et sol traité avec 0.5% d'additifs.

La Figure VI.6 présente l'évolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour un sol non traité et un sol traité avec 1.0% d'additifs, différents pourcentages de NaOH et différentes longueurs de fibres. Les résultats confirment la diminution de la teneur en eau optimale et l'augmentation de la densité sèche maximale en augmentant le pourcentage de l'additif. La diminution de l'indice des vides a donc entraîné

une augmentation de la densité sèche maximale du sol. Il convient également de noter que les valeurs extrêmes des paramètres de compacité ont été obtenues avec un taux de traitement plus faible (3% de NaOH). Les valeurs extrêmes de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale ($W_{opt} = 12,16\%$, $\gamma_{dmax} = 1,76 \text{ (g/cm}^3\text{)}$) ont été obtenues pour un renforcement avec 1,0% de fibres, une longueur de 15 mm, 3% de NaOH et une durée de traitement de 120 minutes.

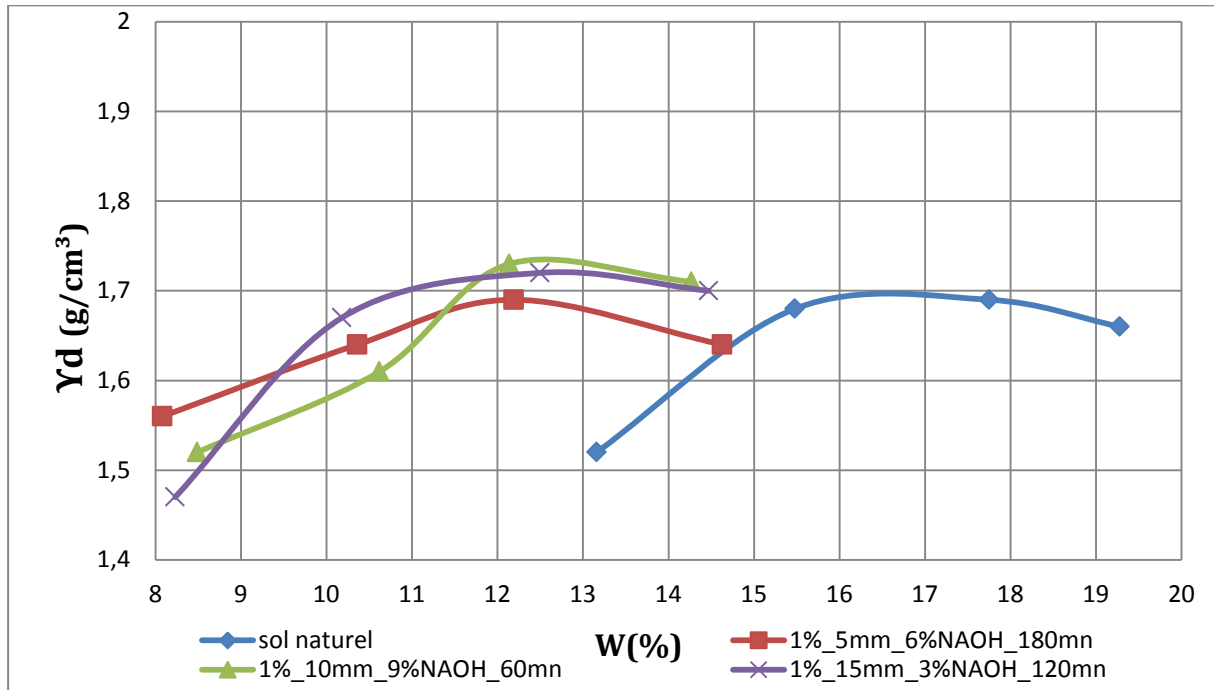


Figure VI.6 : Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol non traité et sol traité avec 1% d'additifs.

La Figure VI.7 illustre l'évolution des caractéristiques de compactage pour un sol non traité et un sol traité avec 1,5% d'additifs, différents pourcentages de NaOH et différentes longueurs de fibres. Les résultats indiquent que l'ajout de 1,5% de fibres de différentes longueurs a entraîné une diminution de la teneur en eau optimale et une augmentation considérable de la densité sèche maximale. Les valeurs extrêmes de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale sont de ($W_{opt} = 12,4\%$, $\gamma_{dmax} = 1,77 \text{ (g/cm}^3\text{)}$).

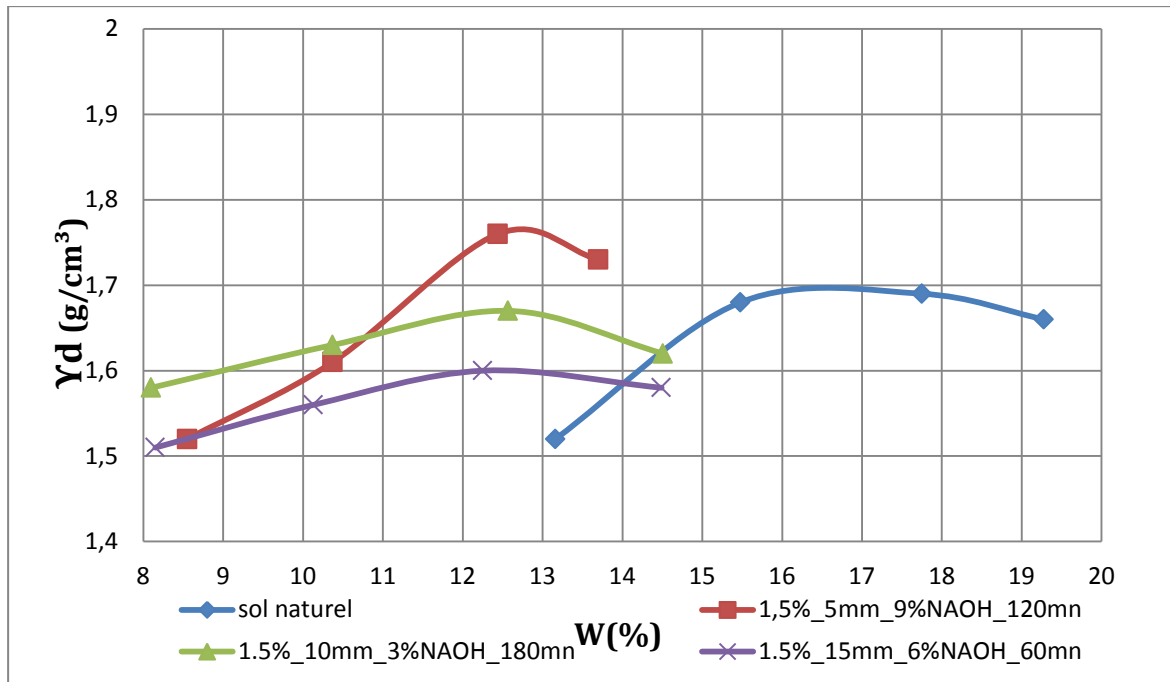


Figure VI.7 : Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol non traité et sol traité avec 1.5% d'aditifs.

VI.5. Essai CBR

VI.5.1. Méthodologie expérimentale

a. Plan d'expériences adopté

Dans le reste de notre étude, nous considérons seulement 2 facteurs qui sont le pourcentage des fibres utilisé sous forme de poudre (%Fibres) avec une variation en 5 niveaux (0.5%, 1%, 1.5%, 2% et 2.5%) et le pourcentage de la solution de traitement (%NaOH) avec les pourcentages (3%, 6% et 9%). Les niveaux de variation de chaque paramètre sont présentés dans le tableau ci-dessous:

Tableau VI.4. Niveaux de variation des paramètres de l'étude.

Paramètres	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
Pourcentage de fibres (%Fibres) (%)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Pourcentage du NAOH (%NaOH) (%)	3	6	9	-	-

A partir des données du tableau ci-dessus, un plan d'expériences sera adopté, c'est-à-dire une liste ordonnée d'essais permettant de varier les différents paramètres d'étude. Dans notre cas, un plan d'expérience factoriel complet L15 sera adopté.

Tableau VI.5. Plan factoriel complet L15.

N°	% Fibres (%)	%NaOH (%)
1	1	6
2	0,5	6
3	1	9
4	2,5	3
5	2	3
6	1,5	3
7	0,5	3
8	2	9
9	0,5	9
10	2	6
11	1	3
12	2,5	6
13	1,5	9
14	1,5	6
15	2,5	9

b. Discussion des résultats des essais

Le test C.B.R (California Bearing Ratio) est couramment utilisé dans l'industrie routière pour évaluer la capacité d'un matériau à supporter les charges de la chaussée. Il permet de déterminer l'indice C.B.R immédiat, qui reflète la résistance du matériau à ces charges. Une étude a été réalisée pour examiner la variation de l'indice C.B.R en fonction de la teneur en eau optimale et des différents pourcentages d'additifs, dans le but de comprendre l'impact de ces facteurs sur la capacité portante du matériau. L'indice CBR (I, CBR) est exprimé en pourcentage en comparant les pressions qui produisent dans le même temps un enfoncement donné dans le sol étudié et dans un matériau type. Par définition, cet indice est égal à la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$CBR\ 2.5 = \frac{\text{force (KN) à 2.5 mm d'enfoncement}}{13.35\ \text{KN}} \times 100 \quad (\text{VI.1}).$$

$$CBR\ 5 = \frac{\text{force (KN) à 5 mm d'enfoncement}}{19.93\ \text{KN}} \times 100 \quad (\text{VI.2}).$$

Les résultats seront présentés sous forme de tableaux et de courbes, montrant les efforts de poinçonnement en fonction des enfoncements pour différents pourcentages d'additifs et pour le sol non traité. Ces résultats ont été obtenus en suivant un plan d'expérience L15, comprenant 15 essais avec 2 facteurs à 5 et 3 niveaux respectivement. Ce plan d'expérience permet une évaluation efficace de l'influence des facteurs sur les réponses étudiées, tout en minimisant le nombre d'essais requis.

Tableau VI.6. Résultats de l'essai CBR selon le plan de L15.

ADITIFS		Indice CBR		
		2.5mm	5mm	Indice CBR
sol naturel		7.325	7.231	7.325
0.5% aditif	3%NaOH	5,783	5,294	5,783
	6%NaOH	6,745	5,783	6,745
	9%NaOH	6,169	5,488	6,169
1% aditif	6%NaOH	6,361	6,327	6,361
	9%NaOH	6,361	5,488	6,361
	3%NaOH	6,072	6,069	6,072
1.5% aditif	9%NaOH	9,057	8,003	9,057
	3%NaOH	9,635	9,165	9,635
	6%NaOH	6,359	6,067	6,359
2% aditif	3%NaOH	7.770	7.321	7.770
	6%NaOH	6.746	6.972	6.972
	9%NaOH	7.517	7.101	7.517
2.5% aditif	3%NaOH	7.325	7.489	7.489
	6%NaOH	7.710	7.231	7.710
	9%NaOH	7.132	7.489	7.489

La Figure VI.8 présente les résultats d'essais de poinçonnement pour le sol non traité et le sol traité avec différents pourcentages de NaOH, en fonction des enfoncements. Les résultats montrent que l'ajout de 0,5 % d'additif n'a pas eu d'impact significatif sur la capacité des sols

traités. En comparaison, la valeur maximale de l'indice CBR pour le sol témoin était de 7,32, tandis que pour les sols renforcés, elle était de 6,75 avec un pourcentage de traitement de 6 % de NaOH. Ces résultats indiquent qu'il est souhaitable d'augmenter le pourcentage d'additif pour améliorer la capacité portante des sols traités.

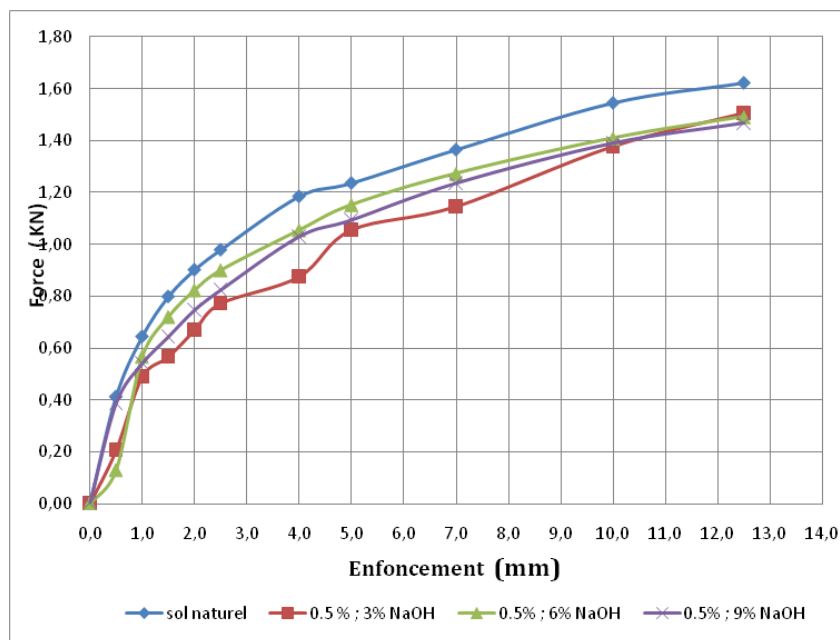


Figure VI.8 : Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité et du sol traité avec 0.5% d'additifs (% NaOH = 3%, 6% et 9%).

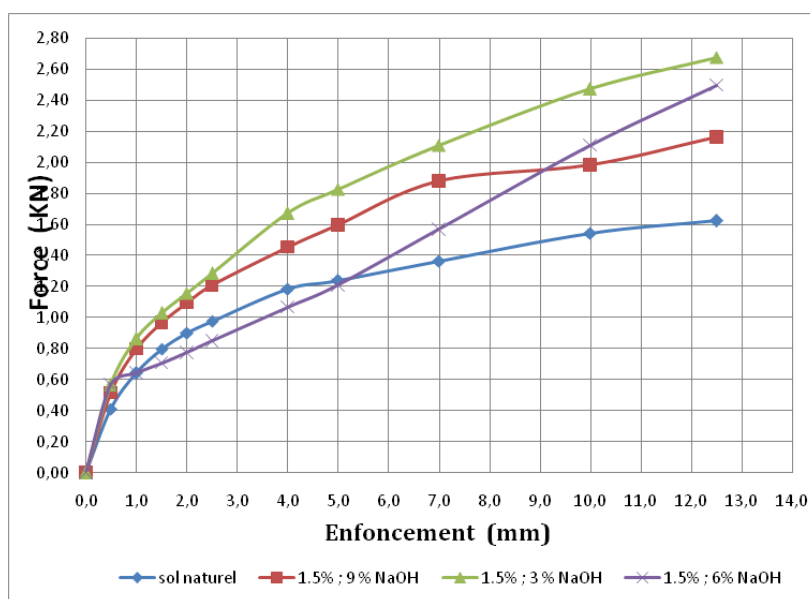


Figure VI.9 : Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité et du sol traité avec 1.5% d'additifs (% NaOH = 3%, 6% et 9%).

Les résultats des essais de poinçonnement pour le sol non traité et le sol traité avec différents pourcentages de NaOH en fonction des enfoncements sont présentés dans la Figure VI.9. Les données indiquent que l'augmentation de l'ajout de 1,5 % a eu un impact significatif sur l'indice CBR, avec une augmentation de 31,38 % par rapport au sol non traité. En revanche, la concentration maximale de 3 % de NaOH a donné la valeur maximale de l'indice CBR, qui est de 9,64 % (figure VI.11).

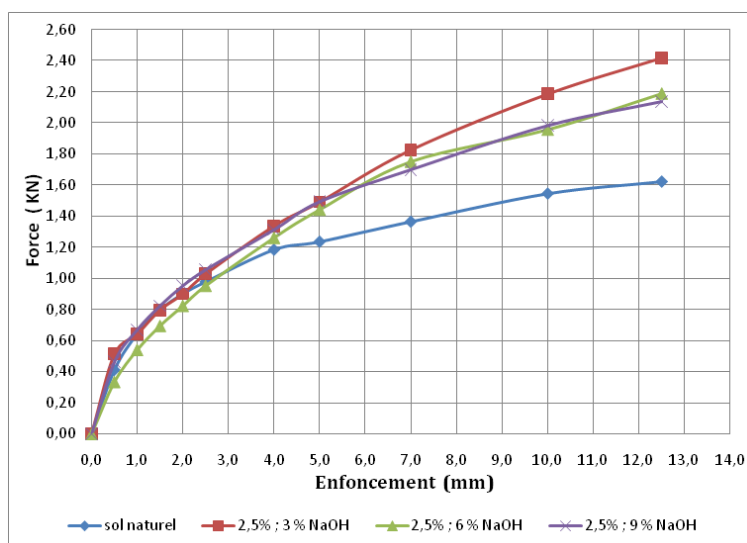


Figure VI.10 : Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité et le sol traité avec 2.5% d'aditifs (% NaOH = 3%, 6% et 9%).

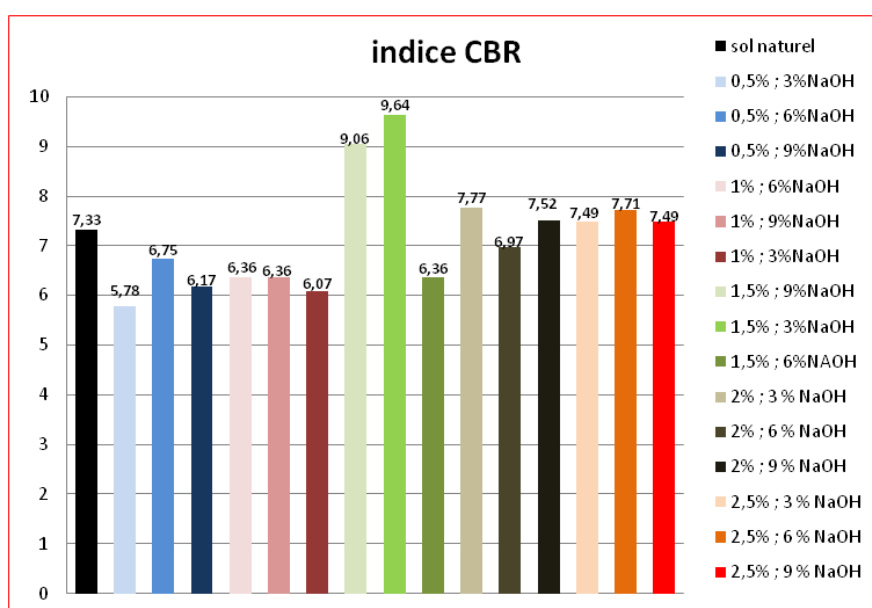


Figure VI.11 : Histogramme des Valeurs de l'indice CBR en fonction du pourcentage d'additifs et de NaOH.

D'après la Figure VI.10, une augmentation de 5,18 % de l'indice CBR est observée avec l'augmentation du pourcentage d'additif à 2,5 %. Par conséquent, on peut en conclure que la valeur optimale du pourcentage d'ajout est d'environ 1,5 %. En ce qui concerne le taux de concentration de NaOH, la valeur maximale de l'indice CBR est obtenue avec un pourcentage de 3 % de NaOH.

VI.5.2. Analyse statistique

a) Analyse de variance ANOVA

L'analyse de variance (ANOVA) est une méthode statistique qui permet de déterminer si les moyennes de plusieurs groupes sont significativement différentes les unes des autres. Elle permet également d'identifier les facteurs qui influencent les différences observées entre les groupes. L'ANOVA est souvent utilisée pour analyser les données expérimentales dans différents domaines tels que la biologie, la physique, l'ingénierie, etc.

Le tableau VI.7 présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de l'indice CBR. Selon le tableau, le facteur ayant l'influence la plus significative sur l'indice CBR est le terme quadratique du pourcentage de NaOH (%NaOH)², avec une contribution de 38,69 %. Ensuite, le produit des termes quadratiques des pourcentages (%ADD)² x (%NaOH)² contribue à hauteur de 29,80 %, suivi par le produit (%ADD)⁴ x (%NaOH)² avec un taux de 23,97 %. Les autres paramètres n'ont pas d'influence significative sur l'indice CBR.

Tableau VI.7. Analyse de la variance pour l'indice CBR.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	% de Contribution	Remarque
Model	16,36	6	2,73	26,01	< 0.0001	95.12	Significant
A-%ADD	0,25	1	0,25	2,39	0,1605	0,992	Non Significant
B-%NaOH	9,409E-004	1	9,409E-004	8,974E-003	0,9269	0,004	Non significant
B ²	9,75	1	9,75	92,98	< 0.0001	38,689	Significant
AB ²	0,81	1	0,81	7,69	0,0242	3,214	Non significant
A ² B ²	7,51	1	7,51	71,63	< 0.0001	29,800	Significant
A ⁴ B ²	6,04	1	6,04	57,58	< 0.0001	23,967	Significant
Residual	0,84	8	0,10			3,333	
Cor Total	17,20	14				100	

b) Prédiction mathématique

La relation fonctionnelle entre la variable de sortie (CBR) et les variables d'entrée (%ADD et %NAOH) a été exprimée avec un coefficient de détermination ($R^2 = 95,12 \%$), qui indique la précision de la régression. Le modèle quadratique résultant de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la réponse (CBR) en fonction des facteurs étudiés. Ce modèle est présenté par l'équation (VI.3).

Ces résultats indiquent une forte corrélation entre les variables d'entrée et la variable de sortie, ce qui permet de prédire avec précision la sortie en fonction des facteurs étudiés. Cependant, il convient de noter que les modèles de régression sont basés sur des données expérimentales et peuvent ne pas être généralisables à d'autres situations ou conditions. Par conséquent, il est important de valider les modèles de régression avec de nouveaux jeux de données expérimentales pour confirmer leur validité et leur applicabilité.

$$\begin{aligned}
 CBR = & 8.127 + 0.81x\%ADD - 0.87x\%NAOH + 0.06x\%NAOH^2 + 0.01x\%ADDx\%NAOH^2 \\
 & + 0.0012x\%ADD^2x\%NAOH^2 \\
 & - 0.0008x\%ADD^4x\%NAOH^2
 \end{aligned}
 \tag{VI.3}$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de la variable de sortie (CBR) est présentée dans la Figure VI.12. Les résultats montrent une excellente concordance entre les valeurs numériques prédites par le modèle et les valeurs expérimentales mesurées, ce qui confirme la validité de l'équation (VI.3) pour prédire la sortie (CBR) en fonction des facteurs d'entrée (%ADD et %NAOH). Ces observations indiquent que le modèle de régression quadratique est capable de représenter avec précision la relation fonctionnelle entre les variables d'entrée et la variable de sortie. Par conséquent, ces résultats sont très encourageants car ils suggèrent que le modèle peut être utilisé pour prédire avec précision la sortie (CBR) en fonction des facteurs d'entrée.

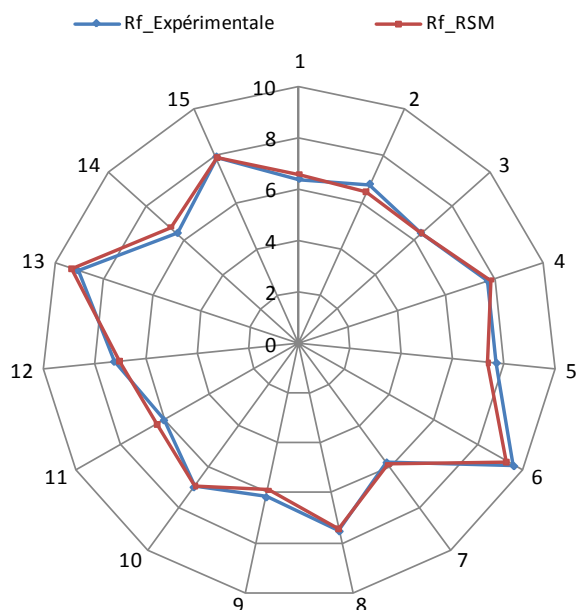


Figure VI.12 : Valeurs expérimentales et valeurs prédites de l'indice CBR.

VI.6. Essai de compression simple non confinée

VI.6.1. Méthodologie expérimentale

De manière similaire à l'évaluation de l'indice CBR, nous avons pris en compte deux facteurs pour mesurer la résistance à la compression : le pourcentage de fibres utilisé sous forme de poudre (%Fibres) avec une variation en cinq niveaux (0,5%, 1%, 1,5%, 2% et 2,5%) et le pourcentage de solution de traitement (%NaOH) avec des pourcentages de 3%, 6% et 9%, comme présenté dans le Tableau VI.4. La résistance à la compression a été évaluée en appliquant une force à l'aide d'une presse hydraulique à une vitesse de chargement de 20 mm/min. L'essai consistait à évaluer la capacité d'un échantillon cylindrique (diamètre de 7,5 cm et hauteur de 15 cm) à résister à une charge de compression. Les échantillons ont été préparés en respectant les caractéristiques optimales obtenues par le compactage Proctor, puis traités avec des additifs aux pourcentages de 0,5%, 1%, 1,5%, 2% et 2,5%, avant d'être conservés pendant 28 jours avant l'essai. Les éprouvettes traitées ont ensuite été soumises à une compression entre deux plateaux jusqu'à la rupture, comme illustré dans la Figure VI.13.



Figure VI.13 : Rupture des éprouvettes traitées sous la compression simple à 28 jours.

La Figure VI.14 présente les résultats de l'essai de compression sous forme d'histogramme. Il est clair que les échantillons renforcés ont connu une amélioration significative de leur résistance à la rupture avec l'augmentation du pourcentage d'additif. La valeur de la contrainte de compression pour le sol témoin était de 76,3 kPa, tandis que la valeur maximale de la contrainte était de 167,6 kPa, enregistrée pour un pourcentage de renforcement de 2,5% avec un taux de traitement de 3%, soit un taux d'augmentation de 119,66%.

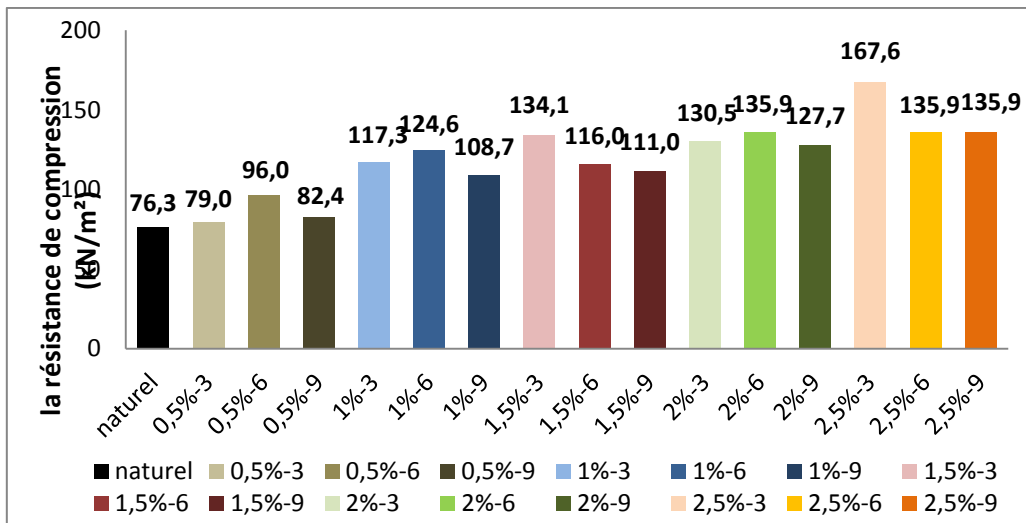


Figure VI.14 : Histogrammes de la résistance de compression des sols en fonction des pourcentages d'additif et de NaOH.

Il est également remarquable que les valeurs maximales de contrainte correspondent à des taux de traitement variant entre 3% et 6%, ce qui indique que le taux de traitement optimal ne doit pas dépasser 6%.

VI.6.2. Analyse statistique

a) Analyse de variance ANOVA

Le tableau VI.8 présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la résistance à la compression à 28 jours R_c . Selon le tableau, le facteur ayant l'influence la plus significative sur la résistance R_c est le terme %ADD avec une contribution de 51.19%, suivi des termes %NAOH dont sa contribution est de 15.55% et le terme $(\%ADD)^3 \times (\%NaOH)^2$, avec une contribution de 16,77%. Ensuite, le produit du terme quadratique des pourcentages $(\%ADD)^2 \times (\%NaOH)$ contribue à un taux de 6,48 %, suivi par le produit $(\%ADD)^4 \times (\%NaOH)$ avec un taux de 8,40 %. Le terme d'interaction entre les deux paramètres n'a pas d'influence significative sur la résistance R_c .

Tableau VI.8 : Analyse de la variance pour l'indice la résistance à la compression R_c .

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	% de Contribution	Remarque
Model	5682,45	6	947,07	22,70	0,0001	94,45	Significant
A-%ADD	877,98	1	877,98	21,05	0,0018	51,19	Significant
B-%NAOH	266,78	1	266,78	6,39	0,0353	15,55	Significant
AB	27,74	1	27,74	0,66	0,4384	1,62	Significant
A^2B	111,08	1	111,08	2,66	0,1414	6,48	Non significant
A^3B^2	287,64	1	287,64	6,89	0,0304	16,77	Significant
A^4B	144,01	1	144,01	3,45	0,1002	8,40	Significant
Residual	333,74	8	41,72			5,55	
Cor Total	6016,19	14				100	

b) Prédiction mathématique

La relation fonctionnelle entre la variable de sortie (R_c) et les variables d'entrée (%ADD et %NaOH) a été exprimée avec un coefficient de détermination ($R^2 = 94,45 \%$), qui indique la précision de la régression. Le modèle quadratique résultant de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la réponse (R_c) en fonction des facteurs étudiés. Ce modèle est présenté par l'équation (VI.4).

Ces résultats indiquent une forte corrélation entre les variables d'entrée et la variable de sortie, ce qui permet de prédire avec précision la sortie en fonction des facteurs étudiés.

$$\begin{aligned}
 R_c = & 89.23 + 35.99x\%ADD - 5.18x\%NAOH + 8.37x\%ADDx\%NAOH \\
 & - 5.60x\%ADD^2x\%NAOH + 0.03x\%ADD^3x\%NAOH^2 \\
 & + 0.26x\%ADD^4x\%NAOH
 \end{aligned}
 \tag{VI.4}$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de la variable de sortie (R_c) est présentée dans la Figure VI.15. Les résultats montrent une excellente concordance entre les valeurs numériques prédites par le modèle et les valeurs expérimentales mesurées, ce qui confirme la validité de l'équation (VI.4) pour prédire la sortie (R_c) en fonction des facteurs d'entrée (%ADD et %NaOH). Ces observations indiquent que le modèle de régression quadratique est capable de représenter avec précision la relation fonctionnelle entre les variables d'entrée et la variable de sortie.

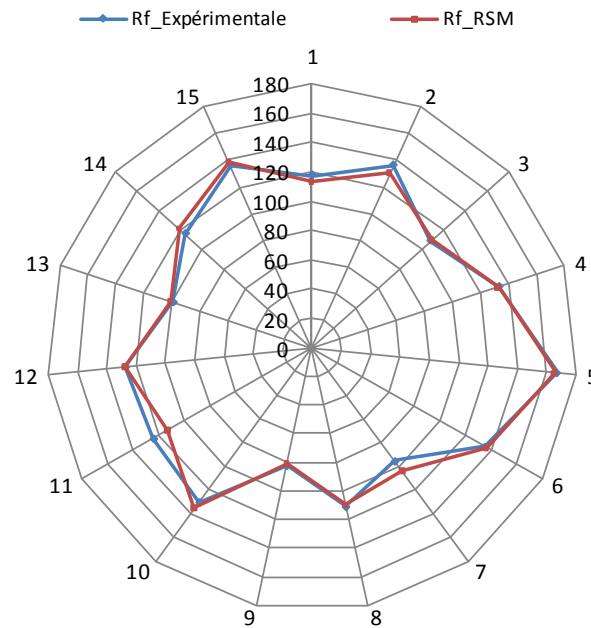


Figure VI.15 : Valeurs expérimentales et valeurs prédites de l'indice CBR.

VI.7. Optimisation par la méthode de fonction de désirabilité

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres de traitement du sol, chaque paramètre dans la conception (*MSR*) a été étudié à différents niveaux, l'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (*MSR*) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble.

L'optimisation de réponses multiples est une méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1.

Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal [9].

a. Désirabilité d'une réponse à maximiser

Un exemple de fonction de désirabilité individuelle (d_i) dans le cas d'une réponse à maximiser, est représenté sur la figure VI.16. La valeur de 0 (une désirabilité individuelle prenant la valeur nulle) est attribuée lorsque les facteurs conduisent à une réponse inacceptable (non désirée) et celle de 1 lorsque la réponse représente la performance maximale désirée pour les facteurs considérés.

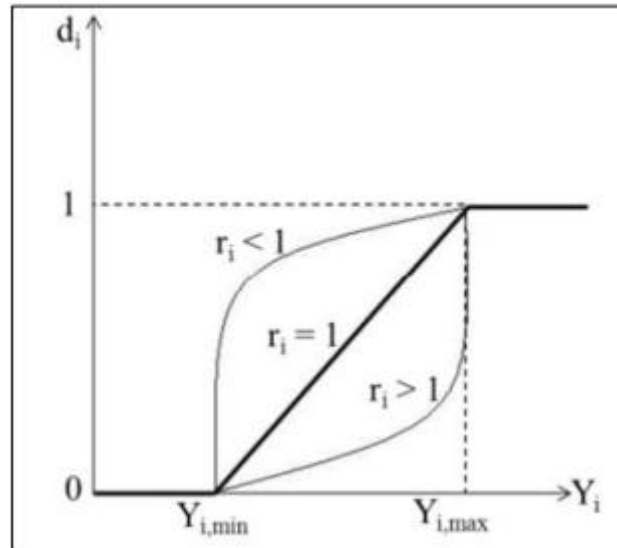


Figure VI.16 : Désirabilité individuelle d_i d'une réponse Y_i .

L'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être ainsi présentée:

$$\begin{aligned}
 d_i &= 0, \text{ Si } Y_i \leq Y_{i,min} \\
 d_i &= \left[\frac{Y_i - Y_{i,min}}{Y_{i,max} - Y_{i,min}} \right] \text{ Si } Y_{i,min} \leq Y_i \leq Y_{i,max} \quad (\text{VI.5}) \\
 d_i &= 1, \text{ Si } Y_i \geq Y_{i,max}
 \end{aligned}$$

Avec:

$Y_{i,min}$: valeur en dessous de laquelle la réponse Y_i ne convient pas ($d_i = 0$),

$Y_{i,max}$: valeur cible au-dessus de laquelle la réponse Y_i est très satisfaisante ($d_i = 1$).

b. Désirabilité d'une réponse à minimiser

Lorsque l'on cherche à minimiser une réponse, la fonction de désirabilité peut être tracée comme le montre la figure VI.17.

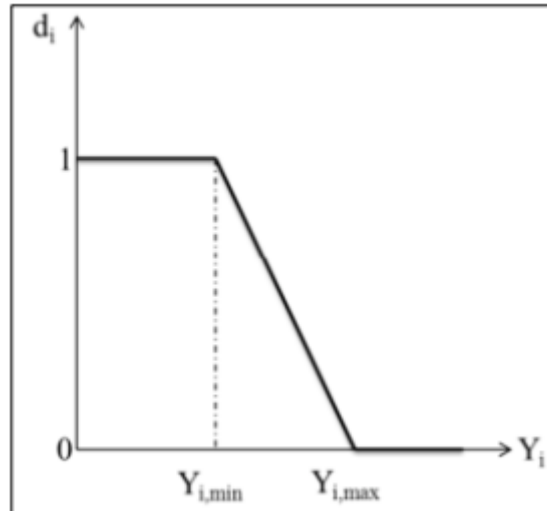


Figure VI.17 : Fonction de désirabilité d'une fonction à minimiser.

Dans ce cas, la fonction de désirabilité est nulle quand la réponse dépasse la valeur limite ($Y_{i, \max}$), elle vaut 1 lorsque la réponse est inférieure ou égale à la valeur cible ($Y_{i, \min}$). L'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être ainsi présentée .

$$\begin{aligned}
 d_i &= 1, \text{ Si } Y_i \leq Y_{i, \min} \\
 d_i &= \left[\frac{Y_i - Y_{i, \max}}{Y_{i, \min} - Y_{i, \max}} \right] \text{ Si } Y_{i, \min} \leq Y_i \leq Y_{i, \max} \quad (\text{VI.6}) \\
 d_i &= 0, \text{ Si } Y_i \geq Y_{i, \max}
 \end{aligned}$$

Avec : $Y_{i, \min}$, la valeur cible en dessous de laquelle la réponse Y_i est très satisfaisante ($d_i = 1$),

$Y_{i, \max}$: la valeur au-dessus de laquelle la réponse Y_i ne convient pas ($d_i = 0$).

c. Désirabilité d'une réponse à cibler

Dans le cas où l'on souhaite avoir une valeur cible d'une réponse, la fonction de désirabilité individuelle est représentée sur la figure VI.20.

Si on cherche par exemple une valeur cible Y_c de la réponse Y_i , l'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être présentée de la façon suivante:

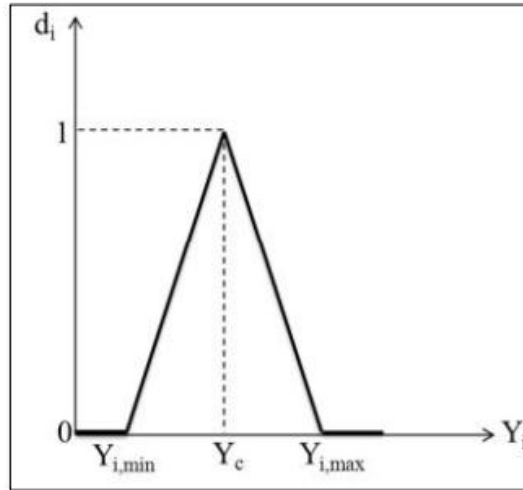


Figure VI.18 : Fonction de désirabilité d'une fonction à cibler.

$$\begin{aligned}
 d_i &= 0, \text{ Si } Y_i \leq Y_{i,\min} , Y_i \geq Y_{i,\max} \\
 d_i &= \left[\frac{Y_i - Y_{i,\min}}{Y_{i,c} - Y_{i,\min}} \right] \text{ Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,c} \\
 d_i &= \left[\frac{Y_i - Y_{i,\max}}{Y_{i,c} - Y_{i,\max}} \right] \text{ Si } Y_{i,c} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \\
 d_i &= 1, \text{ Si } Y_i = Y_c
 \end{aligned} \tag{VI.7}$$

La fonction de désirabilité vaut 1 lorsque la réponse est égale à la valeur cible cherchée. Elle vaut zéro si la réponse est en dessous ou au-dessus des valeurs $Y_{i,\min}$ et $Y_{i,\max}$ précisées.

d. Optimisation de la formulation du bio-composite

Les contraintes utilisées pendant le processus d'optimisation sont illustrés dans le tableau VI.9. Les valeurs des paramètres optimales sont obtenues en utilisant le logiciel «*Design Expert V10*». Le problème revient à cibler la fonction de désirabilité (D) qui est la fonction objective sous les contraintes des variables.

Tableau VI.9. Contraintes appliquées sur les paramètres à optimiser.

Paramètre	Objectif	Limite inférieure	Limite Supérieure	Poids inférieur	Poids Supérieur	Importance
A:% ADD	intervalle	0.5	2.5	1	1	3
B:% NAOH	intervalle	3	9	1	1	3
CBR	maximisé	5.783	9.635	1	1	3
Rc	maximisé	19.67	43.68	1	1	3
Edyn	maximisé	82.435	167.585	1	1	3

Le tableau VI.10 illustre les valeurs optimales des paramètres de traitement du sol.

Tableau VI.10. Résultats de l'optimisation.

N°	A:% ADD	B:% NAOH	CBR	Rc	Désirabilité	
1	1,578	3,000	9,342	134,297	0,750	Selected
2	1,577	3,000	9,342	134,296	0,750	
3	1,573	3,000	9,345	134,246	0,750	
4	1,567	3,000	9,350	134,167	0,750	
5	1,562	3,000	9,352	134,098	0,750	

Le graphique de la solution optimale désirée est donné dans la figure VI.19. Cette figure montre la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres optimisés pour obtenir une valeur maximale du groupe de réponses.

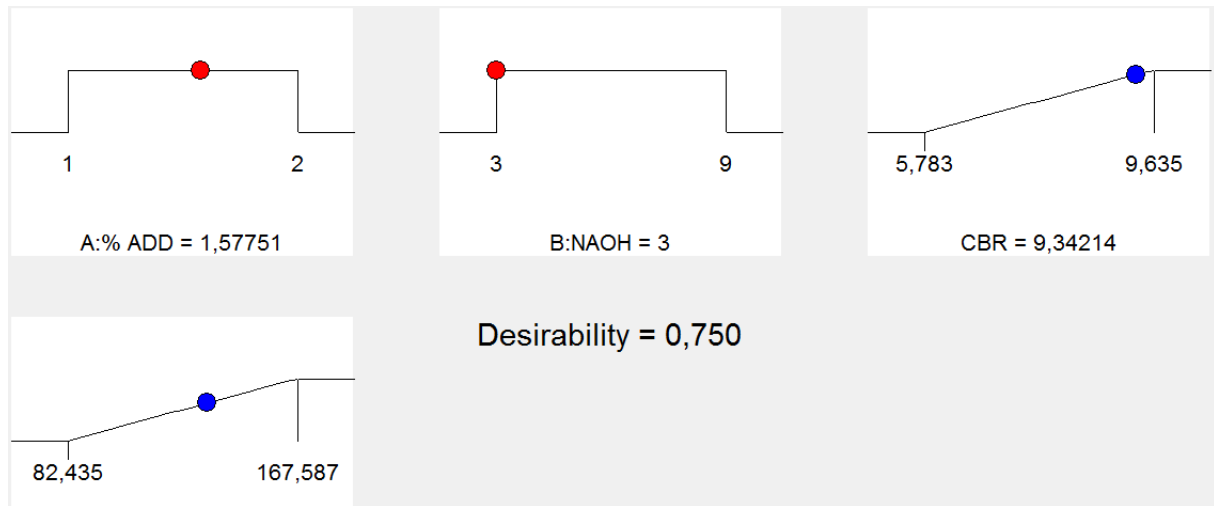


Figure VI.19 : Représentation graphique de la procédure d'optimisation.

V.8 Conclusion

En conclusion, l'étude statistique présentée utilise l'analyse de la variance (ANOVA) et la méthode de surface de réponse pour identifier les facteurs les plus significatifs qui influencent le comportement mécanique du sol traité. Les résultats indiquent que le pourcentage d'additif (%ADD) est le facteur le plus important qui influe sur les réponses traitées. De plus, les modèles de régression quadratique obtenus présentent une forte corrélation entre les variables d'entrée et de sortie, ce qui permet de prédire avec précision les réponses en fonction des facteurs étudiés. Ces résultats peuvent être utiles pour optimiser les paramètres de traitement et améliorer les propriétés mécaniques du sol.

Ainsi, la méthode d'optimisation proposée à la fin de cette étude a permis d'identifier les paramètres de formulation du produit de traitement. Cette étude montre que l'application de la méthode (ici, à l'aide de la méthode de surface de réponse) ne représente aucune difficulté particulière et démontre que, dans les cas les plus simples, les valeurs souhaitées peuvent être trouvées sans faire appel à des méthodes d'optimisation complexes.



CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La stabilité des sols argileux a été étudiée par de nombreux chercheurs, qui ont développé de nombreuses méthodes et dispositifs pour minimiser les problèmes associés à ces sols. Les techniques de traitement les plus couramment utilisées dépendent de divers paramètres, tels que les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la disponibilité des matériaux à utiliser et les conditions environnementales.

Le traitement des sols argileux avec des déchets végétaux présente de nombreux avantages en géotechnique, offrant une solution aux problèmes caractéristiques de ces sols, tels que leur faible stabilité, leur sensibilité à l'eau et leurs variations de volume. L'objectif de ce travail était d'étudier l'influence du traitement utilisé sur les caractéristiques physiques et mécaniques d'un matériau argileux.

Les résultats ont conduit à plusieurs conclusions : une diminution de la teneur en eau optimale de la courbe de compactage Proctor Normal accompagnée d'une augmentation de la masse volumique sèche maximale (de 1,69 à 1,81 g/cm³). L'ajout d'additifs avec le sol argileux augmente la résistance à la compression, et plus le pourcentage d'additifs dans le mélange est élevé, plus la résistance est grande. La résistance à la compression a été nettement améliorée avec l'ajout de 2,5 % d'additifs, atteignant une valeur maximale de 176,6 KPa.

Une méthodologie statistique robuste a été utilisée à la fin de cette étude pour identifier les facteurs les plus significatifs qui influencent le comportement physico-mécanique des sols renforcés par des fibres végétales. L'analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour déterminer les facteurs les plus importants qui influencent les réponses mesurées. Selon l'ANOVA, le pourcentage d'additifs est le facteur le plus important qui affecte les réponses mesurées. En utilisant la méthode de surface de réponses, il est possible d'établir la relation entre les variables d'entrée et les variables de sortie. Les modèles de régression quadratique obtenus ont montré une forte corrélation entre les variables d'entrée et les variables de sortie, ce qui permet de prédire avec précision les réponses en fonction des facteurs étudiés.

De plus, la méthode d'optimisation proposée à la fin de cette étude a permis d'identifier les paramètres du sol traité. Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour améliorer la compréhension et l'optimisation des propriétés mécaniques des matériaux argileux renforcés

par des déchets végétaux. Les perspectives de cette étude sont nombreuses et incluent des études supplémentaires sur les propriétés mécaniques des fibres végétales utilisées, l'utilisation de d'autres types de fibres, le développement de traitements chimiques avec différentes concentrations, ainsi que l'analyse des interactions physico-chimiques aux interfaces entre les fibres végétales et la matrice argileuse.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] K. Moussaceb. Analyse et Caractérisation physico-chimique des Sols d'Entreposage de la station de Pétrole, Université Abderrahmane Mira – Bejaia (2014).
- [2] HAMLAOUI Asma. Comportement d'une marne stabilisée par différents agents de traitement .Mémoire de Master. Université 8Mai 1945-Guelma (2021).
- [3] F.Lamas, C. Irigaray, C.Oteo,J. Chacon.Selection of the most appropriate method to determine the carboate content for engineering purposes with particular regard to marls. Enginnering Geology (2005).
- [4] Site internet : [https://www.wikipedia.org/wiki/Marne_\(géologie\)](https://www.wikipedia.org/wiki/Marne_(géologie))
- [5] Aissaoui Nesrine, Bencheikh Mohammed et Ouadja Gbati Malick. 2015. Traitement des sols fins en vue de leur utilisation dans les remblais routiers. Mémoire Master. Université 8 mai 1945 de Guelma
- [6] GUEFAIFIA Lamia & BENRDJEM Hiba . traitement et renforcement d'un sol fin par différentes techniques d'amélioration : etude experimentale et numerique . Mémoire Master. Université 8Mai 1945-Guelma (2021).
- [7] Belhouchet Afef et Hadji Bouchra. Effets de l'ajout du sable sur les caractéristiques géotechniques des sols argileux . Mémoire Master . UNIVERSITEL'ARBI BENM'HIDIOUM ELBOUAGHI (2021).
- [8] Pierre Rossi ; Ludovic Gavois ; Guy Raoul Assises des vallées compressibles - Approches géologique et géotechnique. Technique de l'ingénieur 2014.
- [9] Karine SFAR « T H E FIBER LAB Episode 1 : Les Fibres Chimiques » La Fédération de la Maille, de la Lingerie & du Balnéaire, 2019.
- [10] F. Michaud, ''Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage'' thèse Phd, univ Laval, 2003.
- [11] S .ABANI, Mémoire de Magister, caractérisation et durabilités des béton renforcés de fibres végétales de palmier dattier Béton de Fibre de palmier datte . Université de Ouargla 2003
- [12] CHEIKHI Laila.Thèse « Etudes empiriques des relations entre les modèles de qualité du logiciel DTSSO 9126 en utilisant le référentiel de données DTSSBSG et la méthode Taguchi»,école de technologie supérieureuniversité du QUEBEC.montreal, le 6 mars 2008.
- [13] <https://www.rocq.inria.fr/axis/modulad/numero-34/Goupy-34/goupy-34.pdf> vu le 21/02/2020 à 22:10.
- [14] Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., Zadhoush, A. (2012) A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. Construction and building materials. Vol. 30«<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=GRILLIER+Jean-Claude.VII-210%2C+livre+%C2%ABComprendre+les+plans+d%E2%80%99exp%C3%A9riences+Taguchi%C2%BB+AFNOR-+Janvier+2017-MAJ+62>»vu le 20/02/2020 à 21:56.

[15] BOUZIDI Adlen-BADEK Mhand. « Modélisation et optimisation mono et multi objectif des paramètres de coupe Lors de tournage d'un acier inoxydable 304L », Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en fabrication mécanique et productive ; Université Saad Dahleb de Blida 1, Faculté de Technologie, département de mécanique. 2018-2019

[16] ALEXIS J., «Pratique industrielle de la méthode Taguchi les plans d'expériences», Paris, Edition AFNOR, 1995.

[17] Sandrine KARAM, 2004. Thèse de doctorat « Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt », Université de LIMOGES.

[18] GOUPY Jacques. Lee Creighton. Livre « Introductions aux plans d'expériences ». 3^e édition, 25 octobre 2006.

[19] <https://www.e-marketing.fr/Thematique/academie-1078/fiche-outils-10154/Le-plan-d-experience-324909.htm#> vu le 23/02/2020 à 19:48.

[20] Dr. YAHIAOUI Idris ; «Les plans d'expériences Initiation à la construction et l'analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centre », Université A. MIRA – Bejaia Faculté de Technologie Département de Génie des Procédés ; 2014/2015

[21] <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/taguchi-designs/> vu le 10/03/2020 à 19:30