

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 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : V.O.A.

Présenté par : BOUHALIT AHMED

DRARDJA IKRAME

---

**Thème : AMELIORATION DES PROPRIETES  
GEOTECHNIQUES D'UN SOL ARGILEUX PAR LA  
POUDRE DE CERAMIQUE (CARACTERISTIQUES  
ET OPTIMISATION)**

---

Sous la direction de : Dr. BOUTAHIR NEE BENCHEIKH M

---

Juin 2024

---



# Remerciements

*Tout d'abord nous remercions dieu le tout puissant  
qui nous a donné le courage et la force d'achever ce  
travail.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur  
Mme Boutahir Née Bencheikh M de nous avoir proposé ce sujet de  
recherche, ainsi que pour son soutien et ses précieux  
conseils.*

*Nous tenons à remercier également le jury d'avoir  
accepté l'évaluation de ce travail.*

*Nous exprimons nos sincères reconnaissances a  
l'égard de tous ceux qui ont contribué à notre  
formation, particulièrement nos enseignants.*

## إهداء

لى من كلل العرق جبينه و من علمني ان النجاح لا يأتي إلا بالصبر و الإصرار  
إلى النور الذي أثار دربي و السراج الذي لا ينطفئ نوره بقلبي أبداً  
من إستمدت منه قوتي و اعتزازي بذاتي  
( والدي العزيز )

إلى من جعل الله عز وجل الجنة تحت أقدامها و سهلت لي الشدائد بدعائها  
إلى الإنسانية العظيمة التي لطالما تمننت أن تفر عينيها لرؤيتي في يوم كهذا  
( أمي العزيز )

إلى ضلع الثابت و أماني أيامي إلى ما شددت عظمي بهم فكانوا لي ينباع أرتوي منها  
....إلى خيرة أيامي وصفوتها إلى قرّة عيني  
( إلى أخواتي و أخي الغاليين )

إلى زوجي الذي كان لي السند و الضلع الثابت الذي لا يميل  
( علاء الدين )

لكل من كان عوناً وسنداً في هذا الطريق للأصدقاء الأوفياء ورفقاء السنين

الأصحاب الشدائد والأزمات كل بإسمه يسرى، هيبه، آية، بلقيس، نور الهدى، نوال، وحيدة (إلى من أفاضني بمشاعره  
ونصائحه المخلصة إليكم عائلتي أهدىكم هذا الانجاز وتمرّة نجاح التي لا طالما تمنيتّه ها أنا اليوم أكملت و أتممت أول  
ثمارته بفضلته سبحانه وتعالى الحمد لله على ما وهبني وأن يجعلني مباركا وأن يعينني أينما كنت فمن قال أنا لها نالها فأنا  
لها وإن أبت رغما عنها أتيت بها فالحمد لله شكراً وحباً وامتناناً على البدء والختام وآخر دعواهم أن  
....(الحمد لله رب العالمين )

## إكرام درارجة

## ***Dédicace***

*A tous ceux qui ont façonné ce chemin avec moi,*

*Je dédie ce travail, fruit de tant d'efforts et de passion.*

*Je souhaite dédier humblement ce travail à une personne très chère, à mon trésor perdu ;  
**'Yemma Hakima 'Kimou'**. Tu es partie bien trop tôt, mais ton amour reste présent et  
puissant. Merci, Grand-mère, de nous avoir transmis cette force et ce courage dont tu nous  
parlais tant.*

*A mes **chers parents**, qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me  
soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs. C'est grâce à vos  
encouragements et vos bienveillances, que j'ai réussi ce respectueux parcours. Aucune  
dédicace ne saurait véritablement exprimer mes sincères sentiments.*

*J'adresse ma grande gratitude à **mes deux sœurs et mon petit frère**, que Dieu les garde et  
les protège.*

*Enfin à ceux que j'aime et à ceux qui m'aiment.*

**Ahmed BOUHALIT**

# Résumé

La population et l'expansion industrielle dans le monde nécessitent la construction de nouvelles infrastructures, y compris des routes et des autoroutes. Cependant, les spécialistes du domaine rencontrent plusieurs problèmes et défis lors de l'implantation de routes, en particulier sur les sols argileux. L'approche récente consiste à améliorer les propriétés de ces sols, telles que leur résistance, leur plasticité et leur stabilité, afin de réduire les risques de problèmes tels que le gonflement. L'utilisation de nouveaux agents de stabilisation, tels que les déchets de poudre de céramique calcinée CW, est de plus en plus étudiée. Ces produits sont moins coûteux que la chaux et le ciment traditionnels et ont un impact environnemental plus faible. L'objectif principal de notre travail est de contribuer à la valorisation des déchets de poudre de céramique calcinée CW, dans l'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques d'un sol argileux utilisé comme remplacements partiels à différents dosages, et de réduire l'influence de ce déchet sur l'environnement.

Dans le cadre de cette étude, une approche expérimentale et d'optimisation a été adoptée. L'étude expérimentale a consisté à réaliser des essais sur différents échantillons d'une argile gonflante provenant de la région d'Elkharba, Wilaya de Mila, en utilisant des dosages de CW variant de 3% à 18% avec un pas de 3%. Cette démarche visait à réduire l'impact environnemental de ce déchet et à développer un nouveau matériau de stabilisation pour cette argile, en optimisant ses caractéristiques géotechniques telles que la résistance à la compression ( $R_c$ ) et le poids volumique sec maximal ( $gd_{max}$ ). La méthode de surface de réponse (RSM) a été employée pour optimiser les paramètres expérimentaux.

**Keywords :** poudre de céramique, gonflement, optimisation, étude expérimentale,

# Abstract

The global population and industrial expansion necessitate the construction of new infrastructures, including roads and highways. However, specialists in the field face several issues and challenges when implementing roads, particularly on clay soils. The recent approach involves improving the properties of these soils, such as their strength, plasticity, and stability, to reduce the risk of problems like swelling. The use of new stabilization agents, such as calcined ceramic waste powder (CW), is being increasingly studied. These products are less expensive than traditional lime and cement and have a lower environmental impact. The main objective of our work is to contribute to the valorization of calcined ceramic waste powder (CW) in improving the physical and mechanical characteristics of clay soil used as partial replacements at different dosages, and to reduce the environmental impact of this waste.

In this study, an experimental and optimization approach was adopted. The experimental study involved conducting tests on different samples of a swelling clay from the Elkharba region, Wilaya of Mila, using CW dosages ranging from 3% to 18% in 3% increments. This approach aimed to reduce the environmental impact of this waste and to develop a new stabilization material for this clay by optimizing its geotechnical characteristics such as compressive strength ( $R_c$ ) and maximum dry density ( $gd_{max}$ ). The response surface methodology (RSM) was employed to optimize the experimental parameters.

**Keywords:** calcined ceramic powder, swelling, optimization, experimental study

# ملخص

يتطلب النمو السكاني والتوسع الصناعي في العالم بناء بنية تحتية جديدة، بما في ذلك الطرق والطرق السريعة. ومع ذلك، يواجه المتخصصون في هذا المجال العديد من المشكلات والتحديات عند تنفيذ الطرق، لا سيما على التربة الطينية. النهج الحديث يتضمن تحسين خصائص هذه التربة، مثل قوتها ومرونتها واستقرارها، للحد من مخاطر المشكلات مثل الانتفاخ. يتم دراسة استخدام عوامل التثبيت الجديدة، مثل نفايات مسحوق السيراميك المكلس (CW)، بشكل متزايد. هذه المنتجات أقل تكلفة من الجير والأسمت التقليديين ولها تأثير بيئي أقل. الهدف الرئيسي من عملنا هو المساهمة في استغلال نفايات مسحوق السيراميك المكلس (CW) في تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للتربة الطينية المستخدمة كاستبدالات جزئية بجرعات مختلفة، وتقليل التأثير البيئي لهذه النفايات.

في إطار هذه الدراسة، تم اعتماد نهج تجريبي وتحسين. تمثلت الدراسة التجريبية في إجراء اختبارات على عينات مختلفة من طين منتفخ من منطقة الخربة، ولاية ميله، باستخدام جرعات من مسحوق السيراميك المكلس (CW) تتراوح من 3% إلى 18% بزيادة قدرها 3%. هدفت هذه الخطوة إلى تقليل التأثير البيئي لهذه النفايات وتطوير مادة تثبيت جديدة لهذا الطين من خلال تحسين خصائصه الجيوتقنية مثل مقاومة الانضغاط ( $R_c$ ) والكثافة الجافة القصوى ( $\gamma_{dmax}$ ). تم استخدام طريقة سطح الاستجابة (RSM) لتحسين المعلمات التجريبية.

الكلمات المفتاح : مسحوق السيراميك المكلس، الانتفاخ، التحسين، دراسة تجريبية

# Table Des Matières

	Page
Remerciement	
Dédicaces	
Résumé	i
Abstract	iii
ملخص	iv
Table des matières	v
<b>Chapitre I : Analyse bibliographique des propriétés des sols naturels</b>	
I.1 Introduction	1
I.2. Généralité sur le sol.	1
I.2.1. La phase solide.	2
I.2.2. La phase liquide.	2
I.2.3. La Phase gazeuse.	2
I.3. Caractéristiques des sols.	3
I.3.1. Caractéristiques minéralogiques.	3
I.3.1.1. Minéraux primaires.	3
I.3.1.2. Minéraux secondaires.	3
I.3.1.3 Sels solubles.	3
I.3.1.4. Matières organiques.	3
I.3.2. Caractéristiques physico-mécaniques	4
I.4. Classification des sols.	4
I.4.1. Classification USCS/LCPC.	5
I.4.1.1. Sols grenus.	5
I.4.1.2. Sols fins	6
I.4.2. Classification des sols selon la nomenclature GTR (norme NF P 11 300)	7
I.4.3. Système de classification AASHTO.	8
I.5. Diverses catégories de sols fins existent.	9
I.5.1 Argile	9
I.5.1.1. Kaolinite (Kaolin)	9
I.5.1.2. Montmorillonite	9
I.5.1.3. Illite	10
I.5.2. Limons	11
I.5.3. Vases	11
I.5.4. Marne	11
I.6. Les problèmes les plus souvent des sols argileux	11
I.6.1. Phénomène de gonflement	11
I.6.2. Phénomène de tassement	12
I.6.3. Phénomène de glissement	12
I.7. Conclusion	13

**Chapitre II : Techniques d'amélioration des sols médiocres**

II.1 Introduction	14
II.2. L'amélioration des sols.	14
II.3. Méthodes de stabilisation des sols.	15
II.3.1. Méthodes mécaniques.	16
II.3.1.1. Compactage de surface.	16
II.3.1.2. Compactage dynamique.	16
II.3.1.3. Vibro-compactage	17
II.3.1.4. Colonnes ballastées.	18
II.3.2. Méthodes hydromécaniques.	18
II.3.2.1. Pré chargement ou Pré-compression.	18
II.3.2.2. Accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux.	19
II.3.2.3. Drains préfabriqués.	20
II.3.3. Méthodes thermiques.	20
II.3.3.1. Déshydratation.	21
II.3.3.2. Congélation.	21
II.3.4. Stabilisation chimique.	22
II.3.4.1. Utilisation de la chaux.	23
II.3.4.2. Stabilisation par le ciment.	24
II.3.4.3. Utilisation des ajouts cimentaires.	26
II.3.5. Stabilisation par les matériaux céramiques.	26
II.3.5.1. Domaine d'utilisation de la céramique.	26
II.3.5.2. Classification.	27
II.4. Le marché des céramiques.	29
II.5. Le recyclage de déchet de céramique.	30
II.5.1. Réduction des Déchets et Impact Environnemental.	30
II.5.1.1 Amélioration des Sols.	30
II.5.1.2 Matériaux de Remblai.	31
II.5.1.3 Applications en Construction Routière.	31
II.5.2. Avantages Économiques	31
II.6. Conclusion	31

**Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés et protocole expérimental**

III.1. Introduction	32
III.2 Matériaux utilisés	32
III.2.1 Sol argileux	32
III.2.1.1. Localisation du prélèvement	32
III.2.1.2. Situation géographique de la zone d'étude.	33
III.2.1.3. Cadre géologique générale	33
III.2.2. La céramique calcinée.	34
III.2.3. ciment	34
III.3. Les essais d'identification.	34
III.3.1. Caractérisation chimique.	35
III.3.1.1. Essai au bleu de méthylène.	35
III.3.2. Les essais physiques.	37
III.3.2.1. Mesure de la masse volumique absolue de l'argile : (NF XP P 94-054).	37

## Table Des Matières

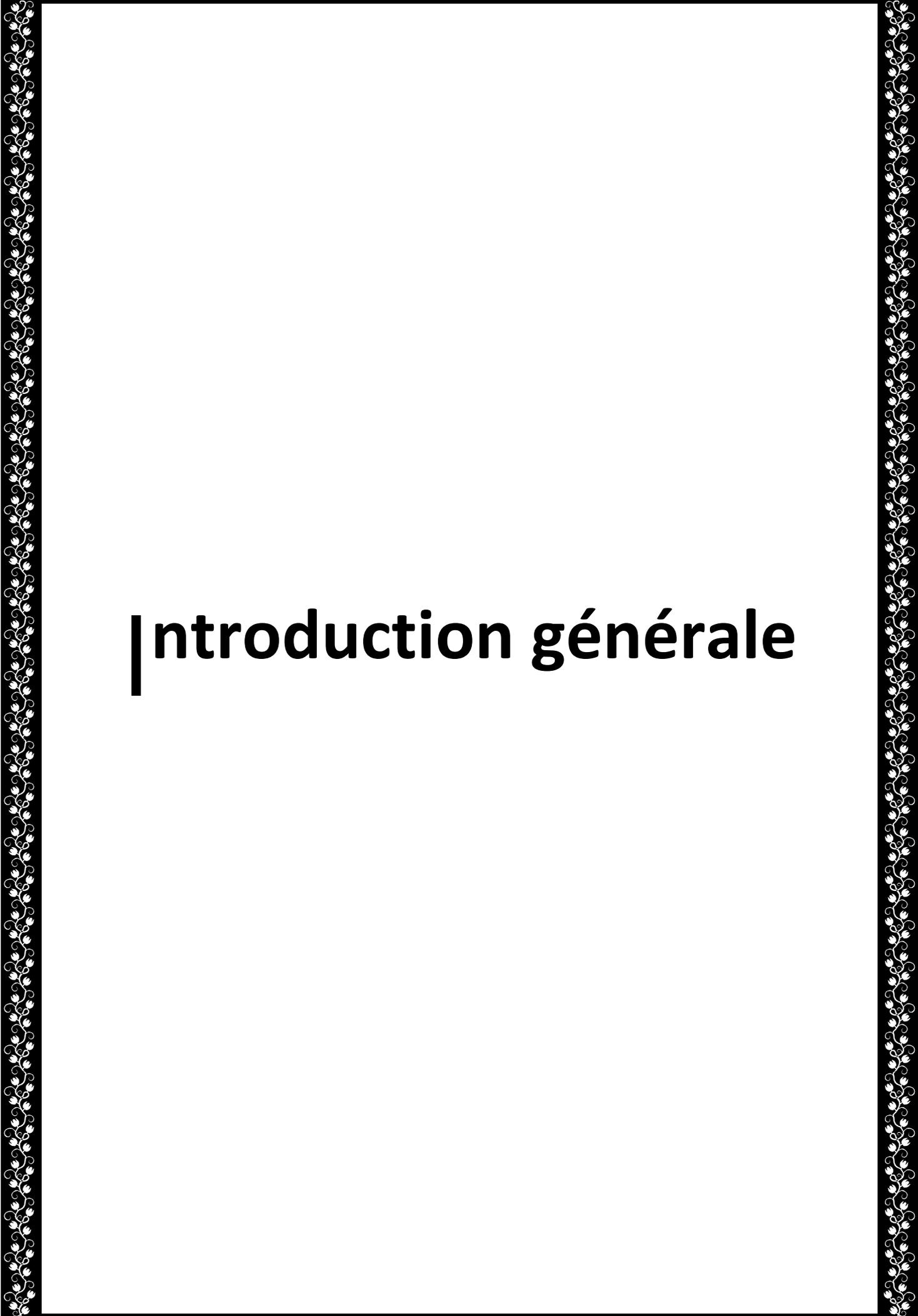
III.3.2.2. La masse volumique absolue de la céramique calcinée : (NF XP P 94-054)	
III.3.2.3. Granulométrie par diffraction laser pour la céramique	39
III.3.2.4. La teneur en eau de sol (NF P 94-050).	40
III.3.2.5. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) et sédimentométrie (NF P 94-057).	41
III.3.2.6. Les limites d'Atterberg (NF P 94 – 051).	43
III.3.2.7. Classification de notre sol selon USCS.	47
III.3.3. Essais mécanique	48
III.3.3.1. L'essai Proctor	48
III.3.3.2. Essai de CBR : (California Bearing Ratio test) Norme NF P 94-078.	50
III.3.3.3. Compression simple non confinée (l'EN 12390-4).	53
III.3.3.4. Essai de cisaillement rectiligne à la boîte (EN 12390-3) .	54
III.3.3.5. Essai de gonflement à l'oedomètre (NF P 94-91).	57
III.4. Conclusion.	59

## **Chapitre IV : Concepts Fondamentaux des Plans d'Expériences**

IV.1. Introduction.	61
IV.2. Termes et concepts communs des plans d'expériences	61
IV.3. Cas d'utilisation des plans d'expériences.	62
IV.4. Objectifs d'utilisation des plans d'expériences.	63
IV.4.1 Objectif de comparaison d'alternatives.	63
IV.4.1.1 Objectif de criblage.	63
IV.4.1.2 Objectif de modélisation.	63
IV.5. Quelques notions sur la MPE.	64
IV.5.1. Notions d'espace expérimental.	64
IV.5.2. Coordonnées centrées réduites.	65
IV.5.2.1. Changement de l'unité de mesure	65
IV.5.2.2. Déplacement de l'origine des mesures	65
IV.5.2.3. Domaine d'étude.	65
IV.5.3. Notion sur la représentation des plans d'expérimentation	66
IV.5.3.1. Représentation géométrique.	66
IV.5.3.2. Représentation matricielle.	67
IV.6. Différents plans d'expériences existants.	67
IV.6.1. Plan factoriel complet (PFC).	67
IV.6.2. Plan factoriel fractionnaire.	68
IV.6.3. Plan Rechtschaffner	68
IV.6.4. Plans de Plackett et Burman.	68
IV.6.5. Plans de Koshal.	68
IV.6.6. Tables de Taguchi.	69
IV.7. Différents types des plans d'expérience.	69
IV.7.1. Plans factoriels complets à deux niveaux	69
IV.7.1.1. Plans complets à deux facteurs	69
IV.7.1.2. Plans factoriels à k facteurs à deux niveaux :	69
IV.7.2. Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux	70
IV.8. Méthode d'optimisation	70
IV.8.1. RSM (response surface méthodologie):	70
IV.8.2. Les Principes généraux.	70
IV.8.3. Étapes de la méthodologie de surface de réponse.	71
IV.8.3.1. La première étape	71

## Table Des Matières

IV.8.3.2. La deuxième étape.	71
IV.8.3.3. La troisième étape.	72
II.9 Conclusion.	72
<b>Chapitre V : Présentation, interprétation et optimisation des résultats</b>	
V.1. Introduction	73
V.2. Choix de mode de traitement.	73
V.3. Préparation du mélange.	74
V.4. Influence de la céramique calcinée sur l'absorption du Bleu de Méthylène.	75
V.5. Influence de la céramique calcinée sur les limites d'ATTERBERG	76
V.5.1. Variation de la limite de liquidité.	78
V.5.2. Variation de limite de plasticité.	79
V.5.3. Variation de l'indice de plasticité.	
V.5 Influence de la céramique calcinée sur les caractéristiques de compactage.	80
V.5.1. Poids volumique sec maximal $\rho_{dmax}$ (T/m <sup>3</sup> )	80
V.6. Influence de céramique calcinée sur les caractéristiques mécaniques de CBR .	81
V.7. Influence de céramique calcinée sur la résistance à la compression simple non confinée.	83
V.8. Impact la céramique calcinée sur la variation du gonflement et de la consolidation du sol .	85
V.7. Analyse statistique	88
V.7.1. Analyse de variance ANOVA	88
V.7.2. Analyse de régression.	89
V.7.3. Estimation des coefficients.	90
V.7.4. Optimisation des paramètres d'influence ( % d'argile, % CW et % C%).	91
V.10. Conclusion.	92



# Introduction générale

### *Introduction générale*

**L**es sols à problème sont des sols qui présentent des caractéristiques défavorables limitant leur utilisation dans les travaux de construction ou d'agriculture. Ces caractéristiques peuvent être d'origine naturelle ou anthropique et se manifester par une faible portance, une instabilité due aux risques de glissements de terrain, de tassements ou de liquéfaction, une mauvaise perméabilité, et une contamination par la présence de polluants qui peuvent nuire à la santé humaine et à l'environnement.

**O**n distingue plusieurs types de sols à problème parmi les plus courants : les sols argileux, caractérisés par une forte teneur en argile, ce qui les rend gonflants et susceptibles de retrait important en fonction du taux d'humidité ; les sols sableux, caractérisés par une faible cohésion et une grande perméabilité, limitant leur capacité à supporter des charges et à retenir l'eau ; les sols tourbeux, riches en matière organique, compressibles et ayant une faible portance ; les sols acides, dont le pH bas peut affecter la croissance des plantes et provoquer la corrosion des infrastructures ; et enfin, les sols salins, où l'accumulation de sels minéraux rend le sol impropre à l'agriculture et susceptible de corrosion.

**L**a stabilisation des sols implique l'application de méthodes mécaniques, chimiques et biologiques. Parmi les agents chimiques, les substances traditionnelles comme le ciment Portland ont une teneur élevée en oxyde de calcium, ce qui améliore leur efficacité. L'oxyde de calcium joue un rôle crucial en facilitant des processus complexes, notamment l'échange de cations, la floculation et les réactions pouzzolaniques rapides avec les minéraux expansifs du sol. Cependant, les inconvénients économiques et environnementaux du ciment soulignent l'importance d'une construction respectueuse de l'environnement.

**C**es dernières années, on a assisté à une augmentation significative du développement de techniques d'amélioration des sols. Cela a conduit à l'utilisation d'une gamme diversifiée de matériaux, tels que les déchets de démolition, les cendres volantes, différents types de fibres, déchets plastiques, déchets de verre, poudre de roche, pneus en caoutchouc, laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBFS). Ces matériaux ont été largement utilisés dans différents projets, notamment les murs de soutènement, la stabilité des pentes et la capacité portante des fondations. Ces applications illustrent l'efficacité et la fiabilité de ces matériaux pour améliorer les propriétés des sols et promouvoir des pratiques de construction durables.

**L**es déchets de céramique, générés en grande quantité par l'industrie de la construction et de la rénovation, représentent un défi environnemental important. Leur accumulation dans les décharges pose des problèmes de pollution des sols et des eaux souterraines. Heureusement, des recherches récentes ont démontré le potentiel de valorisation des déchets de céramique dans les sols argileux, offrant une solution durable et écologiquement responsable à la gestion de ces déchets. L'incorporation de déchets de céramique broyés dans les sols argileux peut améliorer significativement leurs propriétés physico-mécaniques. En

effet, la céramique, constituée de silice, d'alumine et d'autres minéraux, présente une résistance mécanique élevée et une faible porosité. Broyée en granulats de taille adéquate, elle peut jouer le rôle de squelette au sein du sol argileux, augmentant sa résistance à la compression et réduisant sa plasticité.

**D**e plus, les déchets de céramique peuvent contribuer à l'amélioration de la perméabilité du sol argileux, limitant ainsi les problèmes de drainage et d'engorgement souvent rencontrés dans ce type de sol. La porosité inhérente à la céramique favorise la circulation de l'eau et de l'air au sein du sol, créant un environnement plus favorable à la croissance des plantes. La valorisation des déchets de céramique dans les sols argileux présente également des avantages économiques considérables. En réduisant la quantité de déchets envoyés dans les décharges, elle permet de minimiser les coûts d'élimination et de libérer des espaces précieux. De plus, l'utilisation de ces déchets comme matériau de construction alternatif peut contribuer à diminuer les coûts liés à l'acquisition de matériaux traditionnels.

**N**otre travail de fin de cycle de Master vise à explorer une méthode économique pour stabiliser une argile gonflante de la région de Elkhbarba, Wilaya de Mila, et à valoriser des déchets pour la stabilisation en utilisant différents dosages de céramique calcinée (de 3% à 18%) sans ou avec l'ajout de 2% de ciment comme liant hydraulique, en poids sec du sol. L'objectif est de comprendre l'influence de ces additifs sur le comportement physique et mécanique de l'argile gonflante à travers une série de tests en laboratoire, comprenant la détermination des limites d'Atterberg (LL, PL et PI), le calcul de la densité, l'évaluation des propriétés de compactage ( $\gamma_{dmax}$  et  $\omega_{opt}$ ), la mesure du CBR, l'évaluation de la résistance à la compression en fonction du temps de cure, ainsi que l'analyse des caractéristiques de cisaillement direct en premier lieu. En second lieu, l'étude vise à appliquer la méthode d'optimisation à travers la méthode de surface de réponse (RSM) pour mieux ajuster les paramètres influant sur les caractéristiques géotechniques de l'argile traitée, notamment l'indice CBR et l'indice de plasticité  $I_p$ . Cette approche méthodique permettra une compréhension approfondie des changements induits par les additifs dans les propriétés du sol, fournissant ainsi des données précieuses pour la stabilisation efficace des argiles gonflantes.

*Ce mémoire est scindé en cinq chapitres principaux :*

**D**ans le premier chapitre, nous avons fourni une bibliographie bien documentée sur les sols fins et leurs différents types, ainsi que sur les caractéristiques physiques et mécaniques de ces sols. Nous avons également présenté les différents systèmes de classification des sols, tels que la classification élémentaire, la classification USCS, et la classification LCPC.

**D**ans le deuxième chapitre, nous avons fait le point sur les techniques d'amélioration et de renforcement des sols fins en commençant par la présentation de la structure d'une chaussée routière et les travaux de terrassement. Ensuite, nous avons présenté les principaux

problèmes des sols argileux (tassement, gonflement, fluage, etc.) ainsi que les différentes techniques de traitement par stabilisation chimique. Nous avons également exposé les techniques de renforcement des ouvrages géotechniques.

**D**ans le troisième chapitre, nous avons présenté les propriétés des matériaux utilisés et la démarche expérimentale pour classer notre sol selon les différents systèmes de classification des sols.

**E**nsuite, dans le quatrième chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux des plans d'expériences afin de mieux utiliser la méthode de surface de réponse (RSM) pour optimiser les paramètres géotechniques.

**E**nfin, le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus de l'étude expérimentale réalisée dans notre laboratoire de recherche (LGCH). Ce chapitre inclut l'interprétation des résultats et l'optimisation des paramètres géotechniques tels la résistance à la compression  $R_c$  et le poids volumique de l'argile traitée  $\gamma_{dmax}$ .

# Chapitre I

*Analyse bibliographique des  
propriétés des sols naturels*

## Analyse bibliographique des propriétés des sols naturels

### I.1. Introduction

Devant les besoins croissant des ressources en matériaux et aux exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine de génie civil. Le traitement des sols est souvent opéré pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau comme dans le cas des sols expansifs.

### I.2. Généralité sur le sol.

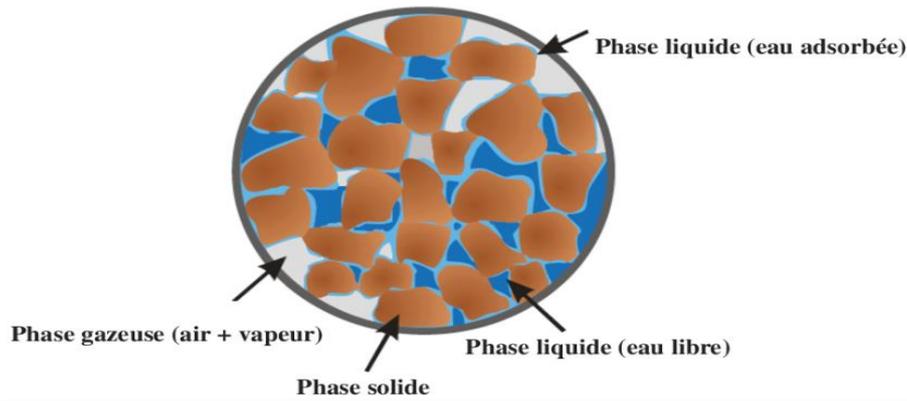
Le sol est défini par opposition au mot roche, dans sa définition géotechnique, c'est un matériau meuble. Les sols naturels sont constitués par un mélange de particules élémentaires de différentes dimensions et par suite de propriétés différentes. D'une manière générale, les propriétés d'un sol dépendront de la proportion de particules fines par rapport à la quantité des plus grosses. Pour étudier les propriétés mécaniques des sols, il est donc nécessaire d'en connaître la nature et de les classer.



**Figure I.1.** Exemples des différents types de sol

Donc un sol est un matériau hétérogène et anisotrope comportant des minéraux et des matériaux organiques. La présence de l'air et de l'eau font du sol un matériau complexe à effet du temps. Son comportement est non linéaire et irréversible d'où la nécessité de combiner essais en laboratoire et en place, analyse théorique et modélisation, expérience cumulée et bon jugement pour la réussite d'une étude géotechnique. [9] Nous schématiserons les sols comme étant composé de trois phases. Une phase solide composée de particules minérales solides et organiques. Une phase liquide sous différentes formes appelé : eau libre, eau interstitielle et pour finir une phase gazeuse.

$$\text{Sol} = \text{phase solide} + \text{phase liquide} + \text{phase gazeuse}$$



**Figure I.2.** Représentation d'un milieu poreux non saturé.

### I.2.1. La phase solide.

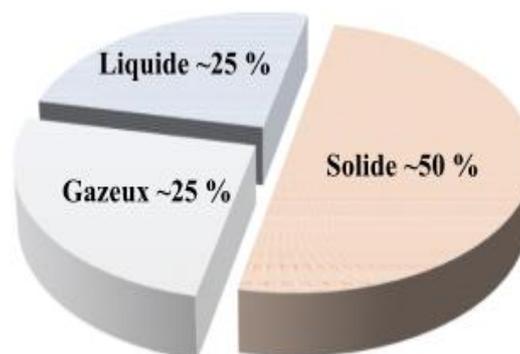
La phase solide d'un sol est constituée des particules minérales et organiques qui forment la structure principale du sol. Ces particules peuvent varier en taille, allant des gros grains de sable aux petites particules d'argile. elle inclut également des fragments de roches, des minéraux secondaires, et des matières organiques en décomposition.

### I.2.2. La phase liquide.

La phase liquide d'un sol se réfère à l'eau présente dans les interstices ou pores du sol. Cette eau peut être sous forme libre, occupant les espaces entre les particules solides, ou sous forme liée, adhérant aux surfaces des particules par capillarité et autres forces. Elle est essentielle pour divers processus physiques, chimiques et biologiques dans le sol, tels que la dissolution et le transport des nutriments, la régulation de la température, et la facilitation de la croissance des plantes.

### I.2.3. La Phase gazeuse.

La phase gazeuse d'un sol correspond aux gaz présents dans les pores du sol qui ne sont pas remplis par l'eau. Ces gaz comprennent principalement l'air atmosphérique, composé d'oxygène, d'azote, de dioxyde de carbone et de traces d'autres gaz, rôle crucial dans les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère.



**Figure. I.3.** La distribution moyenne (%) des différentes phases du sol.

### I.3. Caractéristiques des sols.

Les caractéristiques des sols dépendent de la nature du mélange complexe entre les différentes fractions granulaires. Selon la quantité de cailloux, de graviers, de sables, de limons, d'argiles, de colloïdes, de matières organiques, d'eau et de gaz.

#### I.3.1. Caractéristiques minéralogiques.

À l'intérieur de ces roches, il y a beaucoup de minéraux différents. Lorsque ces roches se décomposent, certains de ces minéraux se décomposent et forment des sols. Comme ces minéraux sont petits, ils dominent la partie argileuse du sol. Les sols sont souvent classés en quatre catégories (minéraux primaires, minéraux secondaires, sels et matières organiques) suivant leur composition, leur mode de formation et leur cause de formation.

##### I.3.1.1 Minéraux primaires.

Les minéraux primaires sont des minéraux qui se forment initialement dans les roches lors de leur cristallisation à partir du magma ou par d'autres processus géologiques primaires. Des minéraux tels que le **quartz**, les **feldspaths**, les **micas** et les **amphiboles** sont des exemples de minéraux primaires couramment trouvés dans les roches ignées. Cette catégorie de minéraux se retrouve souvent dans les sols grenus (sables grossiers, graviers, etc.).

##### I.3.1.2. Minéraux secondaires.

Les minéraux secondaires sont des minéraux qui se forment à partir de la transformation géochimique des minéraux primaires sous l'effet de conditions environnementales telles que l'altération et la météorisation. Ils résultent souvent de réactions chimiques complexes qui modifient la composition et la structure des minéraux initiaux. Par exemple, la formation de minéraux argileux comme la kaolinite à partir de la décomposition de minéraux primaires tels que les feldspaths est un processus courant.

##### I.3.1.3. Sels solubles.

Les sels solubles font référence à des composés chimiques dissous dans l'eau présents dans les sols. Ces sels comprennent souvent des ions tels que le sodium ( $\text{Na}^+$ ), le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), le potassium ( $\text{K}^+$ ), le chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), le sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), et d'autres. Et qui peuvent avoir divers effets sur le comportement des sols, notamment sur leur plasticité, leur cohésion, leur perméabilité, leur consolidation et les risques de corrosion.

##### I.3.1.4. Matières organiques.

Ces minéraux secondaires émergent de la transformation hydrolytique ou des débris biologiques des plantes à la surface des sols. Ces débris peuvent être intégrés plus profondément dans la matière argileuse du sol. Présente à hauteur de quelques pourcentages dans les sédiments, la matière organique se distingue par sa forte capacité de rétention d'eau, influençant ainsi le comportement géomécanique similaire à celui des matériaux argileux.

### I.3.2. Caractéristiques physico-mécaniques

Les caractéristiques physico-mécaniques d'un sol désignent les propriétés physiques et mécaniques qui déterminent le comportement du sol sous différentes conditions. Ces caractéristiques comprennent :

- **La densité** : Mesure de la masse par unité de volume du sol, influençant sa stabilité et sa capacité à supporter des charges.
- **La porosité** : Pourcentage du volume total du sol occupé par des pores ou des espaces vides, affectant la perméabilité et la rétention d'eau.
- **La texture** : Proportion de sable, de limon et d'argile dans le sol, influençant la structure, la perméabilité et la capacité de rétention d'eau.
- **La plasticité** : Capacité du sol à se déformer sans se fissurer, liée à la teneur en argile et à l'humidité.
- **La cohésion** : Force qui maintient ensemble les particules de sol, importante pour la stabilité des pentes et des fondations.
- **L'angle de frottement interne** : Mesure de la résistance au cisaillement du sol sans cohésion, influençant la stabilité des talus et la capacité portante.
- **La perméabilité** : Capacité du sol à permettre le passage de l'eau, influençant le drainage et la gestion des eaux souterraines.
- **La compressibilité** : Mesure de la réduction de volume du sol sous une charge, affectant les tassements et les fondations.

Ces propriétés sont essentielles pour diverses applications en ingénierie civile, telles que la construction de bâtiments, de routes, de barrages et de fondations, car elles permettent de prévoir et de gérer le comportement du sol sous des charges et des conditions environnementales variées.

### I.4. Classification des sols.

La classification des sols est basée sur l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg. Elle permet de fournir une définition rapide d'un terrain, mais ne donne qu'une idée globale de son comportement mécanique.

#### Nombreuses classifications dans différents pays

- Classification **U.S.C.S** (Unified Soil Classification System) établie par Casagrande ;
- Classification **L.C.P.C** (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) identique à la classification **U.S.C.S** ;
- Classification **A.A.S.H.O** (American Association State Highways Officials);
- Classification **G.T.R** (Guide des terrassements routier).

La classification la plus utilisée dans les pays Afrique francophone c'est la classification **LCPC** . Elle a été mise au point en France en 1965 par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Cette classification est une adaptation de la classification **USCS** ( The Unified

Soil Classification System ) mis au point par le « Bureau of reclamation » et le « Corps of Engineers » aux Etats Unis.

#### I.4.1. Classification USCS/LCPC.

La classification LCPC Classer un sol consiste à l'identifier grâce à des mesures quantitatives et à lui donner un nom afin de le rattacher à un groupe de sols de caractéristiques semblables.

Classification LPC Sol à partir des résultats fournis par :

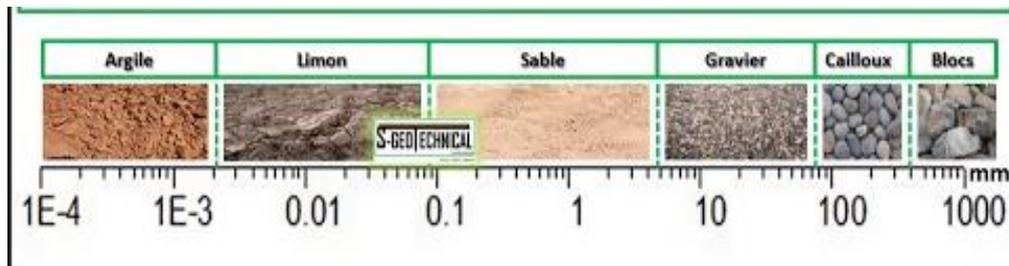
- La granulométrie ;
- Les caractéristiques de plasticité de la fraction fine (Atterberg) Les sols sont désignés par le nom de la portion granulométrique prédominante qualifiée par un adjectif relatif aux portions secondaires.

**On distingue trois grands types de sols :**

- Les sols grenus : plus de 50 % des éléments en poids  $> 80 \mu\text{m}$ ,
- Les sols fins : plus de 50 % des éléments en poids  $< 80 \mu\text{m}$ ,
- Les sols organiques dont la teneur en matière organique est  $> 10 \%$ .

##### I.4.1.1. Sols grenus.

La classification des sols grenus se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le tableau ci-après (Tableau. I.1).



**Figure I.4.** Classification des sols .

Tableau I. 1. Classification des sols grenus (selon L.C.P.C).

Définitions		Symboles	Conditions	Désignations géotechniques	
GRAVES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée	
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
			GL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A <sup>17</sup>	grave limoneuse
		GA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A <sup>17</sup>	grave argileuse	
SABLES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sablé propre bien gradué	
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
			SL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A <sup>17</sup>	sable limoneux
		SA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A <sup>17</sup>	sable argileux	

Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % ⇒ on utilise un double symbole  
 - pour les graves : Gb-GL    Gb-GA    Gm-GL    Gm-GA  
 - pour les sables : Sb-SL    Sb-SA    Sm-SL    Sm-SA

I.4.1.2. Sols fins

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité ci-après (figure. 1). Selon la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité et pour ordonnée l'indice de plasticité, on définit quatre grandes catégories principales :

- Les limons très plastiques,
- Les limons peu plastiques,
- Les argiles très plastiques,
- les argiles peu plastiques,

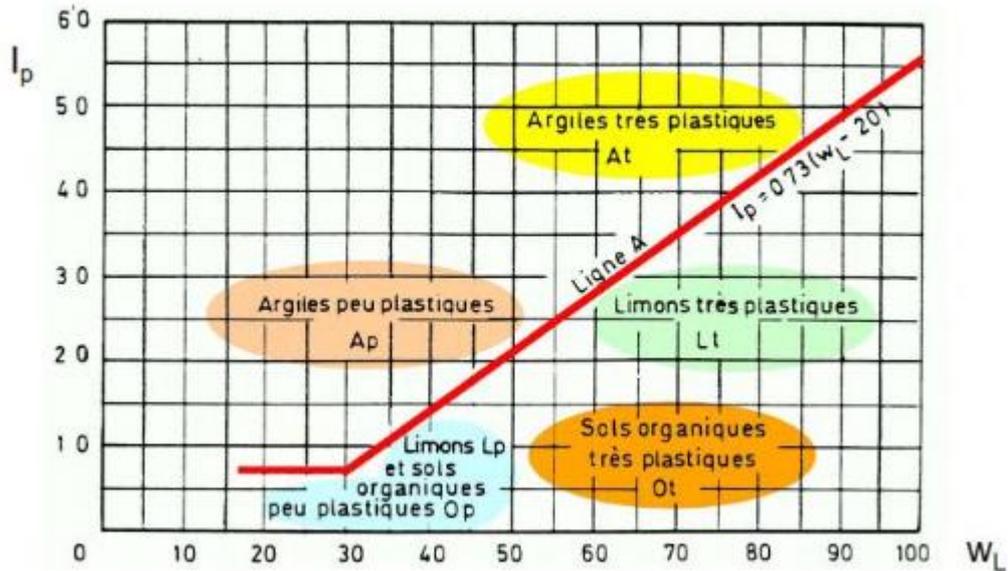


Figure 1. Classification des sols fins : Diagramme de plasticité (selon L.C.P.C).

#### I.4.2. Classification des sols selon la nomenclature GTR (norme NF P 11 300)

On distingue 3 familles :

- Les **SOLS** de classe : **A, B, C et D**
- Les **MATÉRIAUX ROCHEUX** de classe : **R**
- Les **SOLS ORGANIQUES** et **SOUS PRODUITS INDUSTRIELS** de classe : **F**

Les 4 classes de sols (famille 1) :

- **Classe A** : sols fins
- **Classe B** : sols sableux et graveleux avec fines
- **Classe C** : sols comportant des fines et des gros éléments
- **Classe D** : sols insensibles à l'eau

**Les paramètres retenus pour l'identification des sols (famille 1) sont :**

- Les paramètres de nature, dont les caractéristiques sont :
  - Granularité, analyse granulométrique
  - Argilosité, limites d'Atterberg, essai VBS, équivalent de sable
- Les paramètres de comportement mécanique, dont les caractéristiques sont :
  - Résistance à la fragmentation;
  - Résistance à l'usure;
  - Friabilité;
- Les paramètres d'état hydrique :
  - État hydrique : teneur en eau, essai proctor, essai IPI.

Tableaux récapitulatifs de la démarche d'identification des sols

## Analyse bibliographique des propriétés des sols naturels

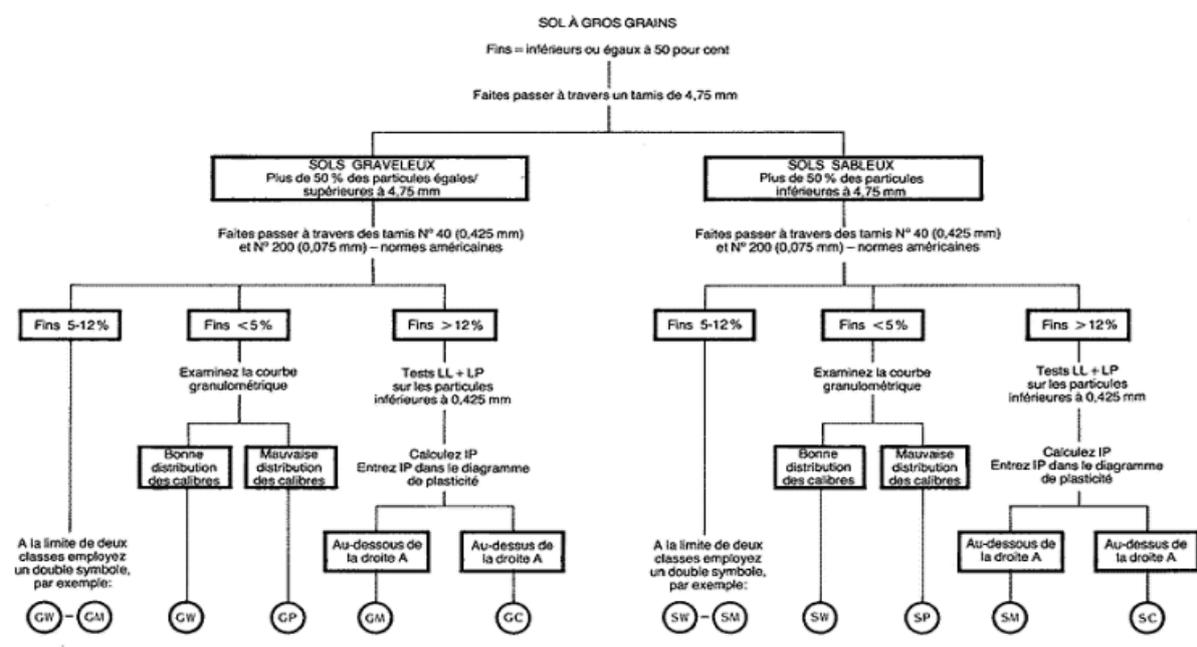
Tableau I.2. Tableau simplifié de la classification des sols GTR.

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
<b>A</b>	Sols fins	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} > 35 \%$	A1 à A4 selon VBS ou $I_p$
<b>B</b>	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} \leq 35 \%$	B1 à B6 selon VBS ou $I_p$ et tamisat
<b>C</b>	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} > 12 \%$ ou passant à $80 \mu\text{m} \leq 12 \%$ + VBS $> 0,1$	30 sous-classes selon VBS, $I_p$ et tamisat à 50 mm
<b>D</b>	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS $\leq 0,1$ et passant à $80 \mu\text{m} \leq 12\%$	D1 à D3
<b>R</b>	Matériaux rocheux	voir la norme NF P 11-300	
<b>F</b>	Sols organiques et sous-produits industriels	voir la norme NF P 11-300	

$D_{max}$  = diamètre pour lequel 95 % des grains du sol ont une dimension inférieure (soit  $D_{95}$  si la courbe granulométrique est disponible, sinon appréciation visuelle de la dimension des plus gros éléments).

### I.4.3. Système de classification AASHTO.

Le système de classification AASHTO, établi par l'American Association of State Highway and Transportation Officials, utilise les propriétés mécaniques des sols comme la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice des vides pour classer les sols.



**Figure . I.5.** Classification *des sols de l'AASHTO*

Dans le système de classification de l'AASHTO, on trouve huit groupes de sol (A-1 à A-8) et quelque sous-groupe. Les seuls essais qu'il est nécessaire d'effectuer sont l'analyse granulométrique et les essais de limites de consistance. Le tableau ci-dessous fournit la classification de l'AASHTO utilisée de nos jours.

**I.5. Diverses catégories de sols fins existent.**

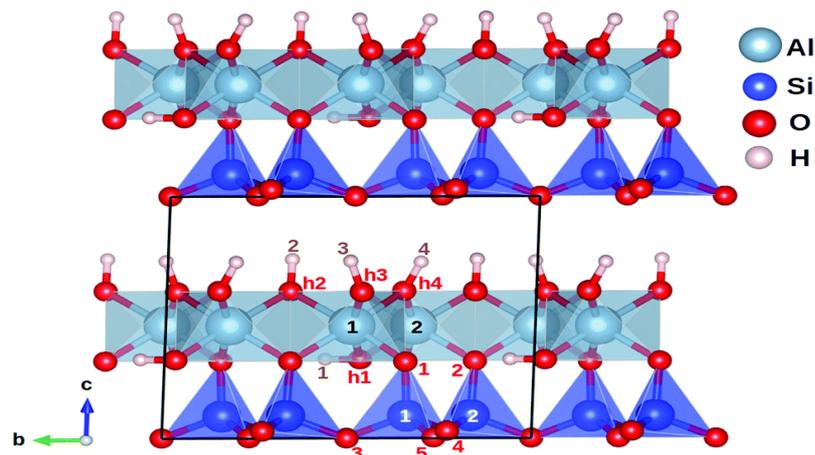
Les sols fins, également appelés sols cohérents, sont constitués de particules de taille inférieure à 20  $\mu\text{m}$ . Ils se distinguent des sols grenus, qui sont composés de particules plus grosses, par leur capacité à se lier entre elles et à former des mottes lorsqu'ils sont humides.

**I.5.1. Argile**

L'argile est une matière rocheuse naturelle à base de silicates ou d'aluminosilicates hydratés de structure lamellaire, provenant en général de l'altération de silicates à charpente tridimensionnelle, tels que les feldspaths. Au sens large, l'argile est aussi un sédiment, composé de particules fines issues de l'altération des roches (processus appelé argilisation), parfois des roches sédimentaires argileuses métamorphosées en schistes. Les types d'argiles les plus fréquents sont:

**I.5.1.1. Kaolinite (Kaolin)**

La kaolinite est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). Les 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 (Figure I.6).

**Figure I.6.** Structure de la kaolinite .**I.5.1.2. Montmorillonite**

La montmorillonite, parfois appelée Smectite, est un minéral argileux important composé de deux feuillets de Silice et d'un feuillet d'Alumine (gibbsite). Les feuillets en octaèdres 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 qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente, les pressions de gonflements qui en résultent peuvent facilement causer des dommages aux structures légères et pavages (Figure I.7).

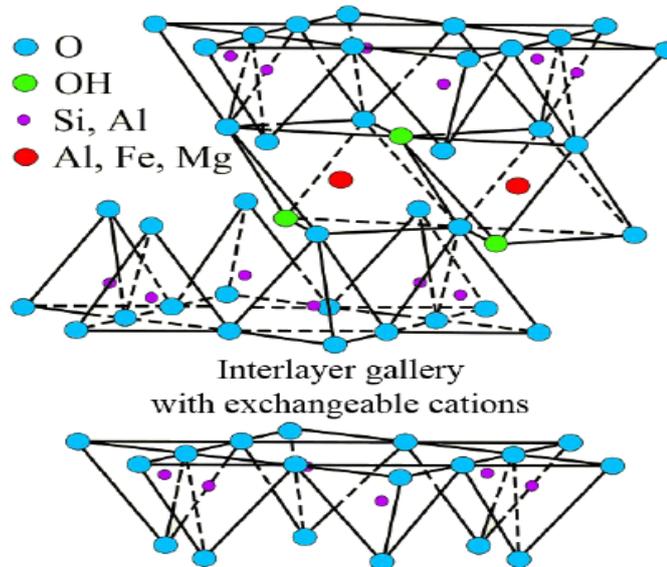
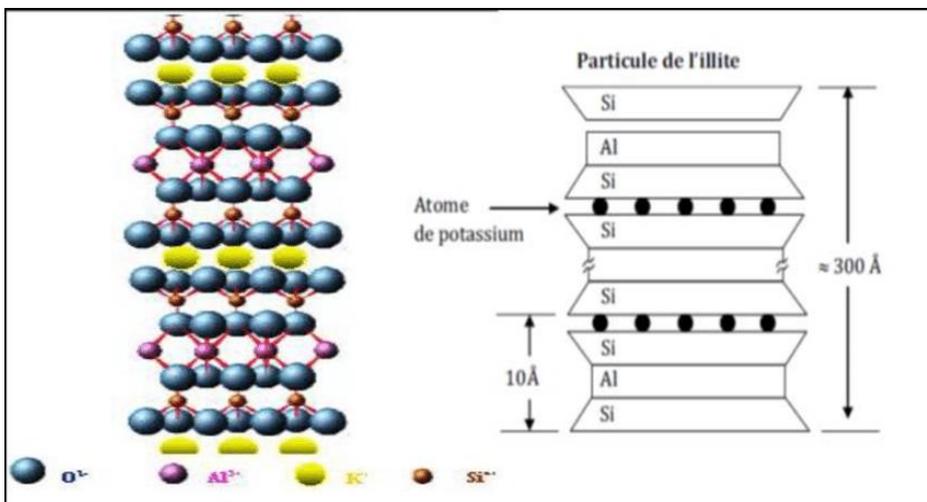


Figure I.7. Structure de la montmorillonite

### I.5.1.3. Illite

L'illite est une autre composante importante des sols argileux, elle a une structure analogue à la montmorillonite mais il y'a des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles (Figure I.8.).



**Figure 1.8.** Structure d'illite

### **I.5.2. Limons**

Les limons sont des sédiments ou des sols composés de particules dont la taille se situe entre celles des argiles et des sables. Selon l'échelle de taille des particules de l'Union internationale des sciences du sol (IUSS), les particules de limon ont un diamètre compris entre 2 et 63 micromètres (0,002 à 0,063 millimètres). Elles se trouvent généralement dans les environnements aquatiques comme les lacs, les marais, les estuaires et les fonds marins.

### **I.5.3. Vases**

Les vases sont des sédiments fins constitués principalement de particules d'argile et de limon, souvent riches en matières organiques et ayant une teneur en eau élevée. Elles se trouvent généralement dans les environnements aquatiques comme les lacs, les marais, les estuaires et les fonds marins. Les vases posent des défis pour la construction en raison de leur faible capacité portante et de leur tendance à la liquéfaction sous certaines conditions.

### **I.5.4. Marne**

Les marnes sont des roches sédimentaires constituées d'un mélange de calcaire (carbonate de calcium) et d'argile. La proportion de ces deux composants peut varier, mais une marne typique contient entre 35% et 65% de calcaire, le reste étant de l'argile.

## **I.6. Les problèmes les plus souvent des sols argileux**

Dans de nombreux pays du monde, le gonflement est à l'origine de fréquents désordres des ouvrages légers. Aux Etats-Unis d'Amérique les dommages provoqués par le gonflement des sols présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles. En Algérie l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les phénomènes de gonflement, tassement, et de glissement.

### **I.6.1. Phénomène de gonflement**

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



**Figure I.6 .** Phénomène de gonflement.

### **I.6.2. Phénomène de tassement**

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation Figure I.9.



**Figure I.9.** Phénomène de tassement.

### **I.6.3. Phénomène de glissement**

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline.



**Figure I.8.** Phénomène de glissement.

Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites. La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes diverses Figure I.10.

### **I.7. Conclusion**

Ce chapitre s'est concentré sur la description des sols fins en utilisant diverses échelles de présentation pour illustrer les minéraux constitutifs et leurs caractéristiques spécifiques. Nous avons exploré la granulométrie, la composition minéralogique et les propriétés physiques et mécaniques des sols fins tels que les limons, les vases et les marnes et les argiles. La caractérisation détaillée de ces sols est essentielle pour comprendre leur comportement sous différentes conditions environnementales et de charge. En outre, nous avons souligné l'importance de classer ces sols en groupes aux comportements similaires, ce qui facilite la prévision de leur performance et le choix des techniques de construction appropriées pour des projets d'ingénierie spécifiques.

# **Chapitre II**

**Techniques d'amélioration des  
sols médiocres**

## *Techniques d'amélioration des sols médiocres*

### **II.1 Introduction.**

La construction des fondations, des routes, des ouvrages géotechniques et des ouvrages d'art durables exige des quantités énormes de remblais qui doivent satisfaire des conditions spécifiques de qualité. Ces matériaux de bonne qualité, très recherchés, ne sont pas toujours disponibles sur place, sur les chantiers. Les ingénieurs, lors de la réalisation des projets, sont parfois confrontés à des sols disponibles sur site qui ne répondent souvent pas aux normes de construction. Ces matériaux sont incapables de supporter ces ouvrages d'importance majeure. De nombreux ouvrages construits sur ces sols argileux ont montré des signes de fatigue et de dégradation, généralement sous forme d'apparition de fissures au niveau de la superstructure. Certaines dégradations ont conduit à la perte totale de ces ouvrages. Les causes principales de ces dégâts sont la faible plasticité, la faible portance et le phénomène de retrait-gonflement. Pour pallier cette inaptitude, les constructeurs ont recours à l'une des méthodes suivantes :

- (1) Améliorer les propriétés des matériaux sur place par compactage puis l'utilisation des caractéristiques modifiées pour le calcul et la conception de l'ouvrage.*
- (2) Importer des matériaux appropriés d'un site d'emprunt proche pour remplacer les matériaux sur place et ,*
- (3) Améliorer les propriétés des matériaux existants in situ en y intégrant d'autres types de matériaux.*

### **II.2. L'amélioration des sols.**

Lorsque la construction d'un ouvrage est décidée sur un terrain constitué d'un sol dit à problèmes, en vue d'éviter la solution onéreuse et classique de fondation profonde, il faut recourir à une opération d'amélioration de sol. Cette dernière, des points de vue coût et délai d'exécution, devra être avantageuse par rapport à toute autre solution de fondation envisageable [10]

Lorsqu'une technique d'amélioration est décidée, une vérification s'impose, au préalable, de la faisabilité de son exécution dans les conditions géotechniques du projet visé et de la quantification des performances pré dictées pour le sol amélioré. Cela implique la réalisation de plots d'essais sur une plateforme limitrophe à l'emplacement de l'ouvrage, ce qui pourrait amener de compléter la campagne géotechnique déjà faite. Il y a lieu, donc, de comparer entre les propriétés du sol initial avant et après l'opération d'amélioration, qui s'accompagne de certaines performances qui conduiront à de nouvelles propriétés et caractéristiques du sol initial. Les résultats de ces essais servent également à la validation des méthodes de calcul adoptées lors du dimensionnement spécifique à la technique d'amélioration exécutée. [10]

Le sol à l'état non amélioré, est identifié essentiellement par sa courbe granulométrique qui demeure un facteur déterminant dans le choix d'une opération d'amélioration donnée. En effet, compte tenu de la connaissance de la nature des sols pulvérulents ou fins, on comprend naturellement qu'il existe à chaque type de sols une amélioration appropriée. Sachant qu'il existe de nombreux sols intermédiaires avec d'autres dérivées de techniques d'amélioration qui peuvent être envisagées.

### II.3. Méthodes de stabilisation des sols.

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et sont jugées efficaces. Les concepts de base de l'amélioration des sols, notamment, le drainage, le compactage, la cimentation, le renforcement et le traitement thermique sont développés depuis des centaines ou des milliers d'années et ils restent valables jusqu'à maintenant.

- **Stabilisation mécanique** : le compactage de la terre modifie sa densité, sa résistance mécanique ainsi que sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité.
- **Stabilisation physique**: les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur sa texture, c'est-à-dire en mélangeant judicieusement des fractions de grains de taille différentes.
- **Stabilisation chimique**: d'autres matériaux ou des produits chimiques peuvent être ajoutés à la terre. Les liants (ciment et chaux éteinte) créent entre les grosses particules du sol des liaisons mécaniquement résistantes même si le matériau se trouve ensuite en présence d'eau [6].

Méthode	Types de sol					
	Matériaux éolés TOURBE	Argiles très molles	Argiles - limons compressibles	Remblais fins	Sables / graviers	Cailloux Remblais à blocs
Amélioration de sols dans la masse	PRECHARGEMENT + DRAINAGE					
				VIBROCOMPACTAGE		
				COMPACTAGE DYNAMIQUE		
				INJECTION SOLIDE		
Renforcement des sols par inclusions souples	COLONNES BALLASTÉES					
	PLOTS BALLASTÉES PILONNES (épaisseur < 5 m)					
Renforcement des sols par inclusions et éléments rigides	.. DE TYPE PIEUX A REFOULEMENT / SANS REFOULEMENT et JET GROUTING					
	... DE TYPE COLONNE DEEP SOIL MIXING					

Figure .II.1. Les méthodes d'amélioration et de renforcement des sols [8].

### II.3.1. Méthodes mécaniques.

Nous citerons trois méthodes de stabilisation mécanique :

#### II.3.1.1. Compactage de surface.

Le compactage est un procédé de densification des sols en place [18]. Ce procédé mène à une diminution des vides du sol par des moyens mécaniques aboutissant ainsi à une augmentation de la densité et de la résistance ainsi qu'une réduction de la compressibilité.

L'application des charges sur le sol à compacter par le biais de certains rouleaux de compactage statiques ou vibratoires induisent une densification dans le sol qui sera proportionnelle à l'énergie mécanique appliquée. Le compactage de surface peut être accompli sur différents types de sites.



**Figure .II.2.** Compactage de surface

#### II.3.1.2. Compactage dynamique.

Le compactage dynamique utilisé pour une profondeur plus de 3m. C'est un procédé qui consiste à pilonner le sol en surface avec une dame en chute libre. L'énergie transmise par chaque impact pénètre dans le sol et produit une déstructuration. Au bout de quelques jours ou semaines, une restructuration s'opère qui aboutit à des caractéristiques de portance améliorées. Le procédé s'applique aux sols sablo-graveleux, et aux matériaux argilo-limoneux saturés à condition qu'il y ait présence d'air oclus. Son emploi peut être intéressant pour consolider des couches sous l'eau.



**Figure II.3.** Compactage dynamique.

### II.3.1.3. Vibro-compactage

Le procédé de vibro-compactage, développé à la fin des années trente, permet de compacter localement ou dans la masse, les sols grenus sans cohésion (sables, graviers, cailloux) en place ou mis en remblai au-dessus ou en-dessous de la nappe et ceci jusqu'à des profondeurs maximum de plus de 50 m. C'est une technique d'amélioration des sols pulvérulents de type sablo-graveleux permettant de les densifier sous l'effet de la vibration. Ces vibrations, émises par l'outil, se propagent de grains en grains et provoquent un réarrangement optimal du volume initial occupé. La réduction de la porosité du matériau permet aussi d'augmenter sa capacité portante de manière significative. Ce procédé de vibro-compactage est appelé aussi la vibro-flotation. Cette méthode trouve son application dans les sols granulaires particulièrement les sables propres et les sables silteux avec une teneur en fines inférieure à 20%. Les vibrations engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense.

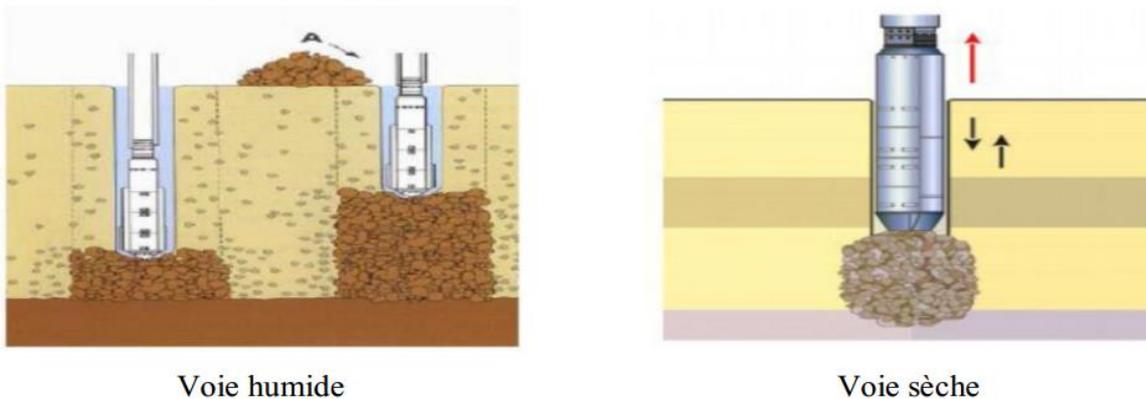


**Figure .II.4.Vibration profondes.**

#### II.3.1.4. Colonnes ballastées.

Les colonnes renforcent et drainent le sol. Améliorer le sol encaissant est aussi un but. But principal pour la diminution du risque de liquéfaction. Domaine de profondeur: 3m à 30m, maille de traitement: 1.0m à 3.0m, diamètre de colonne: 0.6m à 1.5m. Pendant le traitement : enregistrements profondeur/intensité et consommation de ballast par niveau. Après: Essais de chargement, essais in-situ dans et entre colonnes. Leurs avantages:

- Diminution de la sollicitation de cisaillement dans le sol;
- Effet bénéfique du drainage;
- Diminuer les tassements totaux et différentiels;
- Diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant;
- Diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des séismes.



**Figure .II.5.** Colonnes ballastées (Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques).

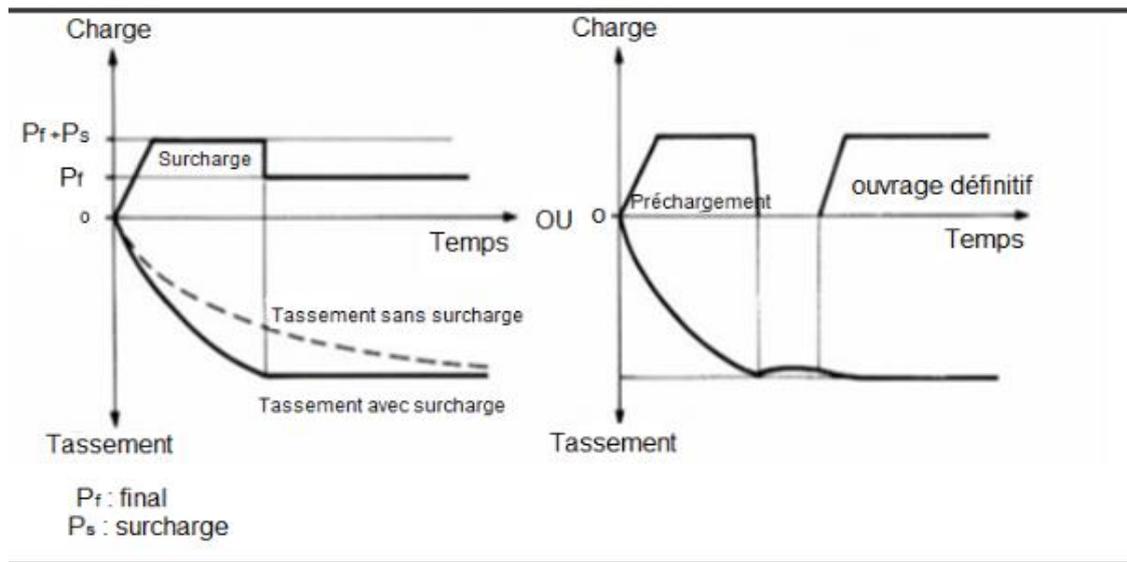
#### II.3.2. Méthodes hydromécaniques.

Les méthodes hydromécaniques sont un ensemble de techniques visant à améliorer les propriétés mécaniques d'un sol en agissant sur sa teneur en eau et sa structure. Elles sont couramment employées dans le domaine du génie civil pour stabiliser les sols instables, notamment dans le cadre de la construction de routes, de fondations, de barrages et de remblais. Les principales méthodes hydromécaniques de stabilisation des sols comprennent:

##### II.3.2.1. Pré chargement ou Pré-compression.

La précompression nécessite la compression du sol sous une pression appliquée avant l'application des charges. Cette méthode est utilisée sur des terrains dont le tassement va se prolonger durant plusieurs années. On applique généralement ces méthodes sur des mauvais terrains de composition principalement argileuse. Le principe consiste à surcharger le terrain afin qu'il se tasse naturellement. Le pré chargement des sols s'opère selon les mêmes principes dans le cas des sols fins ou grenus. Le mode de réalisation est le même, mais la

perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir l'amélioration souhaitée dans des délais beaucoup plus brefs que les sols fins et surtout argileux (Figure II.5).

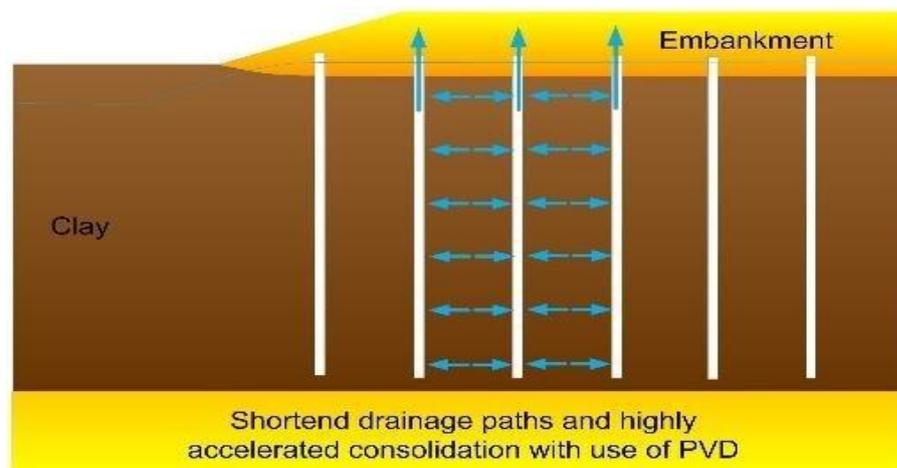


**Figure II.6.** Principe du pré-chargement pour le contrôle des tassements.

Les effets bénéfiques de ce procédé incluent une augmentation considérable de la capacité de portance par la réduction des pressions interstitielles excessives et de plus la réduction de la compressibilité des sols mous par l'accélération de la consolidation.

### II.3.2.2. Accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux.

Les drains verticaux peuvent donc être utilisés dans beaucoup de cas pour accélérer le taux du tassement de la consolidation primaire à l'intérieur de la zone pré-chargée avec ou sans la surcharge ajoutée. Ce procédé est inefficace dans les sols tels que les argiles très organiques et les tourbes où leur comportement de tassement est beaucoup plus dominé par la compression secondaire.



**Figure II.7.** Drains verticaux.

Les drains verticaux permettent donc au drainage de s'effectuer horizontalement et verticalement (voir Figure II.7). Durant les années 1980, les drains verticaux sont constitués généralement de sable réalisés par différents procédés tels que le battage et le vibro-fonçage. A partir des années 1980, une nouvelle génération de drains qui sont les drains préfabriqués en forme de bande a fait son apparition. La part de ces drains a augmenté de façon très rapide.

### II.3.2.3. Drains préfabriqués.

Les drains verticaux préfabriqués (DPV) sont formés de géo-composites figure (II-8), i.e. usuellement un géotextile autour d'un support en plastique, ils sont utilisés surtout pour la réhabilitation des terrains ou pour la stabilisation des sols mous, ils accélèrent le processus de consolidation en réduisant le temps requis pour la dissipation de la surpression interstitielle, ils sont installés verticalement jusqu'à des profondeurs qui peuvent excéder jusqu'à 65 mètres dans des sols fins et mous.

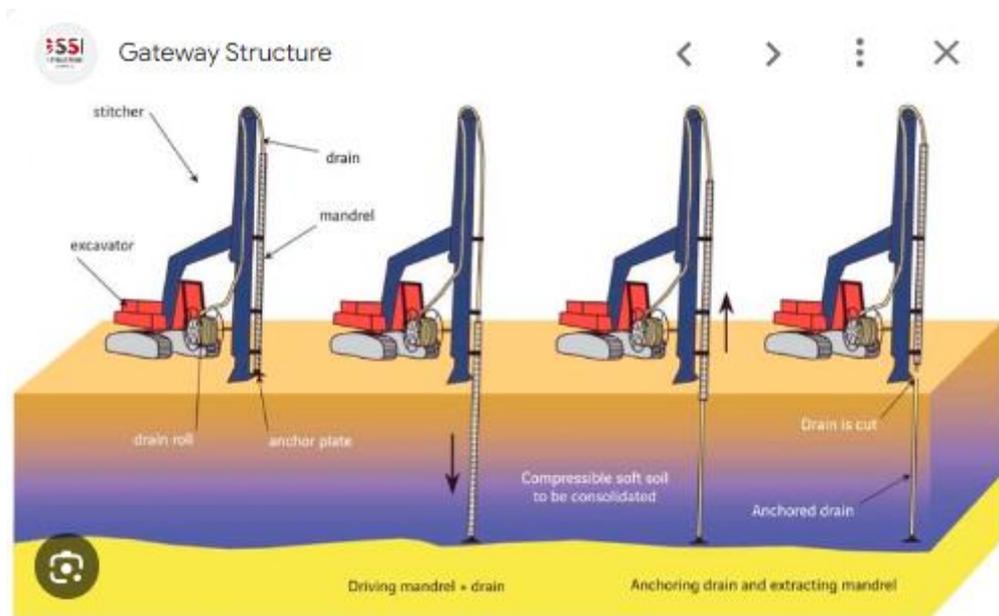


Figure II.8. Installation de drains verticaux préfabriqués (DVP).

*Les méthodes hydromécaniques constituent un outil précieux pour stabiliser les sols instables et améliorer leurs propriétés géotechniques. Le choix de la méthode la plus adaptée dépend de plusieurs facteurs qu'il est important de prendre en compte pour assurer la réussite du projet.*

### II.3.3. Méthodes thermiques.

Les méthodes thermiques de stabilisation des sols constituent un ensemble de techniques visant à améliorer les propriétés mécaniques d'un sol en agissant sur sa température. Elles sont employées dans le domaine du génie civil pour stabiliser les sols instables, notamment dans le cadre de la construction de routes, de fondations, de digues et de tunnels.

### II.3.3.1. Déshydratation.

La déshydratation par la chaleur est très rarement appliquée en géotechnique, elle permet de durcir certaines argiles par exemple. En pratique, la méthode consiste à brûler un carburant dans un forage en utilisant un forage voisin communiquant avec le premier et servant de cheminée de tirage.

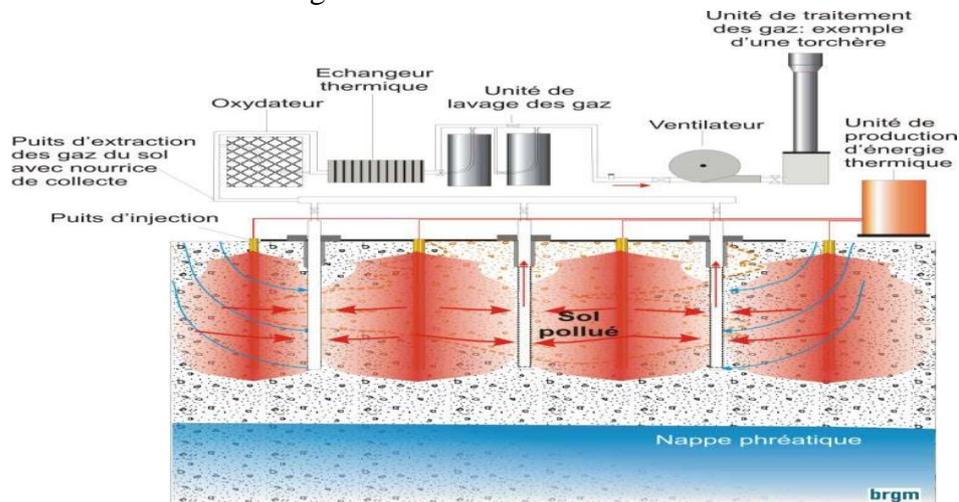


Figure II.9. Traitement de sol par Déshydratation.

### II.3.3.2. Congélation.

La congélation des terrains instables est un procédé ancien à caractère provisoire (voir figure 22.1), employé pour le creusement des fouilles de puits ou de galeries. Cette technique rend le sol étanche et résistant provisoirement. Ce procédé est généralement développé pour les sols grenus mais il peut être appliqué aux argiles molles et aux limons. La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue.



Figure II.10. Congélation de sol

La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé. Les techniques de congélation utilisées sont basées sur la circulation d'un fluide froid dans des tubes enfoncés dans le massif de sol. Une saturation complète du sol est souhaitée. La congélation du sol s'effectue d'habitude en deux étapes à savoir les étapes active et passive de congélation. L'étape active est la plus importante et l'appareillage de réfrigération marche avec sa grande capacité que durant l'étape passive nécessaire pour maintenir l'épaisseur du front de gel contre le dégel.

### II.3.4. Stabilisation chimique.

La stabilisation chimique par des solutions salines est une méthode de traitement des sols qui consiste à introduire des sels solubles dans le sol. Ces sels améliorent les propriétés mécaniques et chimiques du sol en augmentant sa cohésion et en réduisant sa sensibilité à l'eau. Les ions des sels interagissent avec les particules du sol, modifiant leur structure et leur comportement, ce qui conduit à une meilleure stabilité et à une moindre déformabilité du sol. Les stabilisants physico-chimiques incluent :

- Les liants organiques (goudrons, bitume, résine naturelle, polymère),
- Les liants hydrauliques (ciment, chaux, Les liants hydrauliques routiers (LHR), cendres volantes, pouzzolane.

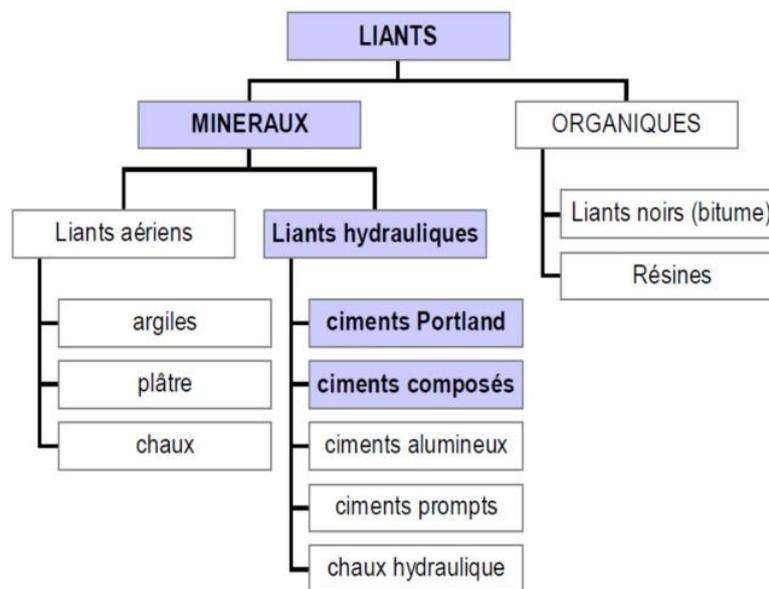


Figure II.11. Classification des liants.

Selon l'utilisation prévue (en couches de forme ou en remblais) ou en fonction du type de sol à stabiliser, il existe plusieurs types de traitements des sols qui ne diffèrent que par la nature du liant utilisé. On utilise presque exclusivement les traitements suivants:

- Le traitement à la chaux (selon la norme NF EN 495-1 et NFP98-101) dans le cas de sols fins destinés à une utilisation en remblai ou en couche de forme ;

- Le traitement au ciment (selon les normes NF EN 197-1) dans le cas de sol peu plastiques ou peu argileux destinés à une utilisation en remblais ou couches de forme ;
- Le traitement mixte à la chaux puis au ciment ou au liant hydraulique routier destiné à une utilisation en couches de forme [5].

#### II.3.4.1. Utilisation de la chaux.

Depuis Plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente. Dans certains cas par exemple, un sol stabilisé à la chaux fournit une performance structurelle équivalente à celle d'une fondation en gravier naturel ou en concassé. L'utilisation de la chaux se fait par l'addition des produits calcaires calcinés de monoxyde de calcium (chaux vive, CaO) ou d'hydroxyde de calcium (chaux hydratée, Ca(OH)<sub>2</sub>).

##### a. Différents types de chaux.

Les trois grandes familles de chaux (chaux aérienne, chaux naturelles et chaux hydrauliques) se différencient par la composition de leur matière première, le calcaire, et leur manière de faire prise.

La chaux est obtenue par calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20% de la couche terrestre), selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux :

- ✓ **Chaux aérienne provenant d'un calcaire pur:** fabriquées à base de calcaire pur, ces chaux font prise et durcissent au contact du gaz carbonique contenu dans l'air. Cette prise très longue limite le retrait et développe une faible résistance à long terme.
- ✓ **Chaux magnésienne** provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium.
- ✓ **Chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux :** sont des chaux recomposées avec différents liants. Elles suivent le même processus de prise, dans des proportions différentes liées au pourcentage des matériaux qui les composent [6].

Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes. Elles se présentent sous deux formes :

- ✓ **Chaux vive:** C'est le premier produit de la cuisson de la pierre à chaux (calcaire). C'est un matériau très avides d'eau. La chaux vive en contact de l'eau produit des explosions et sa température peut dépasser 150° (réaction très exothermique).
- ✓ **Chaux éteinte:** Elle est obtenue par hydratation de la chaux vive. Cette opération qui permet le passage de la chaux vive à la chaux éteinte s'appelle Extinction. Elle s'accompagne d'une augmentation de volume du produit (foisonnement).

##### b. Facteurs influant stabilisation à la chaux.

- ✓ Type de sol: stabilisation à la chaux est utile pour la stabilisation des sols argileux, mais il n'est pas efficace pour les sols sableux.
- ✓ La quantité de chaux: La quantité de chaux nécessite une stabilisation varie entre 2 et 10% du sol.

- ✓ Différents types de chaux: La chaux vive est plus efficace, mais pour la sécurité et la commodité pour gérer la chaux hydratée est généralement utilisé [7].

**c. Avantages de la stabilisation à la chaux.**

- ✓ Augmenter la résistance,
- ✓ Augmenter la résistance à la compression;
- ✓ Le sol devient plus réalisable.

**d. Inconvénients de stabilisation à la chaux.**

- ✓ La chaux est produite par la combustion de la pierre à chaux dans les fours, de sorte qu'il est nocif pour l'environnement.
- ✓ Il a besoin de plus frais pour la pierre de chaux vive.
- ✓ Il n'est pas efficace pour les sols sableux. Il y a pourcentage limité de la quantité de chaux nécessaire environ 2 à 10% du sol[9].

**II.3.4.2. Stabilisation par le ciment.**

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente généralement sous forme d'une poudre grise. Il sert à fabriquer du béton et du mortier : additionné d'eau, le ciment durcit pour former une masse solide, résistante et notamment sous l'eau (puisqu'il s'agit d'un liant hydraulique). [6]. Le ciment est obtenu par le mélange homogène dans certaines proportions des constituants principaux et des constituants secondaires avec du sulfate de calcium. [5].



**Figure II.12.** Processus de fabrication de ciment.

**a. Différents types de ciments, composition, désignation normalisés.**

On distingue cinq types de ciments courants :

- CEM I Ciment Portland.
- CEM II Ciment Portland composé.
- CEM III Ciment de haut-fourneau.
- CEM IV Ciment pouzzolanique.
- CEM V Ciment composé.

Les ciments selon la norme NBN EN 197-1 doivent au moins être désignés par leur type, complété du nombre 32.5, 42.5 ou 52.5 qui désigne la classe de résistance. La classe de résistance à jeune âge est fixée par l'ajout de la lettre N ou R. [3].

**b. Choix du ciment pour le traitement de sol.**

Dans la gamme étendue disponible, le choix du type de ciment se fera sur différents critères:

- Temps de prise assez long, pour la mise en œuvre.
- Bonne résistance à moyen et long terme.
- Compatibilité avec le sol à traiter.
- Bon rapport qualité/prix.

En principe, toutes les classes de ciments peuvent convenir pour le traitement des sols. Les ciments les plus couramment utilisés dans ce domaine, sont les ciments de haut-fourneau (CEM II) de classe de résistance 32,5 N ou 42,5 N. Les ciments à prise rapide (CEM I) ne sont pas recommandés. [3].

**c. Facteurs influant sur le ciment du sol de stabilisation.**

- **Type de sol:** la stabilisation du ciment peut être appliquée dans le sol fin ou granuleux, mais granulaire est préférable pour la stabilisation du ciment.
- **Quantité de ciment:** Une grande quantité de ciment est nécessaire pour la stabilisation du ciment.
- **Quantité d'eau:** eau adéquate est nécessaire pour la stabilisation.
- **Le mélange, le compactage et le durcissement:** Un mélange adéquat, le compactage et le durcissement est nécessaire pour la stabilisation du ciment. Adjuvants: Ciment a quelques adjuvants importants lui-même qui les aide à créer une bonne adhérence. Ces adjuvants paient un rôle vital en cas de réaction entre le ciment et l'eau[7].

**d. Avantages de ciment de stabilisation.**

- IL est largement disponible.
- Le coût est relativement faible.
- Il est très durable.
- Ciment du sol est très résistant aux intempéries et forte.

- Sols granulaires avec des amendes suffisantes sont parfaitement adaptés pour la stabilisation du ciment car il nécessite moins de ciment.
- Ciment du sol réduit les caractéristiques de gonflement du sol.

#### II.3.4.3. Utilisation des ajouts cimentaires.

Parmi les ajouts cimentaires les plus utilisés il y'a les cendres volantes, le laitier, la fumée de silice, les cendres volcaniques et le calcaire. Les coûts élevés de la chaux et du ciment ont poussé les chercheurs à trouver d'autres types de liants dans le but d'améliorer les sols instables à faible coût tout en respectant l'environnement. Les cendres volantes sont intimement liées quant à leur processus de stabilisation. Elles sont souvent utilisées conjointement avec la chaux dans les travaux de stabilisation. Deux types de cendres volantes sont produits par la combustion du charbon à savoir la cendre volante et la cendre basse. Les cendres basses relativement grossières se récupèrent en bas de la fournaise tandis que les cendres volantes sont séparées des gaz d'échappement par un dépoussiéreur électrostatique. Les cendres volantes ont une composition très semblable à celle du ciment. Comme les cendres volcaniques, elle présente des propriétés pouzzolaniques car elles fixent lentement la chaux présente dans le mélange pour donner naissance à des composés stables ayant des propriétés hydrauliques. Elles peuvent être siliceuses ou calciques. Selon leur teneur en chaux libre, les cendres volantes se comportent différemment en présence d'eau. Il existe deux classes de cendre volante à savoir la cendre silico-alumineuse (classe F) et la cendre sulfo-calcique (classe C).

#### II.3.5. Stabilisation par les matériaux céramiques.

La céramique (du grec keramikos, « **argile cuite** ») est le premier matériau que l'homme ait fabriqué par transformation de matières premières. Une céramique peut être définie comme un objet composé de matières premières minérales (inorganiques) pulvérulentes qui est façonnée à une température généralement proche de l'ambiante, puis qui subit un cycle thermique au cours duquel sa microstructure est transformée de façon irréversible[16].

##### II.3.5.1. Domaine d'utilisation de la céramique.

Les produits céramiques destinés aux revêtements des surfaces forment un assemblage désigné par le terme classique de "carrelage". [19] Il faut tout de suite distinguer deux utilisations distinctes : le carrelage des sols, le carrelage des murs. L'un et l'autre proviennent d'un assemblage de carreaux ou d'éléments similaires, mais les matériaux et les produits utilisés sont parfois très différents, et il faut savoir les reconnaître.



**Figure II.13.** Domaine d'utilisation de la céramique.

### II.3.5.2. Classification.

Les matériaux céramiques sont issus de matières premières minérales silicatées naturelles (argile, feldspath, kaolin, quartz) et généralement mise en œuvre par coulée (barbotine). Les céramiques traditionnelles sont présentes dans de nombreux secteurs d'activités tels que les matériaux de construction (briques, tuiles), le revêtement (carrelages, faïence). Les céramiques traditionnelles peuvent être classées sous différentes familles (Figure I.2) :

#### a. Terres cuites.

Les terres cuites sont principalement des produits pour le bâtiment, tels que les tuiles, les briques, les conduites de fumées, les tuyaux de drainage et les carreaux de dallage. Elles se composent d'argiles (souvent kaolino-illitiques) et d'additifs, tels que les dégraissants, les colorants ou les adjuvants organiques (liants), afin d'assurer une bonne maîtrise du comportement en fabrication et des caractéristiques finales. La mise en forme des tessons se fait le plus souvent à partir d'une pâte plastique. Le séchage des préformes est réalisé en chambre ventilée ou en séchoir tunnel. La coloration des tessons peut varier du blanc jaunâtre au brun. Les produits de terre cuite sont appréciés pour leur esthétique, leur stabilité dans le temps, leur résistance en compression, leur faible conductivité thermique et leurs propriétés hygrothermiques et acoustiques.



Figure II.14. La terre cuite.

### b. Faïences.

La faïence est un ensemble de produits céramiques constitués d'un tesson poreux recouvert d'une couche continue de glaçure décorée. L'émail permet de masquer la couleur du tesson et de fermer sa forte porosité ouverte (5% à 20%). Les faïences sont préparées à partir d'argiles généralement modifiées par des ajouts de quartz, de craie, de feldspath ou de verre pilé. Les techniques les plus couramment utilisées pour les mettre en forme sont le coulage de barbotine, le calibrage de pâte et le pressage de la poudre granulée. Après séchage, le produit cru est soumis à un traitement thermique.

### c. Porcelaines.

Les porcelaines sont blanches et translucides sous faible épaisseur. Elles sont dépourvues de porosité ouverte ( $<0,5\%$ ), mais peuvent présenter quelques gros pores fermés (alvéoles). Les porcelaines sont cuites à une haute température.

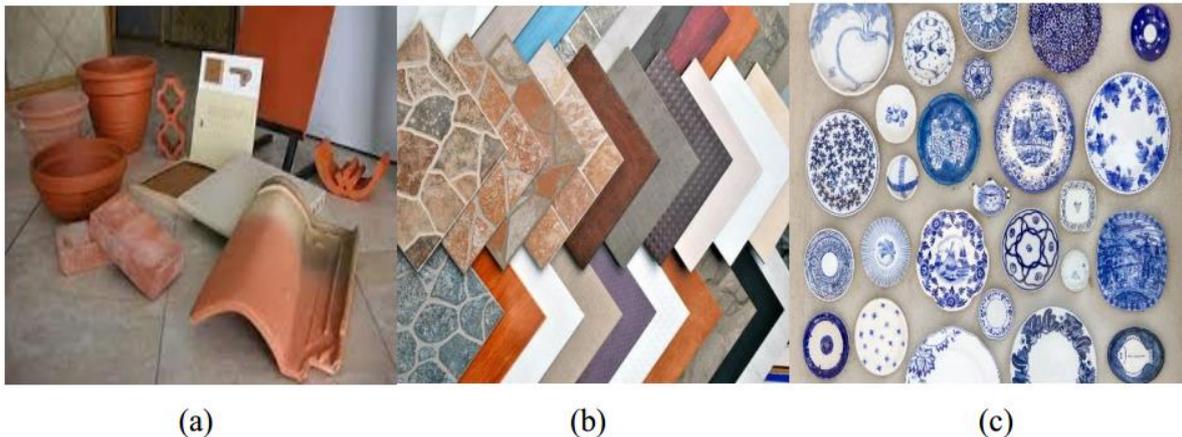


Figure II.15. Céramiques traditionnelles (terre cuite (a) ; faïence (b) ; porcelaine (c)).

Les températures de cuisson, la porosité ainsi que quelques exemple d'utilisation des céramiques traditionnelles sont récapitulés dans le Tableau II.3 suivant :

**Tableau II.3.** Propriétés et utilisations des céramiques traditionnelles. [18,19].

Types de céramiques traditionnelles	Température de cuisson (°C)	Porosité ouverte après cuisson (%)	Exemples d'utilisation
Terres cuites	900 – 1150	10 – 30	Briques, tuiles, conduites de fumée, tuyaux de drainage, revêtements de sols et de murs, poterie
Faïences	950 -1200	5 – 20	Equipements sanitaires, vaisselle, carreaux
Porcelaines	1100 – 1400 0	0 – 1	Vaisselle, appareils de chimie, isolateurs électriques

## II.6. Le marché des céramiques.

En 2013[20], le marché total des céramiques en Union européenne était de l'ordre de 30 milliards d'euros/an. Les secteurs les plus importants (Figure II.12) étaient l'industrie des carreaux de revêtement et de dallage, les tuiles et briques (24 %) et les réfractaires. La plus grande partie de la production a lieu en Allemagne, Grande-Bretagne, Espagne et Italie. 20 à 25 % de la production européenne a été exportée vers les USA, la Russie, la Suisse. L'Europe importait 8 % des produits réfractaires et jusqu'à 60 % de vaisselle et la céramique d'ornementation.

Selon le rapport publié par Ceramic World Review[21] (CWR), les flux mondiaux d'import/export d'articles sanitaires en céramique ont augmenté de 81 %, passant de 2,16 millions à 3,9 millions de tonnes sur la période 2010-2021, correspondant à un taux de croissance annuel composé de 5,6 % (Tableau II.1). La tendance positive qui a duré presque toute la décennie a été encore renforcée par la forte reprise des exportations observée dans toutes les zones géographiques de production et dans les plus grands pays exportateurs en 2021 (+16,5% sur 2020).

En Algérie, selon le président de l'Association des céramistes algériens (ACA) [22] le potentiel à l'export de l'Algérie peut aller jusqu'à 300 millions m<sup>2</sup> de céramique car, les 50 usines implantées sur tout le territoire national, ont un accès facile à la matière première disponible dans toutes les wilayas de l'Algérie. Ceci permet d'aller sur le plan international, en particulier le marché africain.

**Tableau II.2.** Exportations mondiales de céramique sanitaires (en tonnes) 2010-2021 selon CWR.

	2010	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	% 21/20	CAGR 21/10	% on 2021 world exports
Asia	1,100,506	1,679,102	1,697,734	1,603,571	1,756,791	1,988,977	2,220,614	2,127,623	2,531,633	19.0%	7.9%	64.6%
European Union	522,118	530,149	569,475	583,409	570,549	585,034	541,584	488,917	552,268	13.0%	0.5%	14.1%
Other Europe	132,132	178,482	185,960	187,805	203,077	220,127	237,166	235,176	278,859	18.6%	7.0%	7.1%
NAFTA	268,401	329,677	340,565	368,326	366,973	375,412	365,789	368,372	379,235	2.9%	3.2%	9.7%
South America	100,043	82,515	72,548	80,315	79,513	89,375	86,782	78,814	99,851	26.7%	-0.02%	2.5%
Africa	35,861	88,524	84,042	71,958	65,933	66,113	75,238	64,296	75,386	17.2%	7.0%	1.9%
Oceania	1,960	847	902	1,084	411	583	580	315	364	15.6%	-14.2%	0.0%
<b>TOTAL WORLD</b>	<b>2,161,021</b>	<b>2,889,296</b>	<b>2,951,226</b>	<b>2,896,468</b>	<b>3,043,247</b>	<b>3,325,621</b>	<b>3,527,753</b>	<b>3,363,513</b>	<b>3,917,596</b>	<b>16.5%</b>	<b>5.6%</b>	<b>100.0%</b>
% var y-o-y		11.8	2.1	-1.9	5.1	9.3	6.1	-4.7	16.5			

## II.7. Le recyclage de déchet de céramique.

En ce qui concerne les déchets générés par les activités de construction, Juan et al.[23] déclarent qu'environ 200 millions de tonnes de gravats sont produits chaque année dans l'Union européenne (UE) à la suite de la construction et de la démolition de bâtiments. Selon les données du Plan national espagnol des déchets de construction et de démolition, 40 millions de tonnes sont générées annuellement en Espagne, soit l'équivalent de **2kg par habitant et par jour**, ce qui représente un chiffre supérieur à celui des déchets domestiques.

Dans l'ensemble de l'UE, **28 %** de ces déchets sont recyclés. Parmi les pays européens pionniers en la matière figurent les Pays-Bas, où 95 % des déchets de construction sont recyclés, l'Angleterre, avec 45 % et la Belgique, avec 87 %, dont 17 % sont utilisés dans la fabrication du béton. En Espagne, environ 10 % du total des déchets de construction et de démolition sont recyclés, et la réutilisation consiste principalement à utiliser les déchets pour les fondations des routes.

Pour ce la le recyclage des déchets de céramique dans le domaine de la géotechnique et de la construction routière présente plusieurs avantages et applications innovantes. Voici une explication détaillée des différents aspects de ce processus :

### II.7.1. Réduction des déchets et impact environnemental.

L'industrie de la céramique génère une quantité considérable de déchets, notamment des carreaux cassés, des produits défectueux, et des restes de fabrication. En recyclant ces déchets, on réduit la quantité de matériaux envoyés en décharge, ce qui diminue l'empreinte écologique de l'industrie.

#### II.7.1.1. Amélioration des Sols.

Les déchets de céramique broyés peuvent être utilisés comme matériau d'amélioration des sols. En mélangeant ces fragments avec des sols de faible capacité portante, on peut

améliorer les propriétés mécaniques du sol, telles que sa stabilité et sa résistance à la compression.

#### **II.7.1.2. Matériaux de Remblai.**

Les fragments de céramique peuvent servir de matériaux de remblai pour la construction de routes, de digues, et d'autres structures. Leur utilisation aide à réduire le besoin en matériaux vierges et à offrir une solution de rechange durable et économique.

#### **II.7.1.3. Applications en Construction Routière.**

Les déchets de céramique peuvent être utilisés comme sous-couches dans la construction de routes. Ces matériaux fournissent une base solide et stable pour la couche de roulement, contribuant ainsi à la durabilité et à la longévité de la chaussée. Les céramiques recyclées peuvent être transformées en granulats pour béton ou en asphalte. Ces matériaux présentent souvent des propriétés comparables ou supérieures aux matériaux traditionnels, notamment en termes de résistance et de durabilité.

#### **II.7.2. Avantages Économiques**

Le recyclage des déchets de céramique permet de réduire les coûts associés à l'achat de matériaux vierges. De plus, l'utilisation de ces déchets peut diminuer les frais de décharge et de transport, offrant ainsi des économies substantielles aux entreprises de construction et de génie civil.

### **II.8. Conclusion**

Le traitement des sols permet d'utiliser des terrains qui, dans leur état naturel, ne peuvent être exploités en raison de diverses contraintes (difficultés de terrassement, problèmes de circulation des véhicules, difficulté d'obtenir une compacité suffisante). Cela évite le recours à des solutions coûteuses telles que la mise en décharge de terres excavées et l'apport de matériaux de remplacement. Le recyclage des déchets dans le domaine géotechnique et la construction routière représente une solution innovante et écologique pour la gestion des déchets. Il contribue non seulement à la préservation des ressources naturelles, mais offre également des avantages économiques et techniques significatifs. L'adoption de ces pratiques à grande échelle pourrait transformer les industries concernées en promouvant un modèle plus durable et responsable.

# **Chapitre III**

**Caractéristiques des matériaux  
utilisés et protocole  
expérimental**

## Caractéristiques des matériaux utilisés et protocole expérimental

### III.1. Introduction

Quels que soient les objectifs poursuivis dans une étude géotechnique, il est essentiel de commencer par identifier les types de sols concernés. Cette démarche permet de guider les analyses géotechniques subséquentes et surtout de classer les matériaux rencontrés. Les critères nécessaires à cette classification relèvent à la fois de caractéristiques physico-chimiques et mécaniques. Ce chapitre regroupe les essais géotechniques en laboratoire visant à identifier les sols étudiés ainsi que la localisation géographique de la région d'El-Kherba à Mila.

Pour remédier aux problèmes des sols dans cette région, on fait souvent appel à des méthodes de traitement du sol pour améliorer les caractéristiques géotechniques insuffisantes des sols rencontrés sur le site, en vue de les réutiliser à des fins spécifiques dans le projet de reconstruction de la région, ayant été totalement abandonnée par ses habitants. Dans cette optique, notre travail expérimental s'est principalement concentré sur une étude de l'impact de la poudre céramique calcinée, avec et sans l'ajout d'un pourcentage de ciment, sur la stabilisation de certaines propriétés géotechniques du sol de la région d'El-Kherba à Mila.

### III.2 Matériaux utilisés

#### III.2.1 Sol argileux

##### III.2.1.1. Localisation du prélèvement

Le 7 août 2020, la wilaya de Mila a été secouée par deux séismes, l'un mesurant 4,9 sur l'échelle de Richter et l'autre atteignant une magnitude de 4,5, causant des dommages matériels dans plusieurs communes, notamment le chef-lieu où la cité El Kherba, perchée sur les hauteurs de la ville, a subi d'importants dégâts. Ces événements ont conduit les autorités à déclarer cette zone sinistrée par arrêté interministériel, suite à plusieurs visites ministérielles. Dans le cadre de notre étude expérimentale, nous avons choisi d'analyser ce sol afin de diagnostiquer la situation à El Kherba, une zone actuellement abandonnée par ses habitants. Nous envisageons également de proposer des solutions techniques pour améliorer le sol de cette zone d'étude.





**Figure III.1.** Les dommages engendrés par le séisme du 7 août 2020.

### III.2.1.2. Situation géographique de la zone d'étude.

La Wilaya de Mila est limitée au Nord par la Wilaya de Jijel, de l'Ouest par la Wilaya de Sétif, à l'Est par la Wilaya de Constantine et Oum el Boaghi et du Sud par la Wilaya de Batna (Figure III.2)



**Figure III.2.** Carte de découpage administratif (Est Algérien) (Atmania, 2010).

### III.2.1.3. Cadre géologique générale

Le bassin de Mila, localisé dans le nord-est de l'Algérie, se caractérise par une géologie variée, principalement composée de formations sédimentaires du Mésozoïque et du Cénozoïque. On y trouve des dépôts marins comme des calcaires, des marnes et des grès, ainsi que des dépôts continentaux tels que des argiles et des alluvions. La présence de structures géologiques telles que des plis et des failles influence la répartition des roches et des ressources naturelles. Ce bassin est réputé pour son potentiel en hydrocarbures, particulièrement là où les structures géologiques favorisent l'accumulation de pétrole et de gaz.

### III.2.2. La céramique calcinée.

Depuis des siècles, les céramiques servent à fabriquer des poteries, des faïences et des porcelaines. Aujourd'hui, elles sont très présentes dans les matériaux du bâtiment comme le carrelage ou la porcelaine sanitaire par exemple.

Les plus grands volumes de déchets de céramique proviennent des chantiers de démolition ou des travaux publics. Considérées comme inertes, les céramiques ne se décomposent pas, ne polluent pas les eaux de ruissellement et ne posent pas de problème pour la santé, d'autre part c'est un matériaux inorganiques, sont composées d'oxydes, de carbures, de nitrures et de borures, et elles présentent des liaisons chimiques fortes de nature ionique ou covalente.

Pour notre projet, les déchets de céramique ont été récupérés à l'usine de fabrication de porcelaine de Guelma. Après avoir nettoyé et séché les déchets de céramique, nous les avons soumis à une calcination à une température de 900 °C pendant deux heures pour induire des transformations physico-chimiques qui améliorent les propriétés du matériau, telles que sa résistance mécanique, sa durabilité et sa stabilité chimique et les rendre réactifs. Ensuite, afin d'obtenir une finesse de 0,08  $\mu\text{m}$ , nous avons broyé les échantillons de sol prélevés à l'aide d'un broyeur à disque (voir Figure III.3).



a) Calcination avec four à moufle      (b) Broyeur à disque

**Figure III.3.** Matériel de calcination et broyage.

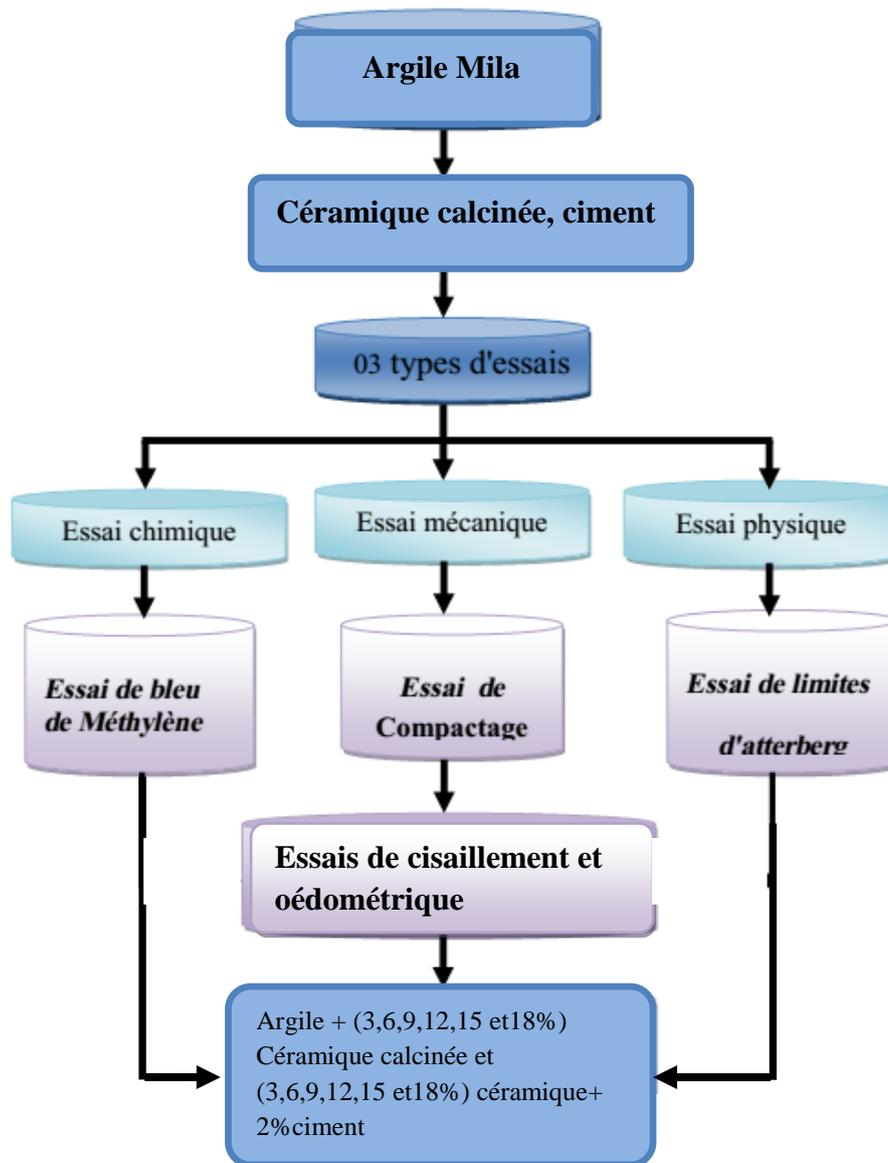
### III.2.3. ciment

Le liant hydraulique utilisé est un ciment portland composé obtenu par un mélange finement broyé de clinker et d'ajouts, Le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise. Provient de l'usine d'Ain-El-Kebira, le produit a comme identification CPJ-CEMII/A 42, 5.

### III.3. Les essais d'identification.

Les essais d'identification servent de base aux divers systèmes de classification des sols. Les essais menés sur l'argile ont pour but de déterminer quelques paramètres essentiels

et indices permettant l'identification et la prédiction du comportement du gonflement, Les essais effectués sur nos échantillons sont les suivants :



**Figure III.4.** Algorithme des essais d'identification

### III.3.1. Caractérisation chimique.

#### III.3.1.1. Essai au bleu de méthylène.

Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol. Ce paramètre représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules argileuses contenues dans la fraction du sol considéré ; c'est donc une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol. L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenu en agitation. On

prélève périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier buvard. Le centre de la tache est bleu vif (argile ayant absorbé le bleu) et l'auréole de la tache reste incolore. A partir d'une certaine dose de bleu, l'auréole se colore aussi : c'est le signe que toute l'argile a épuisé sa capacité d'absorption. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparaît dans l'auréole. La VBS traduit globalement la quantité et la qualité (activité) de la fraction argileuse du sol.



Figure III.5. Ordres de grandeur

Les équipements utilisés pour l'essai au bleu de méthylène sont illustrés sur la figure III.6.



Figure III.6. Equipements utilisés pour l'essai pour l'essai au bleu de méthylène.

La détermination de la surface spécifique des fines a été calculée par la relation de GAILLABAUD et CINOT (1982) [12]. Cette relation relie la surface spécifique à la valeur au bleu de méthylène selon l'équation :  $S_{St} = 21 \times V_B (0,2\mu m)$ .



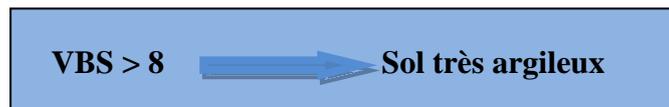
Figure III.7. Résultats de Bleu (VBS).

➤ **Interprétation des résultats :**

**Tableau III.1.** Résultats de l'essai au bleu de méthylène et surface spécifique totale.

Paramètres Sols	Volume de bleu (mL)	Masse de sol (g)	VBS	S <sub>st</sub>
Argile	245	30	8,16	171.36

On remarque que le degré d'argilosité exprimé par la valeur de Bleu de Méthylène de l'argile naturelle est de 8,16 .D'après le Guide des Terrassements Routiers GTR :



**Tableau III.2.** Type de sol en fonction de la valeur de bleu de méthylène.

Valeur de bleu de méthylène (VBS)	Catégorie de sol
BS < 0,1	Sol insensible à l'eau
0,2 ≤ VBS <1,5	Sol sablo limoneux, sensible à l'eau
1,5 ≤ VBS <2,5	Sol sablo argileux, peu plastiques
2,5 ≤ VBS <6	Sol limoneux de plasticité moyenne
6 ≤ VBS <8	Sol argileux
VBS > 8	Sol très argileux

### III.3.2. Les essais physiques.

#### III.3.2.1. Mesure de la masse volumique absolue de l'argile : (NF XP P 94-054).

La masse volumique d'un granulat est le rapport entre sa masse et son volume. Pour un granulat donné, ce rapport est une constante qui est propres aux caractéristiques physiques du granulat. Elle permet alors de caractériser un granulat et d'établir un lien entre sa masse et son volume. Le volume des grains est appelé le volume absolu et le volume des grains avec l'air est appelé le volume apparent. Puisqu'il existe deux volumes pour désigner un granulat. La densité des grains solides du sol est donnée directement par la formule :

$$\rho_{abs} = \frac{M_s}{V_1 - V_2}$$

**Telque :** V<sub>1</sub>: volume d'eau (cm<sup>3</sup>);

V<sub>2</sub>: volume d'eau après ajoute le sol (cm<sup>3</sup>);

$\rho_{\text{abs}}$ : la masse volumique absolu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $M_s$ : la masse de sol (g);

➤ **Présentation des résultats.**

**Tableau III.3.** Résultats de la masse volumique.

N° d'essai	$\rho_{\text{abs}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\rho_{\text{absmoy}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
1	<b>2,18</b>	<b>2,17</b>
2	<b>2,20</b>	
3	<b>2,13</b>	

**III.3.2.2. La masse volumique absolue de la céramique calcinée : (NF XP P 94-054)**

La masse volumique absolue des sédiments, ( $\rho_s$ ), est la masse par unité de volume des sédiments qui constituent le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Il ne faut pas confondre la masse volumique absolue ( $\rho_s$ ), avec la masse volumique apparente ( $\rho$ ), qui est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

La masse volumique absolue est mesurée à l'aide de densimètre Le Chatelier en utilisant l'Alcool 70% comme solution inerte. La masse volumique absolue est mesurée avec l'équipement illustré dans la Figure III.9, en utilisant la formule suivante :

$$\text{Masse volumique absolue} = \frac{M_1}{V_2 - V_1}$$

$M_1$  : Masse de l'échantillon de cendre de bois et de la sciure de bois ;

$V_1$  : Volume initial de l'Alcool 70% ;

$V_2$  : Volume après l'introduction de l'échantillon de déchet



**Figure III.8.** Essai de la masse volumique absolue.

Les mesures expérimentales de la masse volumique absolue de céramique calcinée est comme suit :

**Tableau III.4.** Masse volumique absolue des déchets.

Paramètre	Céramique calcinée
Masse volumique absolue ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.59

### III.3.2.3. Granulométrie par diffraction laser pour la céramique.

Une méthode utilisée pour mesurer des objets d'une taille comprise entre 100 nm et 1000  $\mu\text{m}$ . De plus, elle détermine la distribution granulométrique des matériaux granulaires en poudre. Le principe de mesure des diffractions laser s'exprime comme suit:

Pour appliquer ce processus, l'échantillon doit être placé dans un passeur d'échantillons. Pour s'assurer que l'échantillon circule à travers la lentille de la taille des particules, le passeur d'échantillons doit être fourni avec un agitateur et une pompe. Pendant la mesure, deux faisceaux laser mesurent l'intensité du rayonnement reçu par les deux bancs de capteurs et modélisent le signal mesuré par le capteur. Par l'adaptation des signaux théoriques au signal de mesure, on obtient la distribution granulométrique. Cela reflète la distribution en volume de la taille des particules grâce à l'utilisation d'appareil de type MASTERSIZER 2000 (2 mm à 0,2  $\mu\text{m}$ )



**Figure III.9.** Appareil d'analyse granulométrique. Mastersizer 2000 Malvern.

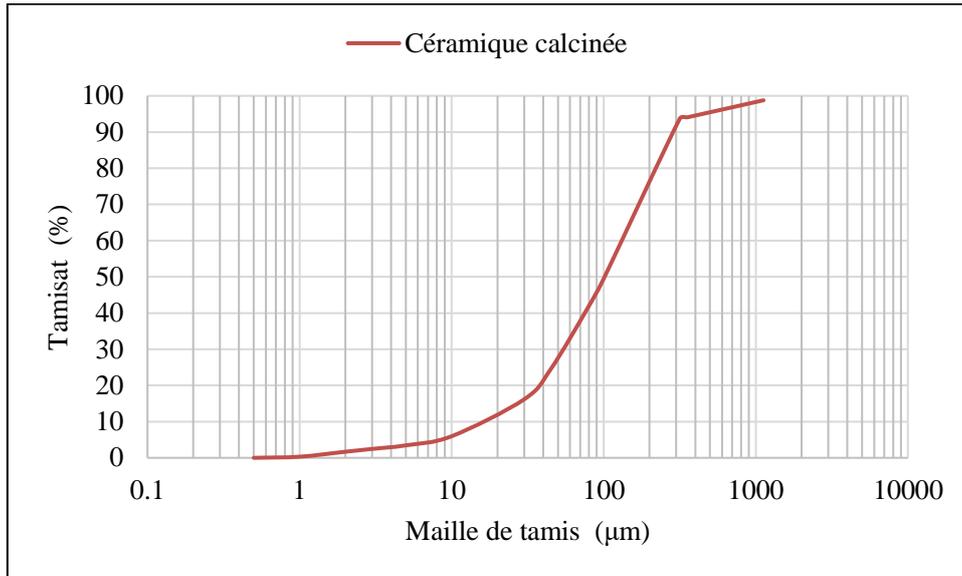


Figure III.10. Courbe granulométrique de céramique .

**III.3.2.4. La teneur en eau de sol (NF P 94-050).**

La teneur en eau d'un sol est le paramètre d'état fondamental de son comportement. L'objectif de cet essai est la détermination de la teneur en eau d'un sol au laboratoire, pour prévoir son comportement. Elle est déterminée lorsque les conditions de prélèvement sur site, de transport et de conservation de l'échantillon n'ont entraîné aucune modification de celle-ci. Elle est définie par le rapport du poids de l'eau au poids des particules solides d'un volume donné de sol. Cette grandeur est noté ( $\omega$ ) et exprime en pourcentage.

$$\omega\% = \frac{W_{\omega}}{W_s}$$

$M_w$ : la masse de l'eau dans l'échantillon;

$M_s$ : la masse sèche mesurée après le passage à l'étuve.



Figure III.11. Equipements utilisés pour l'essai de teneur en eau.

➤ **Présentation des résultats**

**Tableau III.5.** La Teneur en eau initial

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Sol humide (g)	460.7	561.9	424.1
Sol sèche(g)	366.8	453.6	342.8
Poids d'eau (g)	93.9	108.3	81.3
Teneur en eau (%) $\omega = \frac{W_w}{W_s}$	25.60	23.88	23.72
Teneur en eau Moyenne %	<b>24.40 %</b>		

La courbe granulométrique par tamisage montre que plus de 80% des passants ont un diamètre inférieur à 0,08mm. Cela montre que le sol est fin et il nécessite un essai complémentaire (sédimentation) pour connaître la répartition des tailles des particules pour cette fraction de sol.

**III.3.2.5. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) et sédimentométrie (NF P 94-057).**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions. Elle présente les proportions relative des différents dimensions de particule est permet d'identifie quelle fraction de sol control ses propriétés. L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis (mailles carrées), emboîtés les un sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Elle se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments supérieurs à 80µm (NF P94-056) et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à 80 µm (NF P94-057). Les résultats de l'opération de tamisage pour notre argile est donné sous forme d'un tableau et puis en courbe.



**Figure III.12.** L'analyse granulométrique par tamisage. Mettre une autre photos

**Tableau III.6.** Résultat de l’analyse granulométrique par tamisage de l’argile.

Tamis (mm)	5	2	1	0,5	0,4	0,25	0,2	0,08
Paramètres								
Tamisat (%)	97,76	93,88	92,19	91,18	90,96	90,60	90,04	90,00

L'analyse granulométrique par sédimentométrie est employée pour étudier la distribution des tailles de grains plus petits ( $D \leq 80 \mu\text{m}$ ), parce que des interactions moléculaires entre ces sédiments et le tamis empêchent l'utilisation de ce dernier (voir figure III.4), est réalisé conformément à la norme NF P94 - 057. Le principe est basé sur la loi de Stokes.

L'analyse granulométrique par sédimentométrie est employée pour étudier la distribution des tailles de grains plus petits ( $D \leq 80\mu\text{m}$ ), parce que des interactions moléculaires entre ces sédiments et le tamis empêchent l'utilisation de ce dernier, est réalisé conformément à la norme NF P94-057. Le principe est basé sur la loi de Stokes.



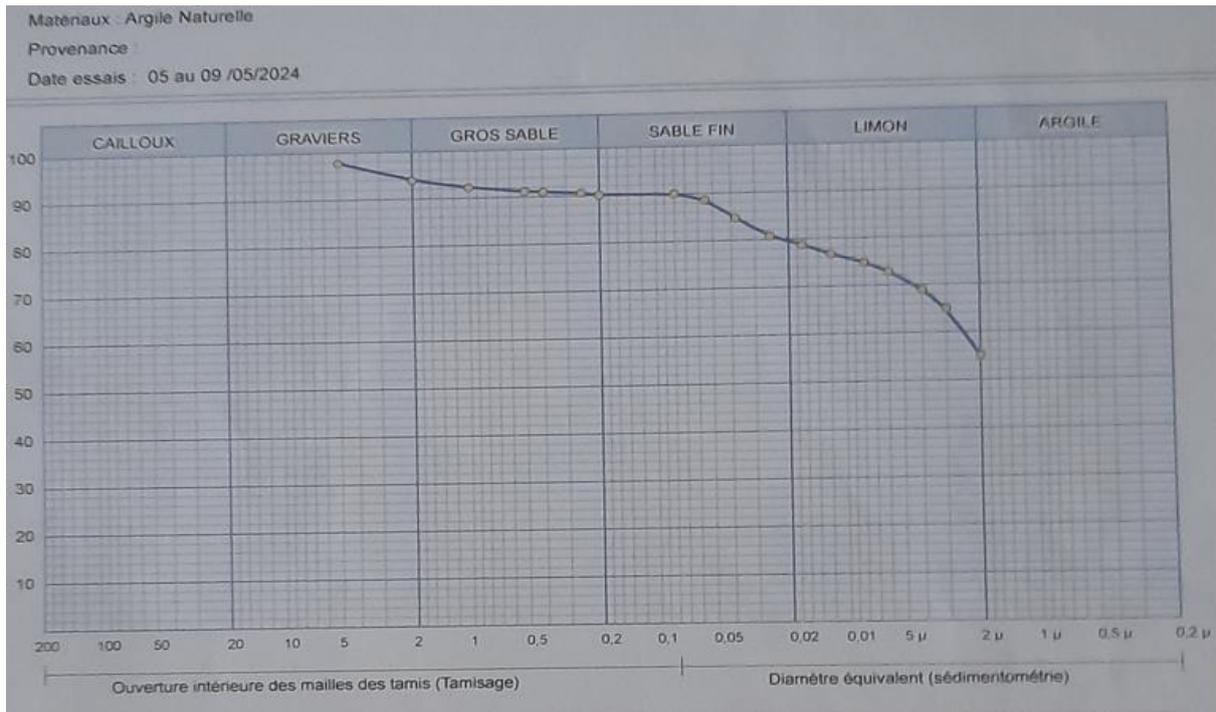
**Figure III.13.** L'analyse granulométrique par sédimentométrie.

**Tableau III.7.** Résultat de l’analyse granulométrique par sédimentation de l’argile.

Diamètre équivalent ( $\mu\text{m}$ )	55	38	25	17	12	8	6	4	3	2
Paramètres										
Tamisat (%)	88,63	84,67	80,71	78,74	76,76	74,78	72,80	68,84	64,89	55

Les résultats de l’analyse sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique ou l’on porte:

- Les diamètres des particules en abscisse (graduation logarithmique).
- Les pourcentages en poids des tamisages cumulés en ordonnée.



**Figure III.14.** Courbe granulométrique par tamisage et sédimentation de l'argile.

La courbe granulométrique de l'argile Elkarba Mila montre que le pourcentage des fines inférieures à  $80\mu\text{m}$  est de 90% .

### III.3.2.6. Les limites d'Atterberg (NF P 94 – 051).

La consistance d'un sol peut varier dans de larges limites avec la quantité d'eau interstitielle que contiennent ses pores et l'épaisseur des couches d'eau adsorbées qui enrobent ses grains. Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité) et le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité). Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en pourcentage du poids du matériau sec. La différence entre la limite de liquidité et de plasticité qui définit l'étendue du domaine plastique est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité (Figure III.15).

Ces limites sont d'une importance fondamentale en géotechnique car elles indiquent la sensibilité d'un sol aux modifications de sa teneur en eau :

- **Limite de liquidité  $W_L$** : Elle sépare l'état liquide de l'état plastique ;
- **Limite de plasticité  $W_P$** : Elle sépare l'état plastique de l'état solide ;
- **Limite de retrait  $W_S$** : Elle sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait.

$W_s$ ,  $W_L$  et  $W_p$  sont déterminées en laboratoire sur la fraction du sol (mortier) passant au tamis d'ouverture égale à 0,40mm (méthode de la coupelle de Casagrande, cône de pénétration, du rouleau et appareil de retrait).

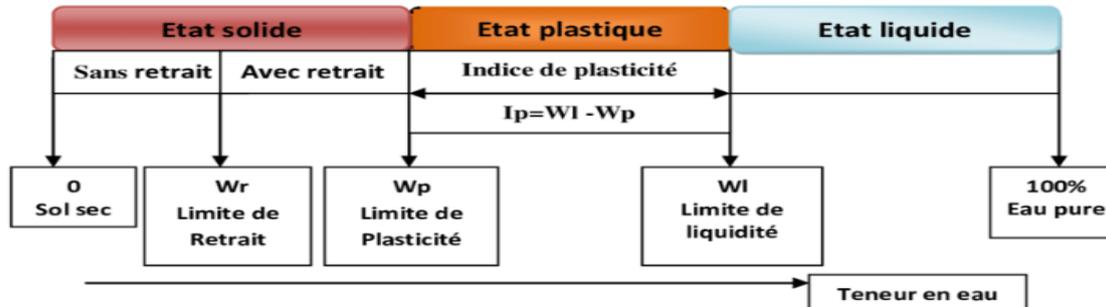


Figure III.15. Représentation des limites d'Atterberg.

❖ La détermination de  $\omega_L$  (NF P 94-051).

Appareil de Casa grande, il est constitué d'une coupelle normalisée (coupelle lisse pour la majorité des essais et coupelle rugueuse pour les échantillons sableux qui ont tendance à glisser sur la surface de la coupelle lors de chaque choc), montée sur un support métallique avec manivelle, le tout étant fixé sur un socle en bois dur. L'ensemble permet de faire tomber la coupelle d'une hauteur de 10 mm sur le socle, chaque choc entraînant la fermeture progressive de la rainure pratiquée dans l'échantillon de sol, celle-ci ayant été effectuée à l'aide de l'outil à rainurer.



Figure III.16. Appareillage nécessaire pour déterminer  $\omega_L$ .

➤ Présentation des résultats.

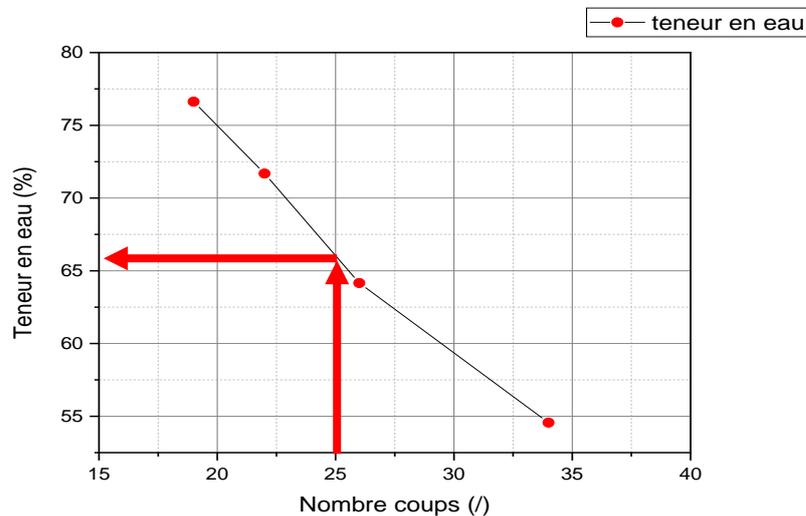
Les résultats de l'essai sont synthétisés dans le tableau suivant :

Tableau III.8. Résultats de la limite de liquidité.

Nombre de coups	Poids humide (g)	Poids sec (g)	Poids tare (g)	$\omega$ (%)
19	16.65	13.70	9.85	76.62
22	18.05	15.19	11.20	71.68
26	18.40	15.41	10.75	64.16

34	17.70	14.96	9.95	54.56
----	-------	-------	------	-------

Les résultats du tableau sont présentés sous forme de graphe dans la figure suivante :



**Figure III.17.** Détermination de la limite de liquidité

La limite de liquidité est la teneur qui correspond à un nombre de 25 coups, donc :

$$\omega_1 = 66,45 \%$$

#### ❖ Détermination de la limite de plasticité $\omega_P$ .

La limite de plasticité  $W_P$  est inférieure à  $\omega_P$ . Il faut donc laisser sécher l'échantillon un peu plus. Quand sa teneur en eau est correcte, faire une boulette de mortier grosse comme une noisette (environ 12 mm de diamètre) et en faire un cylindre en la roulant sur la plaque de marbre propre ; lisse et sèche. Ceci se fait à la main, ou en utilisant une plaque plane, par un mouvement alternatif d'environ un aller et retour par seconde. Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise lorsque son diamètre atteint 3mm. Cette teneur en eau doit être déterminée immédiatement après le test selon la procédure décrite lors de la détermination de  $W_L$ . Le cylindre terminé doit avoir 10 à 15 cm de longueur.



Figure III.18. Détermination de la limite de plasticité.

➤ **Présentation des résultats.**

Tableau III.9. Résultats de la détermination de la limite de plasticité.

N° essai	Poids humide (g)	Poids sec (g)	Poids tare (g)	$\omega_p$ (%)
01	12.80	12.10	10.00	33.33
02	12.30	11.70	09.90	33.33
03	13.40	12.70	10.50	31.82
				$\omega_{moy}=32.83\%$

La détermination des limites d'Atterberg permet de calculer les paramètres :

- **Indice de plasticité  $I_p$** : Cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité.  $I_p = \omega_L - \omega_P$ .

Donc ;

$I_p = 66,45 - 32,83 = 33,62\%$  ➡ donc notre sol est une argile.

Tableau III.10. Type de sol en fonction de  $I_p$ .

Indice de plasticité (%)	Type de sol
$I_p < 1\%$	Pulvérulent
$1\% < I_p < 7\%$	Sable argileux
$7\% < I_p < 17\%$	Argile sableuse
$I_p > 17\%$	Argile

- **Indice de consistance  $I_c$** : Cet indice prend la teneur en eau  $W$  du sol à l'état naturel pour la fraction inférieure à 0.4mm.

$$I_c = \frac{\omega_L - \omega_{nat}}{I_p}$$

**Tableau III.11.** Type de sol en fonction de  $I_c$ .

Indice de consistance	Consistance du sol
$I_c \leq 0$	Liquide
$0 < I_c < 1$	Plastique
$I_c = 1$	Solide plastique
$I_c > 1$ Solide ou semi solide	Solide ou semi solide

Pour notre argile :  $I_c = \frac{66,45 - 24,40}{33,62} = 0,72\%$  ➡ Argile plastique

- **L'indice de liquidité «  $I_L$  »** :  $I_L = \frac{\omega - \omega_p}{I_p}$

**Tableau III.12.** Type de sol en fonction de  $I_L$ .

Indice de liquidité	Consistance du sol
$I_L < 0$	Très dure
$0 < I_L \leq 1$	Dure à très plastique
$I_L > 1$ Fluide	Fluide

$I_L = 1 - I_c = 0,29$  ➡ Argile dure à très plastique

### III.3.2.7. Classification de notre sol selon USCS.

A partir des caractéristiques déterminées précédemment, le tableau suivant donne la classification de notre marne selon les deux systèmes : GTR et USCS.

**Tableau III.13.** Classifications de l'argile d'Elkarba Mila

Systèmes de classification	Classes
GTR	

<p><math>D_{max} = 5 \text{ mm} &lt; 50\text{mm}</math></p> <p>% fine (<math>&lt;0.08 \text{ mm}</math>) = 90% &gt; 35%</p> <p><math>I_p = 33,62\% &gt; 17\%</math></p> <p><math>VBS = 8.16 &gt; 8</math></p> <p><math>0 &lt; I_c = 0,72\% &lt; 1</math></p>	<p>Sol de classe <b>A4</b></p> <p><b>Argile peu plastique</b></p>
<p><b>USCS</b></p> <p>% fine (<math>&lt;0.08 \text{ mm}</math>) = 90% &gt; 50% sol fin</p> <p><math>I_p = 33,62</math> et <math>W_L = 66,45 \%</math> &lt; au dessus de la ligne A <math>\rightarrow</math> 50%</p>	<p>Sol de classe <b>Ap</b></p> <p><b>Argile peu plastique</b></p>

**III.3.3. Essais mécanique**

**III.3.3.1. L'essai Proctor**

L'essai Proctor Mise au point en 1933 par un ingénieur américain, cette méthode est toujours utilisée. Il s'agit d'un essai normalisé, empirique mais dont la reproductibilité et la longue utilisation constituent des éléments forts pour son utilisation pratique. On utilise en pratique deux types de moules (Proctor et CBR) de taille différente suivant la granulométrie du sol à étudier et deux valeurs d'énergie de compactage standardisées (Proctor normal ou Proctor modifié) qui correspondent en général respectivement au corps du remblai et aux couches les plus superficielles dans le cas des pistes et chaussées. L'obtention d'un optimum nécessite la réalisation de cinq mesures au minimum à différentes teneurs en eau encadrant l'optimum supposé : les écarts de teneur en eau entre essais successifs sont de 2% environ en valeurs absolues. La réalisation d'un essai à la teneur en eau naturelle du sol semble intéressante bien que non recommandé par la norme.



**Figure III.19.** Matériels de l'Essai Proctor.

Tableau III.14. Appareillage Proctor normal.

Caractéristiques de l'essai	Proctor normal
Masse de la dame (g)	2490
Diamètre du mouton (mm)	51
Hauteur de chute (mm)	305
Nombre de couches	3
Nombre de coups/couche	25
Volume éprouvette (cm <sup>3</sup> )	933

Le mode opératoire de l'essai Proctor est réalisé selon les étapes suivantes :

- On prend 2,5 kg de sol préalablement préparé qu'on verse dans un bac ;
- On ajoute une certaine quantité d'eau proportionnelle au poids du sol utilisé. A l'aide de la truelle on malaxe bien le sol,
- On remplit le moule Proctor normalisé en trois couches puis après avoir versé chaque couche on compacte à l'aide de la dame Proctor normal par 25 coups et en respectant la hauteur de chute et en assurant une répartition équitable des coups sur la surface à compacter. On procède de la même manière après la mise en place de la 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> couche.

La figure III.20 résume les principales étapes de l'essai Proctor.

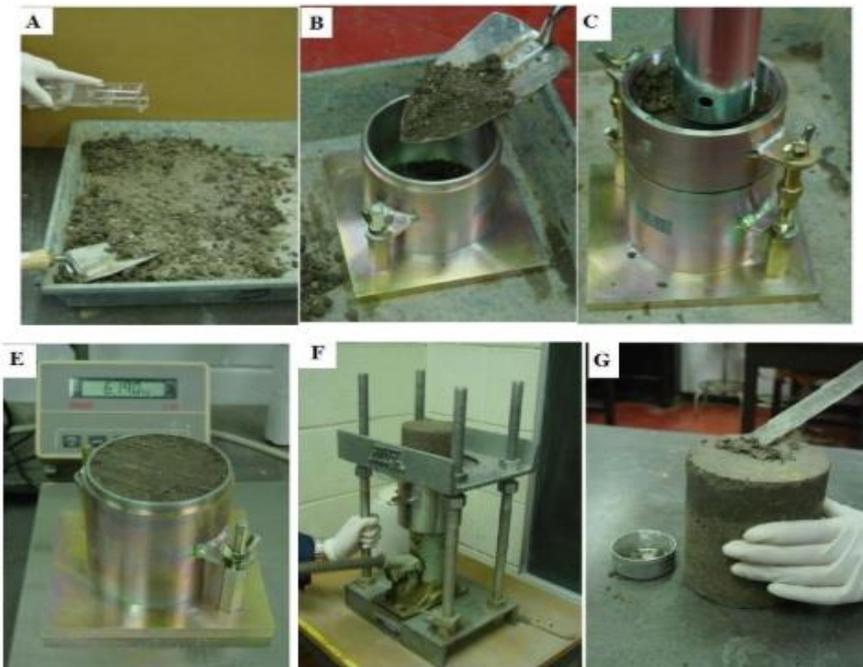


Figure III.20. Les principales étapes de l'essai Proctor.

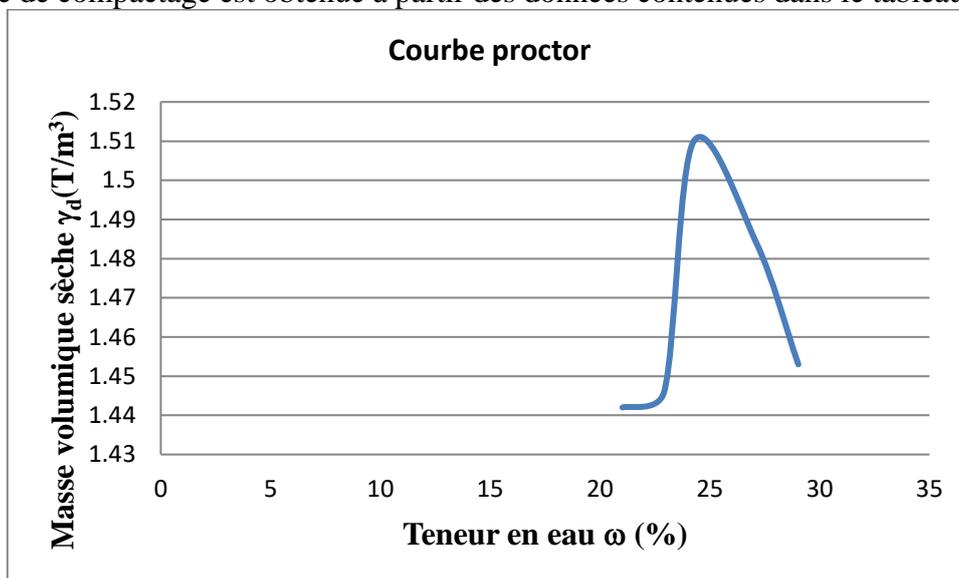
➤ **Présentation des résultats.**

Une fois l'essai est effectué on exploite les résultats:

**Tableau III.15.** Les résultats des paramètres de l'essai Proctor normal pour sol naturel.

Sol naturel					
Pourcentage d'eau %	12	14	16	18	20
Masse volumique sèche $\gamma_d(T/m^3)$	1,442	1,446	1,510	1,484	1,453
Teneur en eau $\omega$ (%)	21.02	22.92	24.27	27.12	29.03

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau.



**Figure III.21.** Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour l'argile naturelle.

De cette courbe, on déduit Les paramètres de la courbe Proctor :

**Tableau III.16.** Paramètres de la courbe Proctor.

$\omega_{opt}(\%)$	$\gamma_{dmax}(T/m^3)$
24,27	1,51

### III.3.3.2. Essai de CBR : (California Bearing Ratio test) Norme NF P 94-078.

En association avec l'essai Proctor Normale, des mesures de poinçonnement sur les éprouvettes compactées sont réalisées afin d'estimer l'indice de portance immédiat (IPI). Ce paramètre permet d'évaluer l'aptitude d'un matériau à supporter directement sur sa surface la

circulation des engins de chantier. Par convention, l’IPI est la plus grande des 2 valeurs suivantes :

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (enkN)}}{13.35} \times 100$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (enkN)}}{19.93} \times 100$$

$$I.CBR = \max (I.CBR_{2,5} ; I.CBR_5)$$

Tableau III.17. Classement de sol en fonction de l’indice CBR.

Classes de portance	CBR [%]
S <sub>0</sub> portance très faible	CBR < 3
S <sub>1</sub> portance faible	3 < CBR < 6
S <sub>2</sub> portance moyenne	6 < CBR < 12
S <sub>3</sub> portance élevée	12 < CBR < 25
S <sub>4</sub> portance très élevée	25 < CBR

L’essai CBR est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais. Et des couches de formes compactées des ouvrages routiers. Il s’agit de déterminer expérimentalement des indices portants (IPI, CBR) qui permettent :

- D’établir une classification des sols (GTR),
- D’évaluer la traficabilité des engins de terrassement (IPI),
- Déterminer l’épaisseur des chaussées (CBR augmente ⇒ épaisseur diminue) .



Figure III.22. L’essai CBR (California Bearing Ratio).

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.

Pour préparer l'échantillon, on retourne le moule CBR, on retire le disque d'espacement et on replace l'ensemble sur l'embase. La presse utilisée est celle d'une capacité de 50 KN. Le poinçon est monté sur un anneau dynamométrique de 50 KN, préalablement étalonné. La précision de la mesure de la force est de 21 N. Un comparateur au 100ème de millimètre disposé entre le piston et le moule permet de connaître la valeur de l'enfoncement. Une fois l'échantillon correctement centré sur le plateau de la presse, le poinçon est mis en contact avec le matériau afin de régler le comparateur à zéro. Ensuite, le plateau de la presse est actionné à la vitesse constante de 1,27 mm/min et on relève les forces qui correspondent aux valeurs d'enfoncement de 2,5 mm et 5 mm. En traçant sur le même graphe la courbe  $IPI = f(w)$ , il est possible de déterminer la portance du matériau à l'optimum Proctor.

➤ **Présentation des résultats**

Une fois le test effectué on exploite les résultats:

**Tableau III.18.** Valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité.

poinçonnement			
date:		coef Anneau=	0,025734618
Temps	enfoncement en mm	force totale	
		lecture (kn)	lecture × coef (kn)
1"	1,25	22,000	0,566
1,40"	2	32,000	0,824
2"	2,5	37,000	0,952
4"	5	54,000	1,390
6"	7,5	62,000	1,596
8"	10	66,000	1,698
calculs et résultatsde l'indice portant			
effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (kN)×100			7,132
13,35			

effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (kN)×100	6,973
19,93	
L'indice recherché est la plus grande valeur	7,13%

CBR=7.13%  Argile S2 portance moyenne

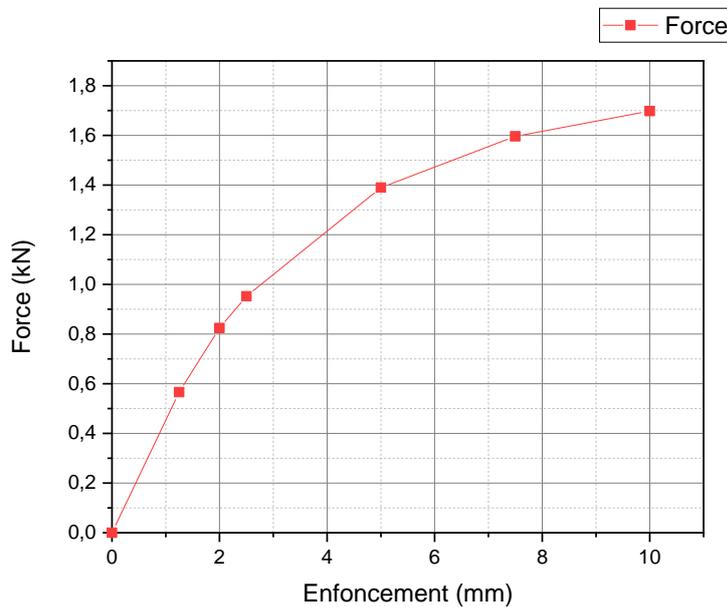


Figure III.23. Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité.

III.3.3.3. Compression simple non confinée (l’EN 12390-4).

Essai de compression simple non confinée (figure III.) a pour but de déterminer la résistance à la compression simple  $R_c$  qui est définie comme la contrainte mesurée à la rupture. La compression d'échantillons de forme cylindrique (diamètre de 7.5cm et hauteur de 15 cm) préparés avec les caractéristiques optimales obtenues par le compactage Proctor et conservés pendant ( 7jours, 14 jours, 28 jours et 56 jours ).



**Figure. III.24.** Appareil de compression au niveau de laboratoire de recherche (université 8 Mai 1945 Guelma)

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 :

$$R_c = \frac{F}{S}$$

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

$S$  : la section de l'éprouvette cylindrique (en  $m^2$ ) est la surface de la section de l'éprouvette.  $S = \frac{\pi D^2}{4}$

L'argile a été initialement séchée dans une étuve pendant une période de 24 heures. Après séchage, nous avons mélangé l'argile sèche avec une quantité d'eau et malaxé jusqu'à l'obtention d'un mélange parfaitement homogène. Une fois les mélanges préparés, les éprouvettes ont été compactées selon la méthode de compactage statique à l'aide de la presse **UNIFRAME**. La résistance a la compression de sol naturel (non traité) :

$$R_c = \frac{F}{S} = 146.59 \text{ kPa}$$

Avec :  $D=0.075m$ ,  $S=0.0044m^2$  ,  $F=0.645kN$  .

### III.3.3.5. Essai de cisaillement rectiligne à la boîte (EN 12390-3) .

L'objectif de ces essais est la détermination des paramètres de du cisaillement sol et qui sont : l'angle de frottement interne  $\varphi$ , la cohésion  $C$  et la résistance au cisaillement. L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placé dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes circulaires indépendantes. Il consiste à :

- Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) constant.

- Produire après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (N) un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontale de glissement des 2 demi- boîtes l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif à vitesse constante.
- Mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant.

Pour chaque valeur de N (effort normal) on détermine une valeur maximale de T (effort de cisaillement). On reporte le point (N, T<sub>max</sub>) sur le diagramme (N, T). On peut représenter le diagramme en remplaçant N et T par  $\sigma=N/S$  et  $\tau=T/S$ , S étant la surface de contact à la rupture.

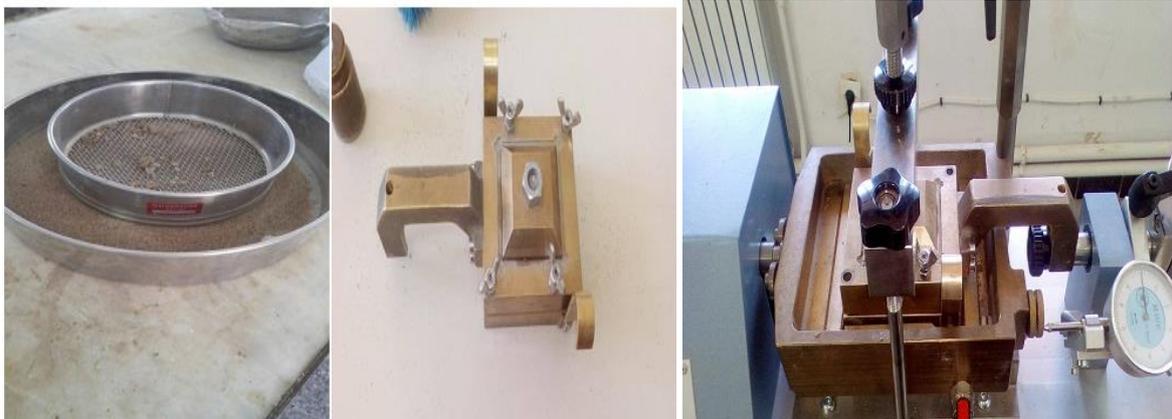
La boîte de cisaillement est constituée d'un dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette. Le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre le deux demi boîtes. Le système de mesure des efforts, des déplacements et du temps est montre sur la figure III.18.



**Figure III.25.** Essai de cisaillement rectiligne à la boîte avec les instruments de mesure.

L'échantillon de sol compacté dynamiquement (par la presse), et placés ensuite dans des boîtes circulaires de 6 cm de diamètre. L'essai adopté pour le cisaillement est « non consolidé non drainé », avec une vitesse de cisaillement de 0.24 m/min, les pressions interstitielles ne se dissipent pas.

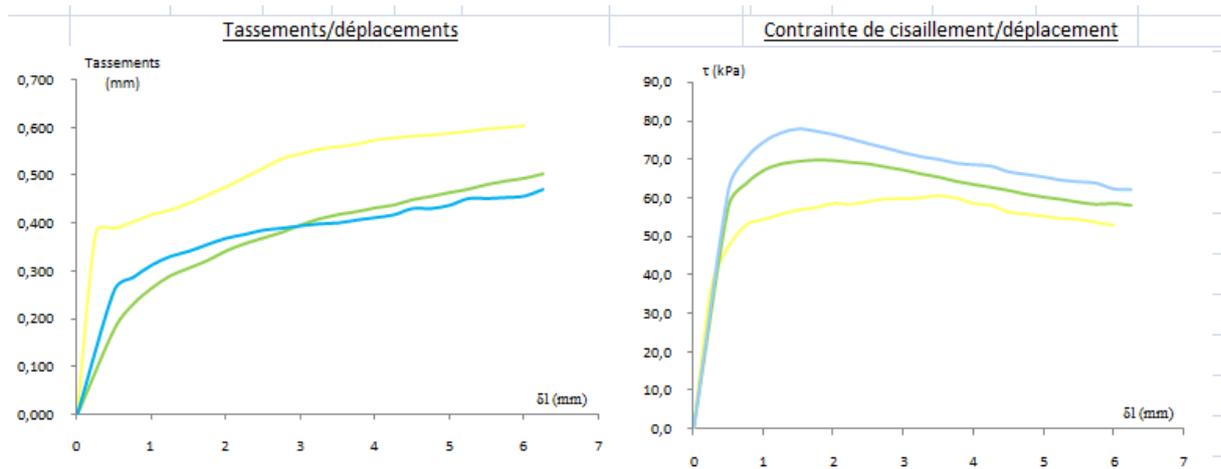
Cet essai rapide correspond au comportement à court terme. Pendant l'essai, le volume est constant. Cet essai est interprété en contraintes totales et permet d'estimer la cohésion non drainée. Il est nécessaire de rappeler que les essais de cisaillement réalisés sont uniquement ceux qui ont donné le meilleur rendement dans l'essai de la compression. La figure III.26 présente la préparation des éprouvettes pour l'essai de cisaillement rectiligne à la boîte.



**Figure III.26.** Préparation des éprouvettes pour l'essai de cisaillement rectiligne à la boîte.

➤ **Interprétation des résultats :**

La figure III.12 présente la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives pour les trois contraintes normales : 100, 200 et 300 KPa.



**Figure III.27.** Contrainte de cisaillement en fonction des déplacements (Argile étudiée).

D'après le courbe de compactage, la contrainte de cisaillement augmente jusqu'à l'état d'équilibre limite caractérisé par la présence d'un pic  $I_{max}$ , que signifie l'argile est dense. La figure ci-dessous (figure III.13) présente la courbe intrinsèque de notre argile utilisée.

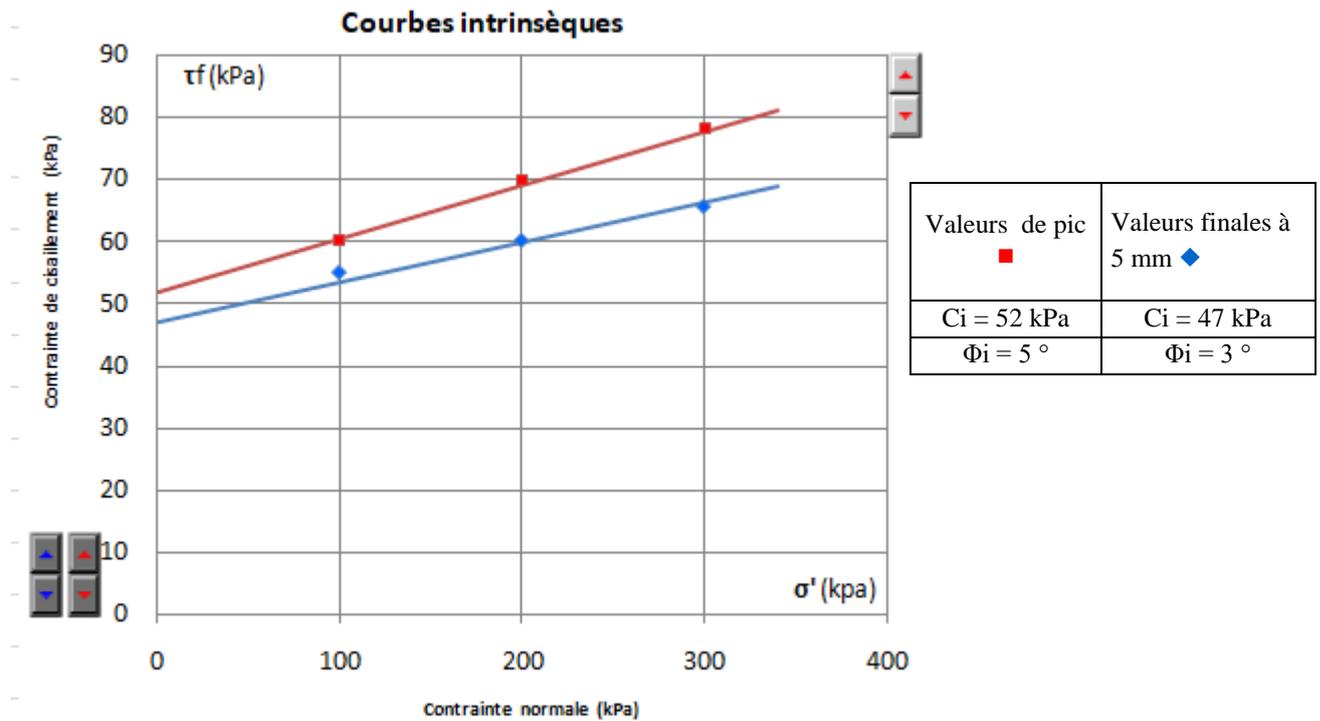


Figure III.28. Courbe intrinsèque de l'argile naturelle.

D'après la courbe intrinsèque (Figure III.13) il y a une ligne droite qui correspond à l'équation d'identification avec l'utilisation de l'équation de coulomb :

$$\tau = \sigma \tan \phi + c.$$

Avec :  $C_i = 47 \text{ kPa}$  et  $\Phi_i = 3^\circ$ .

### III.3.3.6. Essai de gonflement à l'œdomètre (NF P 94-91).

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

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



**Figure III.29.** Appareillage de l’essai Oedométrique.

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

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

➤ **Le potentiel de gonflement (C<sub>g</sub>).**

Le potentiel de gonflement (C<sub>g</sub>) d’un élément de sol ou de roche, dont l’état physique initial est connu, est la déformation maximale ( $\Delta h/h$ ) que provoque l’imbibition de cet élément soumis à un état de contrainte nulle ou quasi-nulle jusqu’à sa saturation complète.

**Tableau III.20.** Classification des résultats suivant l’indice de gonflement C<sub>g</sub>.

C <sub>g</sub>	Classification
C <sub>g</sub> > 0.05	Sol gonflant
C <sub>g</sub> < 0.05	Sol peu gonflant

De nombreux modèles visant à estimer le potentiel de gonflement sont formulées à partir des limites d’Atterberg et de paramètres qui en découlent. Le tableau 1.4 donne quelques exemples de cette estimation.

**Tableau III.21.** Relation entre le potentiel de gonflement et l’indice de plasticité (Seed et al., 1962).

I <sub>P</sub> (%)	Taux de gonflement
0-1	Faible

10-20	Moyen
20-35	Elevé

➤ **Interprétation des résultats.**

Les résultats obtenus par l'essai œdométrique sont :

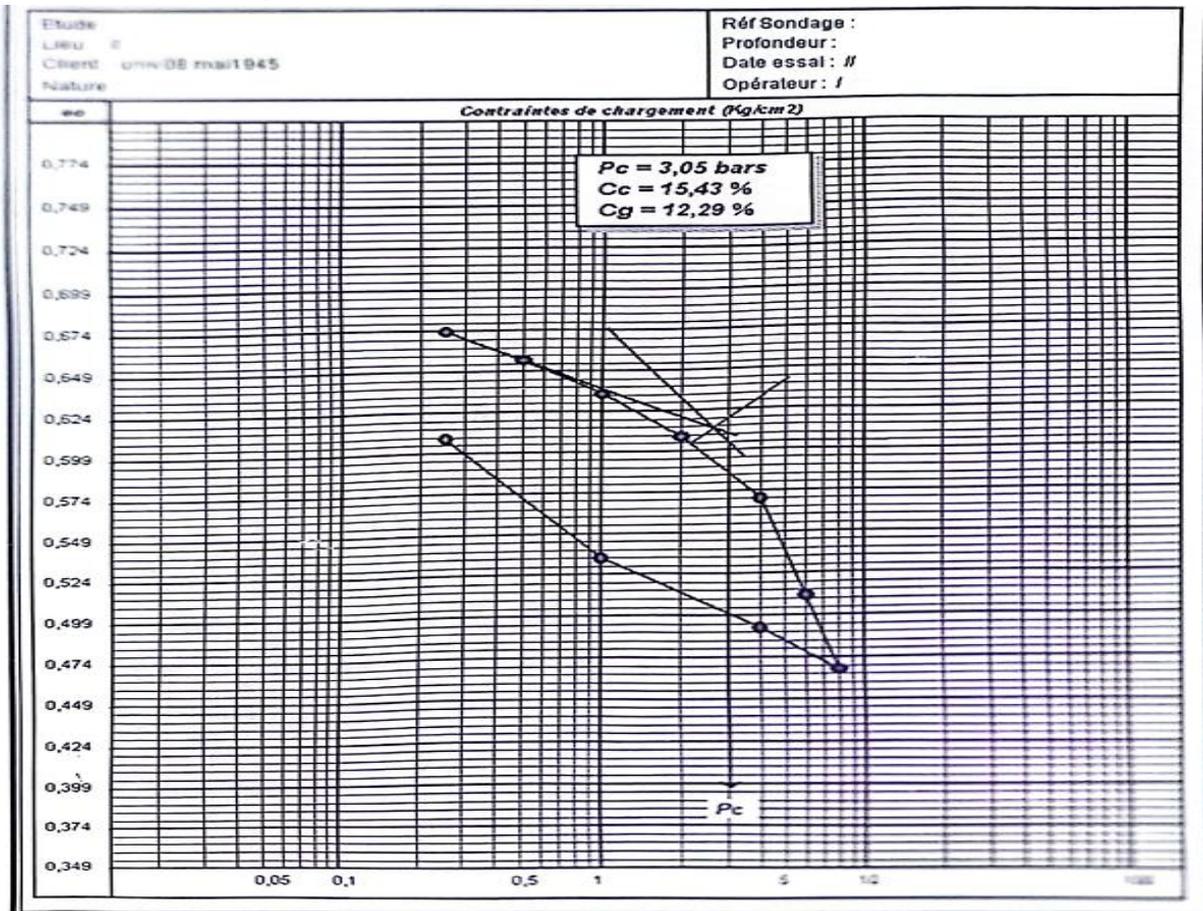


Figure III.30. Essais œdométrique de l'argile naturelle .

D'après la Figure III.23, le Tableau III-8:

**Cg=0.1229**      **→ argile gonflante.**

**III.4. Conclusion.**

Lorsqu'on entreprend une étude géotechnique, l'identification des sols présents sur le site constitue une étape fondamentale. Une connaissance précise des caractéristiques des sols est indispensable pour orienter les analyses ultérieures et, surtout, pour classifier les matériaux rencontrés. Ce chapitre a pour but de présenter la démarche expérimentale permettant

d'évaluer les propriétés mécaniques et physiques du sol de la région de Elkharka, dans la Wilaya de Mila, et de le classer.

D'après les résultats des analyses granulométriques, le sol de Mila est constitué à 100 % d'éléments inférieurs à 80  $\mu\text{m}$ , ce qui confirme qu'il s'agit d'un sol fin. Sa teneur en eau naturelle est de 24,40 %. Les essais des limites d'Atterberg et l'essai oedométrique ont classé le sol étudié comme étant une argile plastique dure et gonflante.

# **Chapitre IV**

## **Concepts Fondamentaux des Plans d'Expériences**

## Concepts Fondamentaux des Plans d'Expériences

### IV.1. Introduction.

L'intelligence artificielle (IA) se réfère à la capacité des machines et des systèmes informatiques à exécuter des tâches qui nécessitent généralement l'intelligence humaine. Ces tâches incluent la résolution de problèmes, l'apprentissage, la perception, le raisonnement, et l'adaptation à des situations nouvelles ou changeantes. L'IA repose sur des algorithmes et des modèles informatiques complexes qui permettent aux machines de traiter et d'analyser de grandes quantités de données pour prendre des décisions, prédire des résultats, et résoudre des problèmes de manière autonome. L'IA permettrait aux ingénieurs civils et aux géotechniciens de prendre des décisions plus éclairées dès les premières étapes de conception d'un projet. Par exemple, ils pourraient estimer la capacité portante du sol, sa compressibilité et d'autres paramètres importants, ce qui leur permettrait de concevoir des fondations et des structures adaptées aux conditions spécifiques du site. Donc l'application de l'IA dans la prédiction des caractéristiques du sol offre un potentiel considérable pour améliorer l'efficacité, la sécurité et la durabilité des projets de génie civil.

Les plans des expériences (PEX) est une branche de la statistique appliquée axée sur l'utilisation de la méthode scientifique pour la **planification, réalisation**, l'analyse et l'interprétation de données issues d'essais ou d'expériences contrôlés. PEX est une méthodologie mathématique utilisée pour planifier et mener efficacement une étude scientifique qui modifie simultanément les variables d'entrée (X) appelées Facteurs afin de révéler leurs effets sur une variable de sortie (ou plusieurs) (Y) appelée Réponse .

Dans notre chapitre, nous appliquons le principe de l'intelligence artificielle (IA) à travers la méthode du plan d'expérience, également connue en anglais sous le nom de Design of Experiments (DOE). Cette méthode consiste en une suite ordonnée d'essais d'une expérimentation, chacun permettant d'acquérir de nouvelles connaissances en maîtrisant un ou plusieurs paramètres d'entrée afin d'obtenir des résultats validant un modèle avec une bonne économie de moyens (en réduisant par exemple le nombre d'essais au strict nécessaire).

### IV.2. Termes et concepts communs des plans d'expériences :

Il y a plusieurs aspects dans un processus d'un plan d'expériences :

- **Réponses ou sorties de l'expérience** : sont des résultats mesurables potentiellement influencés par les facteurs et leurs niveaux respectifs. Les expérimentateurs souhaitent souvent éviter d'optimiser le processus pour une réponse au détriment d'une autre. Pour cette raison, les résultats importants sont mesurés et analysés afin de déterminer les facteurs et leurs niveaux qui fourniront le meilleur résultat global pour les caractéristiques essentielles de la qualité.
- **Facteurs ou entrées pour le processus** : Les facteurs peuvent être classés en variables contrôlables ou non contrôlables. Les variables contrôlables seront appelées

facteurs. Les gens considèrent généralement un facteur de bruit comme un facteur incontrôlable qui provoque la variabilité dans des conditions de fonctionnement normales, mais dans certains cas ce facteur peut être contrôlé pendant l'expérience en utilisant le blocage et la randomisation.

- **Facteur quantitatif** : c'est un facteur qui a une valeur donnée. Par contre, si par exemple, le niveau bas et le niveau haut correspondront aux deux modalités du facteur: -1 pour « sans » et +1 pour « avec ». Toutefois ce même facteur peut être quantitatif si nous étudions sa quantité au lieu de son absence/présence.
- **Niveaux et domaine d'étude de chaque facteur** : En plans d'expériences, lorsque nous étudions l'influence d'un facteur, en général, nous limitons sa variation entre deux bornes appelées respectivement : niveau bas (-1) et niveau haut (+1) qui définissent le domaine d'étude de ce facteur.
- **Interaction** : Les interactions se produisent lorsque l'impact d'un facteur dépend de la valeur d'un second facteur.
- **Blocage et réplication** : Le blocage est une technique expérimentale visant à éviter toute variation indésirable du processus d'entrée ou du processus expérimental. Par exemple, une expérience peut être menée avec le même équipement pour éviter toute variation de l'équipement.
- **Notion de modèle et de régression linéaire multiple** : La régression linéaire multiple est une méthode d'analyse de données quantitatives. Elle a pour but de mettre en évidence la liaison pouvant exister entre une variable dite expliquée (réponse), que nous la noterons  $y$  et plusieurs autres variables dites explicatives (facteurs) que nous les noterons  $x_1, x_2, \dots, x_k$ .

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (V.1)$$

### IV.3. Cas d'utilisation des plans d'expériences.

Un PEX permet à l'expérimentateur de manipuler plusieurs entrées pour déterminer leurs effets sur la sortie de l'expérience ou du processus. De nombreuses expériences maintiennent certains facteurs constants et de modifient le niveau d'une autre variable. L'utilisation de cette approche "un facteur à la fois" (OFAT) pour traiter les données est toutefois inefficace par rapport à l'évolution simultanée des niveaux des facteurs. En réalisant une expérience multi-factorielle, le PEX peut révéler des interactions critiques entre les facteurs qui sont souvent omises lors de la réalisation d'une expérience simple. Les ingénieurs seront en mesure d'identifier les facteurs qui ont le plus d'impact sur le processus et ceux qui ont le moins d'influence sur les résultats du processus c-à-d déterminer et quantifier les effets clés (effets principaux et effets des interactions) dans un processus donné. Ce qui permet une éventuelle réduction du nombre de facteurs à considérer en négligeant certains parmi ces facteurs.

Les PEX permettent aussi de modéliser la réponse en fonction des différents facteurs ce qui définit une relation mathématique entre la réponse et ces facteurs et de fournir des informations statistiques sur la qualité du modèle obtenu (degré de son prédictibilité, robustesse, adéquation, etc). Cette modélisation permet de répondre à des questions du genre :

- Dans quels paramètres le processus offrirait-il des performances acceptables ? (Optimisation) ;

- Quelle sera la réponse du processus sous une configuration donnée des facteurs ? (Prédiction).

#### IV.4. Objectifs d'utilisation des plans d'expériences.

##### IV.4.1 Objectif de comparaison d'alternatives.

Dans le cas d'un exemple de la cuisson du gâteau, nous pourrions vouloir comparer les résultats de deux différents types de farine. S'il s'avérait que la farine des différents fournisseurs avait un résultat non significatif, nous pourrions choisir le fournisseur le moins coûteux. Si le résultat était significatif, nous choisirions celui de la meilleure farine.

##### IV.4.1.1 Objectif de criblage.

Il existe souvent de nombreux facteurs possibles, dont certains peuvent être critiques et d'autres qui ne peuvent avoir que peu ou pas d'effet sur la réponse. En tant que but en soi, il est peut être souhaitable de réduire le nombre de facteurs à un ensemble relativement petit (2 à 5), de manière à concentrer l'attention sur le contrôle de ces facteurs. Les expériences de criblage sont un moyen efficace, avec un nombre minimal de tests, pour déterminer les facteurs importants.

##### IV.4.1.2 Objectif de modélisation.

La méthodologie de surface de réponse est un ensemble de techniques mathématiques et statistiques pour la construction de modèles mathématiques empiriques. L'exploitation de ces modèles peut répondre à plusieurs objectifs :

- **Objectif de prédiction** : Un modèle mathématique obtenu peut être utilisé pour prédire une réponse à un point quelconque dans les limites des domaines expérimentaux. La précision des réponses obtenues dépend du degré de capacité de prédiction du modèle.

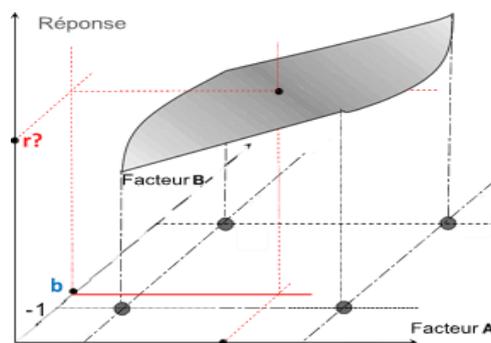


Figure IV.1. Exemple graphique de prédiction de la réponse

- **Objectif d'optimisation** : Une optimisation est effectuée pour déterminer les valeurs des entrées du processus à utiliser pour obtenir la sortie du processus souhaitée. Les objectifs d'optimisation habituels peuvent être de maximiser le rendement d'un

processus, de minimiser le temps de traitement nécessaire à la fabrication d'un produit ou d'atteindre une spécification du produit cible.

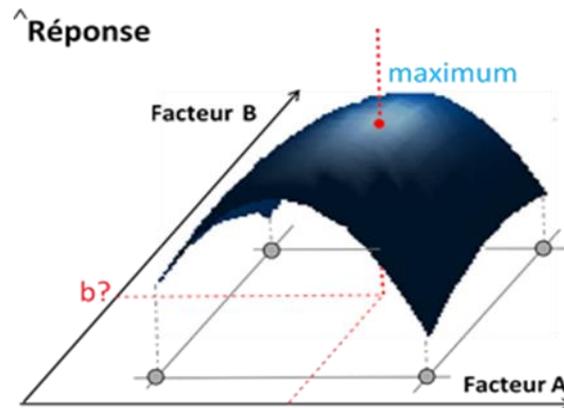


Figure IV.2. Exemple graphique de l'optimisation de la réponse.

- **Objectif d'optimisation multi-réponse (Équilibrer les compromis) :** L'objectif est de déterminer les paramètres des facteurs permettant d'optimiser simultanément (un compromis) plusieurs réponses.

#### IV.5. Quelques notions sur la MPE.

##### IV.5.1. Notions d'espace expérimental.

Dans leurs études, les expérimentateurs s'intéressent à la grandeur « réponse » qu'ils mesurent à chaque essai, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette dernière dépend d'un ou de plusieurs facteurs [4]. Aussi, la valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée « **niveau** ». Et souvent, lorsque l'influence d'un facteur est étudiée, sa variation est limitée par deux bornes.

- La borne inférieure dite aussi le niveau bas est notée  $N_b$ .
- La borne supérieure dite aussi niveau haut est notée  $N_h$ .

La variation de chaque facteur peut être représentée par un axe gradué et orienté, ainsi un exemple sur la définition du domaine de variation d'un facteur est illustré dans la figure IV.3.

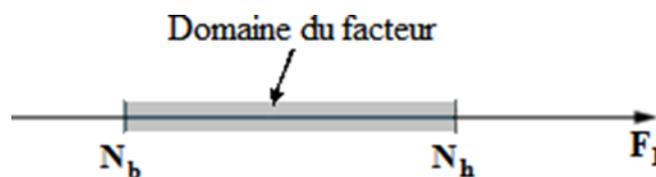


Figure IV.3. Domaine de variation d'un facteur.

L'ensemble des valeurs que peut prendre le facteur «  $F_1$  » entre  $N_b$  et  $N_h$ , s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur «  $F_1$  ».

Dans le cas où un autre facteur «  $F_2$  » influence la variation de la réponse, il sera représenté lui aussi par un axe gradué et orienté. Ainsi, comme pour le premier facteur, ce dernier permettra d'illustrer, son niveau haut noté par  $N_h'$ , son niveau bas noté par  $N_b'$  et son domaine de

variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. De ce fait, auteurs [6,7] ont définis la MSR comme un ensemble d'outils permettant la compréhension et l'exploitation d'objets simplificateurs de la fonction réponse étudiée.

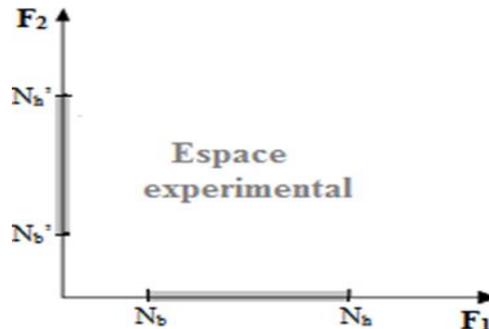


Figure IV.4. Représentation de l'espace expérimental [6].

**IV.5.2. Coordonnées centrées réduites.**

Dans l'intérêt de généraliser l'application de cette théorie et d'uniformiser sa présentations quels que soient le domaine d'étude et quels que soient la nature des facteurs, deux modifications doivent être effectuées. Ces deux modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables appelées Variables Centrées Réduites (V.C.R.) ; centrées pour indiquer le changement d'origine, et réduites pour signaler la nouvelle unité.

**IV.5.2.1. Changement de l'unité de mesure**

Les deux bornes de l'espace expérimental, à savoir le niveau bas et le niveau haut seront définis par les valeurs -1 et +1 respectivement.

**III.5.2.2. Déplacement de l'origine des mesures**

En prenant en considération les nouvelles unités de mesures, une origine autre que celle exprimée en unité courante doit être présentée. Dans cette perspective, la nouvelle origine peut être représentée par le milieu de l'intervalle [-1, +1].

Le passage des variables d'origine aux variables V.C.R. est donné par la formule suivante:

$$X = \frac{A - A_0}{\Delta A} \quad (V.1)$$

Où les grandeurs X, A et A0 représente respectivement la variable centrée réduite, la variable d'origine et la valeur centrale en unité courante. Les variables codées résultent du rapport de deux grandeurs de même unité physique, elles sont donc sans dimension. La disparition des unités naturelles associées au fait que tous les facteurs ont le même domaine de variation (deux unités codées), permettant ainsi la comparaison directe des effets des facteurs entre eux.

**V.5.2.3. Domaine d'étude.**

Dans la pratique, l'expérimentateur sélectionne une partie de l'espace expérimental pour réaliser son étude. Cette zone particulière de l'espace expérimental est dite le domaine d'étude. Ce dernier est défini par les niveaux hauts et bas de tous les facteurs et éventuellement par des contraintes entre les facteurs (figure V.7).

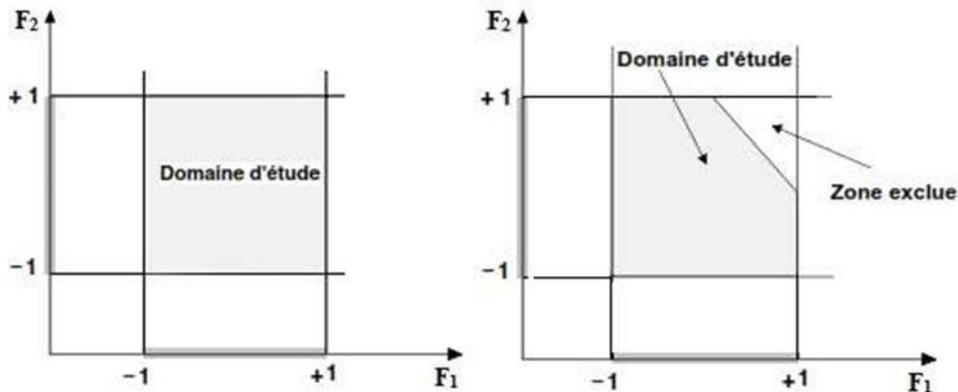


Figure .IV.5. Domaine d'étude défini par l'union des domaines des différents facteurs.

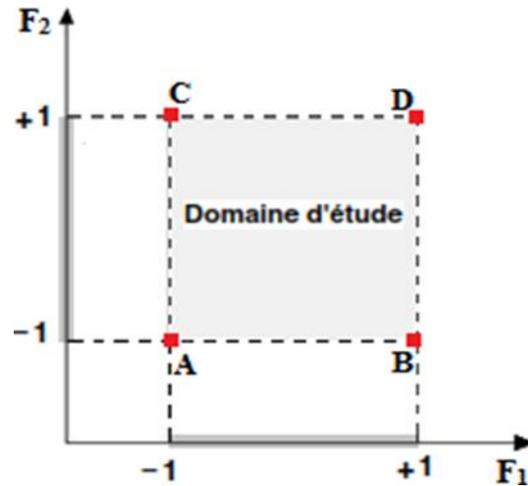
Dans le cas où des contraintes se manifestent sur le domaine d'étude, une réduction de celui-ci est ainsi envisageable c.-à-d. une zone du domaine d'étude initial est mise à l'écart par l'expérimentateur tel que représenté à gauche de la figure V.4.

### V.5.3. Notion sur la représentation des plans d'expérimentation

Le choix du nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental de cette méthode. Pour répondre à ces problèmes, deux techniques ont été proposées dans la littérature [12] ; la première, principale dite géométrique et la seconde, équivalente à celle-ci est dite matricielle.

#### III.5.3.1.Représentation géométrique.

Le meilleur emplacement des points expérimentaux se situe aux sommets du carré définissant le domaine d'étude. Chaque point de ce domaine représente des conditions opératoires possibles, donc une expérience que l'opérateur pourrait réaliser [12]. La disposition des points expérimentaux qui tient compte des propriétés mathématiques et statistiques existantes entre la réponse et les deux paramètres est donnée à la figure IV.6.



**Figure .IV.6.** Représentation géométrique d'un plan à deux facteurs.

Dès que le nombre de facteurs est supérieur à trois, cette méthode de représentation ne peut plus être employée. De ce fait, pour les espaces multidimensionnels, la représentation matricielle est recommandée.

#### V.5.3.2.Représentation matricielle.

La représentation matricielle équivalente à la disposition présentée dans le tableau IV.1.

Configurations	F1	F2	Point correspondant
1	-1	-1	A
2	+1	-1	B
3	-1	+1	C
4	+1	+1	D

**Tableau IV.1.** Représentation matricielle d'un plan à deux facteurs.

### IV.6. Différents plans d'expériences existants.

Parmi les plans d'expériences existants, certains sont plus utilisés. Nous distinguons:

#### IV.6.1.Plan factoriel complet (PFC).

Le plan factoriel complet est un plan d'expériences qui permet de répondre, dans l'idéal, à deux questions différentes dans le même essai, «... mettre en évidence non seulement leurs effets respectifs mais aussi leurs éventuelles interactions... ». L'introduction aux plans PFC se fait par un exemple didactique [11]. Il permet d'introduire les principales notations utilisées par la méthode des plans d'expériences. Il sert également de base à une généralisation de l'écriture mathématique utilisée.

S'il n'est pas prévu de répéter chaque traitement, le nombre d'essais à réaliser est donc aussi égal à  $Bn$ . Dans le cas contraire, en appelant  $r$  le nombre de répétitions, devant être le

même pour tous les traitements, le nombre total d'essais à réaliser dans le plan expérimental est donné par la formule (IV.2) :

$$N = r * B_n \quad (IV.2)$$

#### IV.6.2. Plan factoriel fractionnaire.

Le plan factoriel fractionnaire est l'un des aspects les plus intéressants de la méthode des plans d'expériences. Il donne la possibilité de réaliser des plans factoriels à k facteurs avec moins de  $2^k$  expériences [11]. Dans de nombreux domaines, les interactions d'ordre élevées sont souvent considérées comme négligeables. Trop d'expériences sont donc réalisées, d'où l'idée de diminuer la taille des plans et d'utiliser pour l'étude de k facteurs, des matrices d'expériences issues de plan  $2^{k-1}$ ,  $2^{k-2}$ , ...,  $2^{k-p}$ .

#### IV.6.3. Plan Rechtschaffner.

Les plans de Rechtschaffner [8] sont des plans factoriels fractionnaires simplifiés qui permettent de déterminer les effets des facteurs et les interactions d'ordre deux uniquement. Mis à part les interactions d'ordre un et deux, toutes les autres sont supposées nulles avant même l'expérimentation. Par conséquent, dans le cas d'utilisation de ce type de plan, le modèle mathématique à adopter au début de l'étude est :

$$y = a_0 + \sum a_{ixi} + \sum a_{ijxixj} \quad (IV.3)$$

Il suffit de choisir un plan fractionnaire de résolution trois pour obtenir un plan de Rechtschaffner. Mais l'idée de ne déterminer que les effets principaux et les interactions d'ordre deux a été étendue par Rechtschaffner aux plans du second degré et aux facteurs prenant trois niveaux. Ces plans spéciaux sont indiqués dans des tables auxquelles il conviendra de se référer en cas de besoin.

#### IV.6.4. Plans de Plackett et Burman.

Les matrices de Plackett-Burman ne sont autres que des matrices d'Hadamard [7]. Ce sont des matrices ayant 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 lignes. Elles permettent donc des expérimentations ayant un nombre d'essais intermédiaire de celles des plans factoriels qui, eux, ont seulement  $2^k$  lignes (4, 8, 16, 32, etc.). Aussi, il est important de noter que ces derniers, sont des plans souvent saturés où le modèle mathématique (formule IV.4) est alors un modèle sans interaction.

$$y = a_0 + \sum N_{ai} X_i \quad (IV.4)$$

#### IV.6.5. Plans de Koshal.

Les plans de Koshal sont des plans qui permettent de déterminer uniquement les effets principaux des facteurs. Par ailleurs, aucune interaction ne peut être évaluée. Par conséquent, le modèle mathématique adopté est analogue à celui des plans de Plackett et Burman (formule IV.4). Malgré le fait que ces plans soient peu connus, leur emploi, dans certains cas, peut-être d'une grande utilité, comme pour dégrossir un problème. Il convient aussi de noter que ces

plans forment le début d'un plan factoriel et qu'il est toujours loisible de le compléter pour obtenir un plan complet ou fractionnaire.

#### IV.6.6. Tables de Taguchi.

Ces plans sont issus des travaux de Genichi Taguchi dans le but de permettre une utilisation simplifiée des plans factoriels. Les modèles utilisés dans ce cadre étant d'ordre strictement inférieur à 3, seules les composantes nécessaires sont gardées, lors du calcul des coefficients restants. Très souvent, les interactions d'ordre 2 ne sont pas toutes calculées, ce qui apporte des allègements de calcul parfois intéressants.

### IV.7. Différents types des plans d'expérience.

#### IV.7.1. Plans factoriels complets à deux niveaux.

Les plans factoriels complets à deux niveaux sont les plus simples, ils sont aussi les plus utiles car ils forment la base de tous les débuts d'étude. Les premiers résultats obtenus grâce à ces plans peuvent toujours être complétés par de nouvelles expériences permettant d'atteindre le degré de précision et d'information recherché.

##### IV.7.1.1. Plans complets à deux facteurs.

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est un carré, représente un plan factoriel complet à deux facteurs. Le modèle mathématique postulé est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 \quad (\text{IV. 5})$$

Où

y : est la réponse

x : variables de prédiction appelées facteurs

a : sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

Nous allons d'abord décrire le cas simple du plan  $2^2$ . Commençons par expliquer cette notation :

- Le 2 en exposant signifie qu'il y a deux facteurs étudiés.
- L'autre 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux.

Cette notation se généralise immédiatement : pour un plan comportant l'étude de k facteurs prenant chacun deux niveaux, on écrira qu'il s'agit d'un plan  $2k$ .

##### IV.7.1.2. Plans factoriels à k facteurs à deux niveaux :

On peut augmenter le nombre de facteurs. L'espace expérimental possède autant de dimensions qu'il y a de facteurs.

Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est noté  $2k$ .

- Le k en exposant signifie qu'il y a k facteurs étudiés.
- Le 2 indique le nombre de niveaux par facteur.

### IV.7.2. Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux.

Les plans factoriels fractionnaires sont des plans factoriels qui permettent d'étudier tous les facteurs mais dont le nombre d'essais est réduit par rapport aux plans factoriels complets. Les plans fractionnaires ont été conçus pour remédier à l'inflation rapide du nombre d'essais dans les plans complets.

L'objectif des plans fractionnaires va consister à réduire le nombre.

#### A. .Notation des plans factoriels fractionnaires:

Pour  $k$  facteurs prenant deux niveaux le plan complet est noté  $2^k$ .

Le plan fractionnaire, moitié du plan complet possède  $1/2 \cdot 2^k$  ou  $2^{k-1}$  essais. On peut donner une signification à chaque caractère de cette notation :

- Le  $k$  signifie qu'il y a  $k$  facteurs étudiés.
- Le  $2$  signifie que chaque facteur prend deux niveaux.
- Le  $1$  signifie que le nombre d'essais du plan a été divisé par  $2^1$ .

Un plan  $2^{5-2}$  permet d'étudier cinq facteurs prenant chacun deux niveaux en 8 essais. Le plan complet a été divisé par  $2^2 = 4$ .

Un plan  $2^{k-q}$  permet d'étudier  $k$  facteurs prenant chacun deux niveaux. Le plan complet a été divisé par  $2^q$ .

Les plans fractionnaires nécessitent moins d'expériences qu'un plan factoriel.

Le nombre d'expériences :  $n_{k-q}$

La matrice d'expériences est donc divisée  $k$  fois.

## IV. 8. Méthode d'optimisation

### IV.8.1. RSM (response surface méthodologie):

Le but de l'étude des surfaces de réponses est une modélisation du phénomène étudié, c'est une suite assez naturelle d'une étape de criblage et constitue un moyen efficace de l'optimisation du dispositif expérimentale ou du procédé étudié. Dans la méthodologie des surfaces de réponses, on cherche à relier une réponse continue  $Y$  à  $k$  facteurs continus et contrôlés  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , à l'aide d'un modèle de régression, il est courant d'utiliser un modèle du second degré incluant les effets quadratiques des facteurs. Dans la plupart des cas, ce dernier est suffisant pour modéliser correctement les phénomènes étudiés. Après l'étape d'ajustement du modèle on représente graphiquement celui-ci à l'aide de graphiques de type « surface de réponse », qui permettent de visualiser le comportement de la réponse en fonction des facteurs, ces graphiques procurent une aide appréciable dans l'exploitation du modèle en vue d'une optimisation du système expérimentation.

### IV.8.2. Les Principes généraux.

La méthode des surfaces de réponse (RSM) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser des procédés. Elle a aussi

d'importantes applications dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de la conception de produits existants.

L'objectif de cette méthode est, plus que de hiérarchiser les effets des différents facteurs, de décrire le plus précisément possible le comportement de la réponse en fonction des variations des facteurs [19].

**IV.8.3. Étapes de la méthodologie de surface de réponse.**

Il est possible de séparer une étude d'optimisation utilisant RSM en trois étapes.

- **La première étape** : est le travail préliminaire dans lequel la détermination des paramètres indépendants et de leurs niveaux est effectuée.
- **La deuxième étape** : est Classement des essais et le traitement et l'analyse des données et la prédiction et la vérification de l'équation du modèle.
- **La troisième étape** : est la représentation des surfaces de réponse dans un espace à trois dimensions (3D) et la détermination des points optimaux.

**IV.8.3.1. La première étape.**

Cette étape concerne la détermination des paramètres opératoires et les domaines expérimentaux. L'étude d'optimisation a été menée sur les paramètres opératoires jugés influents sur le paramètre.

**IV.8.3.2. La deuxième étape.**

La deuxième étape peut élaborer selon les points suivants :

- A. Classement des essais :
- B. Modèle mathématique:

Le modèle mathématique postulé est un polynôme d'ordre 2 tel que l'équation (IV.6):

$$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_{11}X_1^2+b_{22}X_2^2+b_{33}X_3^2+b_{13}X_1X_3+b_{23}X_2X_3 \quad (IV.6)$$

Où:

Y : est la réponse et X1, X2 et X3 sont les valeurs des paramètres.

b<sub>0</sub>: représente le constante de modèle et b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> et b<sub>3</sub> sont les coefficients des termes linéaires et b<sub>11</sub>, b<sub>22</sub> et b<sub>33</sub> sont les coefficients des termes quadratiques et b<sub>12</sub>, b<sub>13</sub> et b<sub>23</sub> sont les coefficients des termes d'interaction.

**C. Traitement et analyse des données.**

Le modèle a été validé par le test de l'analyse de variance (ANOVA), le modèle, les coefficients de régression et le test de défaut d'ajustement vont être considérés comme significatifs lorsque les probabilités de la signification du risque p-value sont inférieures à 0,05. En plus de l'analyse de la variance, nous allons avoir recours à d'autres outils à savoir le coefficient de détermination multiple R<sup>2</sup> et le coefficient de variance CV, une valeur de coefficient de variance inférieur à 10% indique un degré de précision très élevé entre les valeurs expérimentales et prédites.

### IV.8.3.3. La troisième étape.

Cet est l'étude de l'optimisation. Après la détermination du modèle et la vérification de sa validité, le problème à l'étude doit être optimisé. Plusieurs méthodes d'optimisation peuvent permettre d'optimiser simultanément les différentes réponses découlant de l'emploi de la méthode des surfaces de réponses. Pour cela, il suffit de tracer des courbes d'iso réponses pour chaque critère en fonction des variables, puis d'hachurer les zones intéressantes suivant les objectifs retenus. Enfin, par superposition des graphes, on fait apparaître les zones de compromis. Malheureusement, si cette méthode semble très attractive pour des cas simples avec 2 ou 3 variables, elle devient très lourde pour des problèmes plus complexes. Parce que, l'utilisateur doit jongler avec un grand nombre de graphiques pour découvrir le meilleur compromis.

### II.9 Conclusion.

L'application des méthodes d'optimisation permet de résoudre les problèmes scientifiques posés, ainsi que l'amélioration des paramètres étudiés. Les méthodes des plans d'expériences sert la configuration expérimentale des problématiques d'études. Ces méthodes ont subi un grand développement par les scientifiques et les chercheurs dans le domaine de la géotechnique, car elles ont dépassé les méthodes classiques dans le but de répondre aux exigences pour améliorer le sol, réduire le nombre d'expériences et ainsi réduire les coûts traitement.

# **Chapitre V**

**Présentation, interprétation et  
optimisation des résultats**

*Présentation, interprétation et optimisation des résultats*

**V.1. Introduction**

Le traitement des sols est une technique très ancienne dont l'application, tant au niveau des travaux de terrassement que de la réfection des routes et des fondations, connaît actuellement un essor très important à l'échelle internationale. Le recours massif à cette technique, qui valorise les matériaux en place et entraîne une diminution notable des coûts, est principalement dû à la rareté des gisements naturels de matériaux de bonne qualité. En outre, la nécessité croissante de préserver les ressources naturelles existantes en optimisant leur utilisation et de limiter la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme favorise la valorisation des matériaux de substitution et la réduction des transports.

Ce chapitre est consacré à présenter l'ensemble des résultats des essais effectués sur l'échantillon de sol prélevé de la zone de Elkharba wilaya de Mila, qui a été traité avec les différents pourcentages d'ajouts de la céramique calcinée et activés à 2% d'ajout hydraulique le ciment. Les essais sont agencés comme suit : Essais d'identification (la teneur en eau, Analyse granulométrique, Limites d'Atterberg) et essais mécaniques (Proctor modifier, CBR). Ces résultats sont représentés sous forme de tableaux et de courbures.

**V.2. Choix de mode de traitement.**

Pour le traitement de l'argile ganflante de la région de Elkharba wilaya de Mila, on a opté comme ajout la céramique (CW) calcinée à 900°C pendant deux heures . Le tableau 3 illustre la composition chimique des déchets céramiques (CW) et La Figure V.1 représente l'analyse EDS de CW, et il peut être remarqué à partir de la micrographie que CW utilisé dans cette étude se compose principalement de silicium (Si), oxygène (O), aluminium (Al), calcium (Ca), fer (Fe), potassium (K), magnésium (Mg), titane (Ti), carbone (C) et sodium (Na). Une agglomération de fines particules céramiques a été observée à travers l'analyse SEM. Et le tableau V.1 donne les pourcentages des minéraux contient dans la céramique calcinée.

**Tableau V.1.** Composition chimique de déchet de céramique calcinée .

<b>Chemical composition</b>	<b>Si</b>	<b>O</b>	<b>Al</b>	<b>Ca</b>	<b>Fe</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Ti</b>	<b>C</b>	<b>Na</b>
<b>Si O</b>										
Content %	39.54	23.78	16.14	6.95	3.85	2.72	2.35	2.26	1.90	0.50

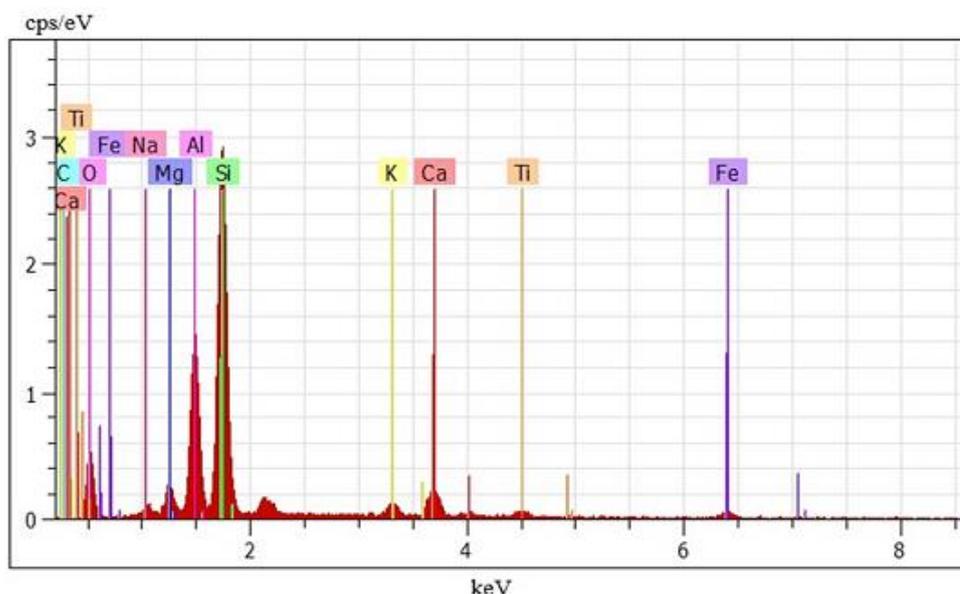


Figure V.1. Spectres DRX de déchet céramique calcinée .

### V.3. Préparation du mélange.

La méthode utilisée pour préparer les mélanges (argile + céramique calcinée, argile + céramique calcinée + 2% de ciment) est simple mais requiert un équipement de laboratoire approprié, comprenant des bacs, des petites pelles, une étuve, une balance électrique, des tamis, etc.

Pour chaque essai, une quantité d'argile tamisée est prélevée avec différentes granulométries en fonction des besoins spécifiques, puis des quantités croissantes de céramique calcinée (CW) et de céramique calcinée avec ciment (CWC) sont ajoutées selon le pourcentage désigné (de 3% à 18%), avec un incrément de 3%. Nous avons choisi ces proportions de 3% à 18% car elles offrent un avantage économique pour le traitement du sol. Des mélanges contenant des quantités variables d'argile et d'additifs sont préparés en vue d'expériences en laboratoire. Les échantillons de sol sont soumis à une procédure expérimentale systématique. Tout d'abord, ils sont exposés à une température de  $110 \pm 5$  °C dans un four afin d'assurer un séchage complet de la masse de sol. Une fois le séchage achevé, le sol est mélangé avec différentes quantités des additifs. En parallèle, la teneur en argile est évaluée et soigneusement intégrée pour garantir une uniformité parfaite des échantillons. Cette étape revêt une importance cruciale pour maintenir la cohérence des expériences. Les proportions de CW et CW avec ciment sont synthétisées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau V.3.** Proportions entre les différents composants.

	Proportions de Céramique calcinée (CW)	Proportion de Ciment
Mélange 1	0	0
Mélange 2	3%, 6%, 9%; 12%, 15% et 18%	0
Mélange 3	3%, 6%, 9%; 12%, 15% et 18%	2%

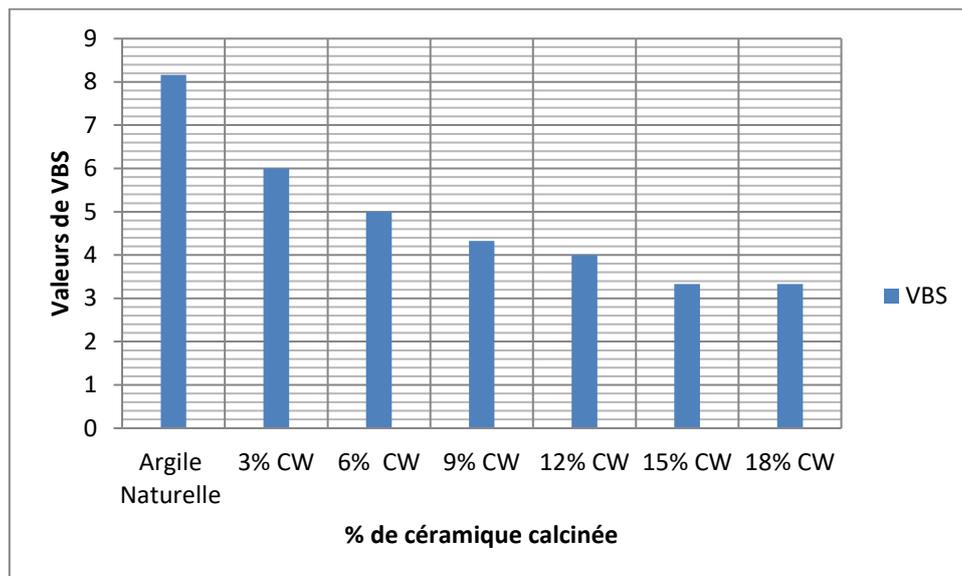
**Figure V.2.** Préparation des mélanges.

#### V.4. Influence de la céramique calcinée sur l'absorption du Bleu de Méthylène.

La quantité de bleu consommée est une indication de la quantité d'argile. Les résultats de l'essai au bleu de méthylène pour l'argile non traitée et l'argile traitée par la céramique calcinée ont été présentés dans le Tableau V.3. Selon les résultats de la VBS, on remarque que le degré d'argilosité, exprimé par la valeur de Bleu de Méthylène, diminue avec l'augmentation de la teneur en céramique. D'après le Guide des Terrassements Routiers (GTR), sept catégories de sols sont définies selon la valeur de VBS.

**Tableau V.3.** Résultats de l'essai au bleu de méthylène

Sols	Paramètres	VBS	Catégorie de sol
Argile		8,16	Sol très argileux
Argile +3% Céramique		6,00	Sol argileux
Argile + 6% Céramique		5	Sol limoneux de plasticité moyenne.
Argile + 9% Céramique		4,33	Sol limoneux de plasticité moyenne.
Argile + 12% Céramique		4	Sol limoneux de plasticité moyenne.
Argile + 15% Céramique		3,33	Sol limoneux de plasticité moyenne.
Argile + 18% Céramique		3,33	Sol limoneux de plasticité moyenne.



**Figure V.3.** Variation de la VBS en fonction du pourcentage de CB

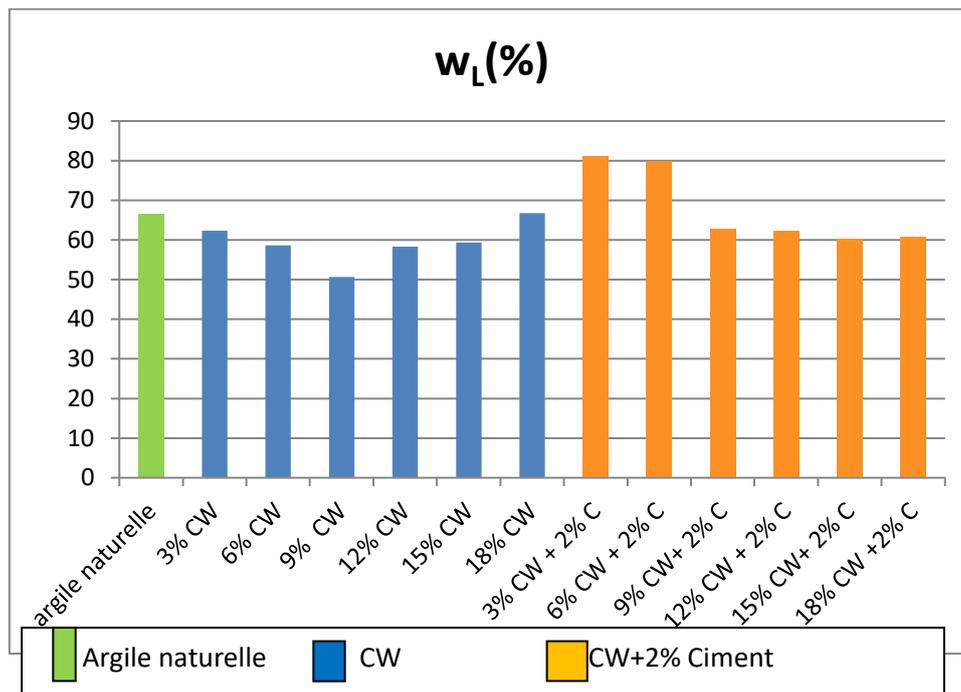
Selon la figure en remarquant que l'incorporation de céramique calcinée dans l'argile tend à réduire la valeur de VBS. Cette diminution indique une baisse de la quantité d'argile présente dans le mélange, ce qui peut être attribuable à plusieurs facteurs, notamment la réaction chimique entre les composants de la céramique calcinée et les particules d'argile, ainsi que la modification de la structure et des propriétés physiques du sol résultant de cette interaction.

### V.5. Influence de la céramique calcinée sur les limites d'ATTERBERG

Les résultats expérimentaux concernant la limite de liquidité (LL), la limite de plasticité (LP) et l'indice de plasticité (Ip) de l'argile améliorée par la céramique calcinée (CW) sans et avec 2% de ciment.

#### V.5.1. Variation de la limite de liquidité.

La limite de liquidité a été déterminée au laboratoire de l'Université de Guelma en utilisant la méthode de la coupelle de Casagrande pour l'argile traitée avec des pourcentages de 3%, 6%, 9%, 12%, 15% et 18% de céramique calcinée. La Figure IV.2 montre la variation de la limite de liquidité en fonction du nombre de coups. La variation de la limite de liquidité en fonction du pourcentage de céramique calcinée (CW), sans et avec l'ajout de 2% de ciment, est présentée sur la figure.



**Figure V.4.** Variation de la limite de liquidité en fonction du pourcentage d'additifs.

L'ajout de céramique calcinée (CW) entraîne une légère augmentation de la limite de liquidité jusqu'à 68,31% atteinte à 9% de CW, suivie d'une diminution progressive jusqu'à 58,61% à 9% de CW. Cette évolution peut être expliquée par le remplacement des ions  $\text{Na}^+$  présents dans l'argile par des ions  $\text{Ca}^{2+}$  apportés par la céramique calcinée.

**La diminution de la limite de liquidité est plus importante pour le pourcentage de céramique calcinée de 9% et peut être attribuée à :**

- L'augmentation de la surface spécifique du matériau : La céramique calcinée présente une surface spécifique plus élevée que l'argile ( poids volumique absolu  $2,59\text{g/cm}^3$ ), ce qui augmente la capacité du matériau à adsorber l'eau. Cependant, l'eau adsorbée sur la surface de la céramique calcinée n'est pas aussi efficace pour lubrifier les particules d'argile que l'eau libre, ce qui entraîne une diminution de la plasticité et de la limite de liquidité.
- La modification des propriétés physico-chimiques de l'argile : Les ions  $\text{Ca}^{2+}$  de la céramique calcinée peuvent interagir avec les charges négatives de la surface des particules d'argile, modifiant leur organisation et leur dispersion dans l'eau. Cette modification peut également affecter la plasticité et la limite de liquidité du matériau.
- La céramique calcinée est un matériau inerte qui ne présente pas de propriétés de plasticité.
- L'ajout de céramique calcinée à l'argile dilue la fraction argileuse, qui est responsable de la plasticité du matériau.

- Cette dilution réduit la capacité de l'argile à retenir l'eau, ce qui se traduit par une diminution de la limite de liquidité.

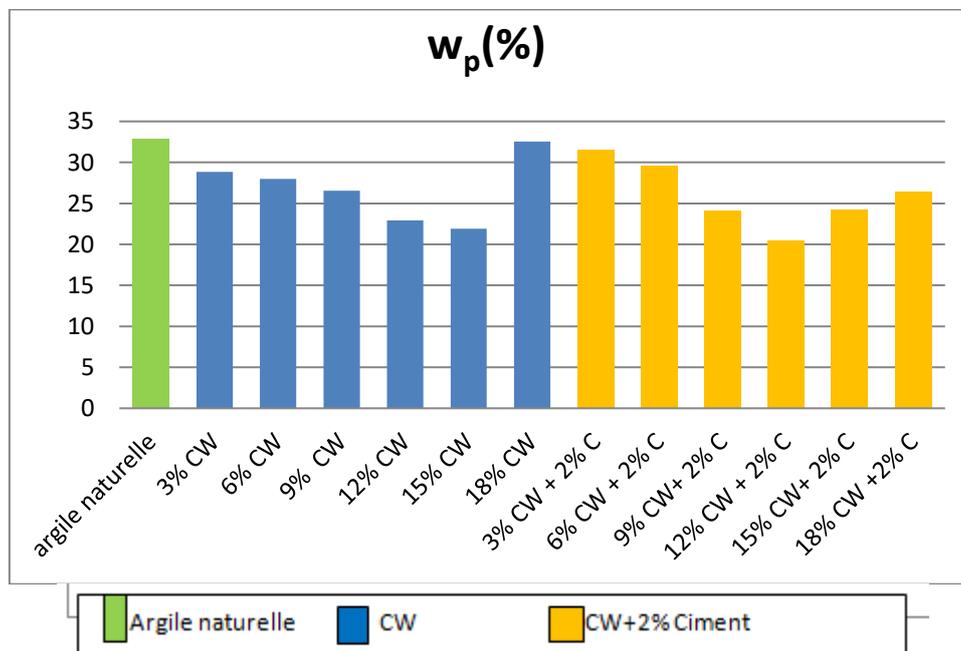
□ **Effet du ciment :**

- Le ciment, en présence d'eau, réagit et forme une matrice poreuse et résistante qui lie les particules d'argile et de céramique calcinée.
- Cette matrice renforce la structure du matériau et réduit sa plasticité.
- L'effet du ciment sur la limite de liquidité est similaire à celui de la céramique calcinée, mais il est généralement moins important.

En effet, cette étude révèle que l'ajout de 9% de céramique calcinée a un impact plus important sur la dilution de la fraction argileuse et la réduction de la plasticité. Au-delà de 9%, l'effet de la céramique calcinée sur ces propriétés est moins marqué, car la structure de l'argile est déjà plus diluée et l'ajout de céramique calcinée a un impact moins important sur la dilution de la fraction argileuse. Des nombreux chercheurs ont trouvés les mêmes variations tels que (Indraratna, 1996) (Jha & Sivapullaiah, 2015).

### V.5.2. Variation de limite de plasticité.

La variation de la limite de plasticité avec l'addition de CW sans et avec 2% de ciment est montrée par la courbe présentée sur la Figure V.5.



**Figure V.5.** Variation de la limite de plasticité en fonction du pourcentage d'additifs.

On observe que l'ajout de céramique calcinée sans ciment entraîne une diminution graduelle de la valeur de l'indice de plasticité ( $w_p$ ) avec l'augmentation du pourcentage de céramique calcinée. La diminution la plus importante est observée à 12% de céramique calcinée, où  $w_p$  atteint la valeur de 26,94%.

En présence de 2% de ciment, WP diminue également avec l'augmentation du pourcentage de céramique calcinée. La diminution est généralement plus importante que dans le cas de 12% de céramique calcinée et 2% de ciment, où  $\omega_p$  atteint la valeur de 20,45%. Le ciment, en présence d'eau, réagit et forme une matrice poreuse et résistante qui lie les particules d'argile et de céramique calcinée.

Les résultats observés dans cette étude sont cohérents avec les résultats d'autres chercheurs qui ont étudié l'effet de la céramique calcinée sur  $\omega_p$  de l'argile. Par exemple, Sharma et al. (2003) ont montré que l'ajout de 10% de céramique calcinée à une argile réduisait sa  $\omega_p$  de 20%. Bui et al. (2014) ont également observé une diminution de  $\omega_p$  avec l'ajout de céramique calcinée à des argiles de différentes origines. Cette diminution est due à ce que la céramique calcinée est un matériau inerte qui ne présente pas de propriétés de plasticité. Cette dilution réduit la capacité de l'argile à retenir l'eau, ce qui se traduit par une diminution de la  $\omega_p$ . Le même comportement a été observé par (Attoh-Okine, 1995) ; (Bell, 1996) ; (Okagbue & Yakubu, 2000).

### V.5.3. Variation de l'indice de plasticité.

La variation de l'indice de plasticité du sol fin traité avec CW sans et avec 2% de ciment est présentée dans la figure V.5. L'argile traitée a montré une diminution de l'indice de plasticité avec l'augmentation du pourcentage de CW sans et avec 2% de ciment. Cette diminution est très significative dans presque tous les mélanges. La diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration de la maniabilité du sol, le rendant plus friable et facile à manipuler. Plusieurs chercheurs ont observé la même tendance dans leurs travaux de recherche (Attoh Okine, 1995 ; Bagherpour et al., 2003 ; Sivapullaiah et al., 2003 ; Celal et Gokceglu, 2004 ; Ansary et al., 2006 ; Bozbey et al., 2010).

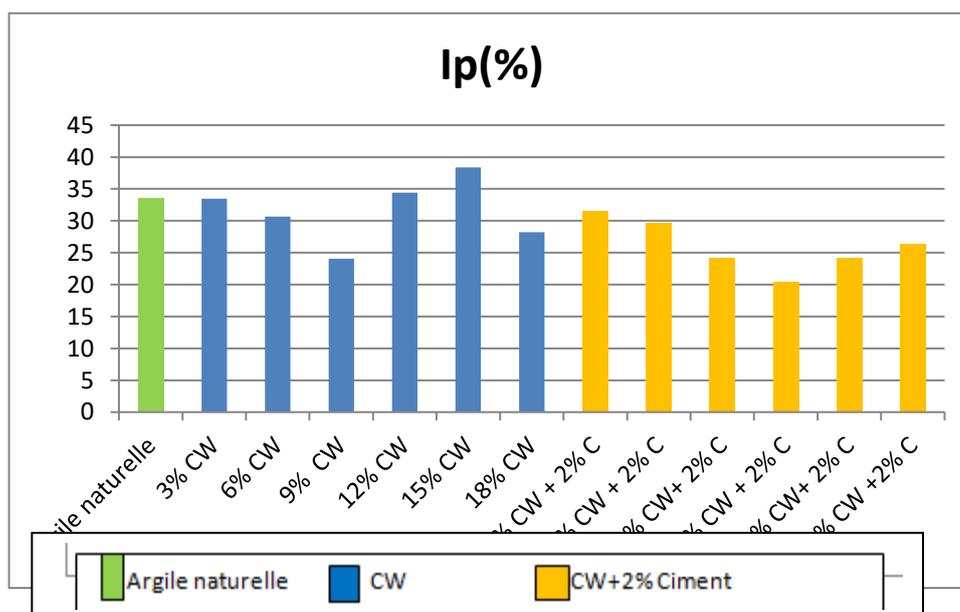


Figure V.6. Variation de la l'indice de plasticité en fonction du pourcentage d'additifs.

Selon cette étude, on peut conclure que l'ajout de CW et ciment à 2 % dans une argile peut avoir des effets significatifs sur ses limites de plasticité. En effet, l'ajout de ces additifs tend à diminuer à la fois la limite de liquidité et la limite de plasticité, entraînant une baisse de l'indice de plasticité. Cela signifie que l'argile traitée devient moins plastique.

### V.5. Influence de la céramique calcinée sur les caractéristiques de compactage.

Les résultats expérimentaux des caractéristiques de compactage Proctor standard sont présentés dans les figures. Ces données concernent le sol argileux traité avec céramique calcinée à la fois sans et avec l'ajout de 2 % de ciment.

#### V.5.1. Poids volumique sec maximal $\gamma_{dmax}$ (T/m<sup>3</sup>)

Les valeurs de la densité sèche maximale obtenues par l'essai Proctor (en T/m<sup>3</sup>) pour l'argile naturelle et l'argile traitée avec différents pourcentages CW sans et avec 2 % de ciment sont présentées dans la figure V.6, les résultats indiquent que ces additifs modifient les propriétés de compactage du sol en influençant le poids volumique sec maximal des mélanges. Ils suggèrent également qu'il y a des changements dans la microstructure du sol dus à l'ajout des différents additifs.

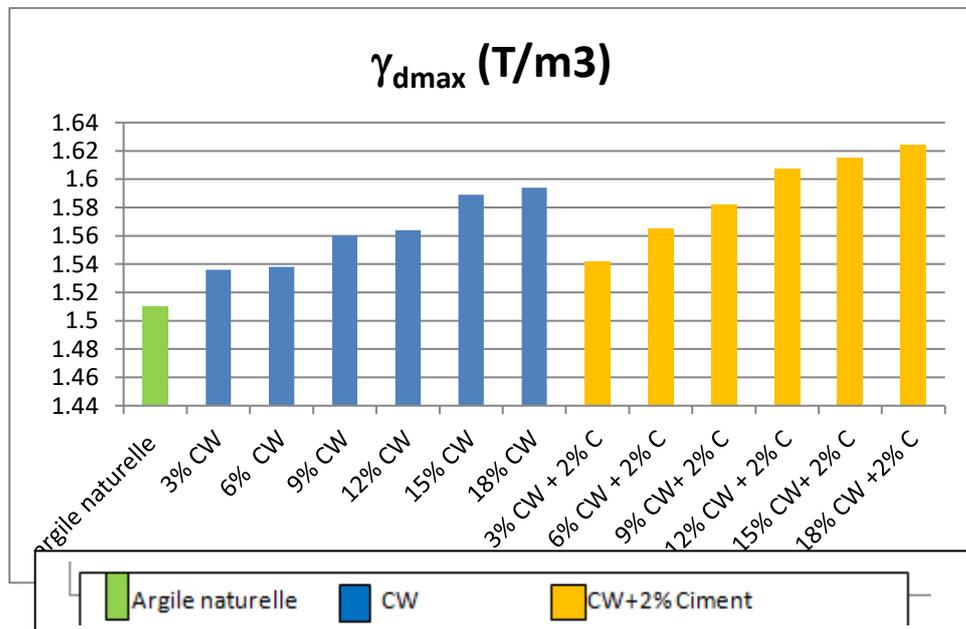


Figure V.7. Variation de  $\gamma_{dmax}$  en fonction du pourcentage d'additifs.

Le compactage demeure une technique assez délicate car elle dépend de plusieurs paramètres comme la nature du sol qui nous donne par exemple une courbe en cloche assez aplatie pour un sable tandis qu'elle présente un maximum très marqué pour une argile plastique.

D'après les courbes précédentes on voit que la valeur de la densité sèche  $\gamma_d$  augmente en fonction de la teneur en eau jusqu'à une valeur optimale ( $\omega_{opt}$ ) au delà de cette valeur on

remarque une diminution de la densité sèche de l'échantillon. L'analyse des figures révèle une augmentation graduelle de la densité sèche maximale ( $\gamma_{dmax}$ ) avec l'augmentation du pourcentage de céramique calcinée (CW), que ce soit en présence ou non de ciment.

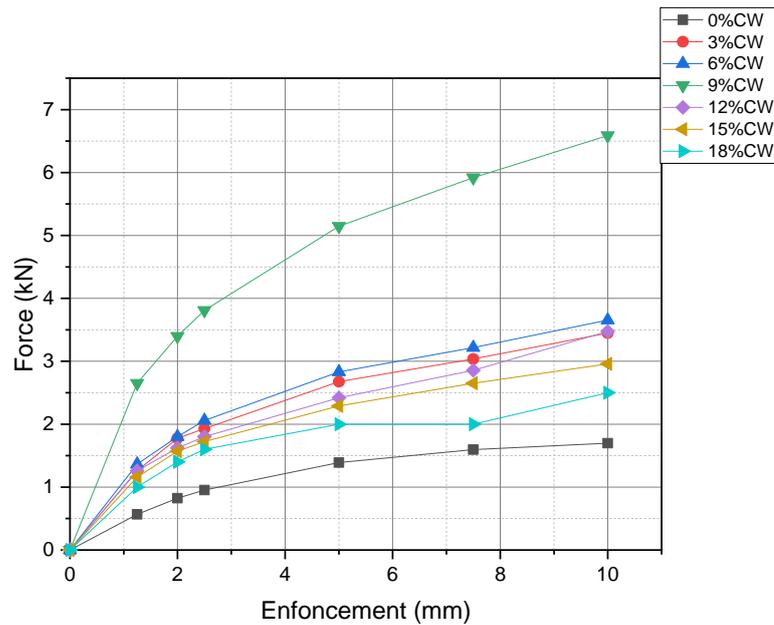
Cette augmentation est généralement plus importante en présence de ciment qu'en son absence. En effet,  $\gamma_{dmax}$  atteint la valeur de 1,549 T/m<sup>3</sup> à 18% de CW, soit une augmentation de 2,5% par rapport à la  $\gamma_{dmax}$  de 1,51 T/m<sup>3</sup> de l'argile naturelle. En présence de 2% de ciment,  $\gamma_{dmax}$  atteint la valeur de 1,624 T/m<sup>3</sup> à 18% de CW, soit une augmentation de 7,5% par rapport à l'argile naturelle.

***Cette augmentation due à :***

- La céramique calcinée est un matériau dense, avec une densité de 2,59 g/cm<sup>3</sup>, supérieure à celle de l'argile (2,17 g/cm<sup>3</sup>).
- L'ajout de céramique calcinée à l'argile augmente la proportion de matériau dense dans le mélange, ce qui entraîne une augmentation de la  $\gamma_{dmax}$ .
- L'effet de la céramique calcinée sur la  $\gamma_{dmax}$  est plus important aux faibles pourcentages, car l'ajout d'une petite quantité de matériau dense a un impact plus important sur la densité moyenne du mélange.  
Le ciment, en présence d'eau, réagit et forme une matrice poreuse et résistante qui lie les particules d'argile et de céramique calcinée.
- L'effet du ciment sur la  $\gamma_{dmax}$  est généralement plus important que celui de la céramique calcinée seule, car il contribue à la formation d'une structure plus dense et plus compacte.

#### **V.6. Influence de céramique calcinée sur les caractéristiques mécaniques de CBR .**

Le test de l'indice portant californien (CBR) est une méthode fiable pour évaluer la résistance du sol de fondation pour les routes. Il permet d'évaluer l'adéquation des matériaux, de déterminer l'épaisseur des chaussées et de classer la fondation. Un indice CBR plus élevé indique une meilleure capacité portante. Des essais de CBR ont été réalisés sur les mélanges de l'argile avec CW sans et avec 2% de ciment. Les résultats des différents essais CBR avec divers pourcentages d'additifs sont présentés dans le graphique ci-après qui présente les résultats des tests CBR sur l'argile naturelle et traitée. On remarque que l'inclusion de CW dans l'argile a permis d'augmenter la valeur CBR, qui passe de l'argile est passée de 7,132% de l'argile naturelle à 26,83% en incorporant 9% de CW, soit une augmentation de plus de 273,67%, et à 32,21% à 2% de ciment avec une augmentation de 351,63% à 9% de CW.



**Figure V.8.** Variations des efforts en fonction des enfoncements pour l'argile traitée avec la CW.

À partir des résultats présentés sur la figure 11, on peut en déduire que la valeur CBR du composite argile-CW à 9% de teneur en céramique est environ 366,93% supérieure à la valeur CBR non traitée. La tendance à la hausse de l'analyse CBR par mélange de CW est attribuée à diverses raisons, telles que :

1. Un  $\gamma_{\max}$  plus élevé des composites,
2. Le poids volumique absolu plus élevée du CW ( $2,59T/m^3$ ) par rapport au sol ( $2,17T/m^3$ ),
3. L'interaction entre les grains de céramique et l'échantillon de sol,
4. La propriété pouzzolanique du CW. L'augmentation significative de la valeur CBR aux activités pouzzolaniques dans les composites argile-céramique en présence d'humidité.

Les résultats de l'analyse CBR indiquent une amélioration de la résistance mécanique des composites argile-CW. Notre étude est en bonne concordance avec celles trouvées par [27, 31].

Selon cette étude, l'ajout de CW (avec et sans 2% de ciment) a un impact positif sur l'argile, améliorant l'indice CBR jusqu'à un seuil optimal de 9%. Ce pourcentage est suggéré comme optimal pour maximiser la résistance du sol.

- Ces deux additifs jouent le rôle de liant en tant que matériaux pouzzolaniques, réagissant avec l'eau et le calcium présents dans le sol pour former des composés cimentaires, tels que le silicate de calcium hydraté.

- Cela augmente la cohésion et la résistance du mélange sol-céramique. De plus, les fines particules de cendre ( $< 0,08 \mu\text{m}$ ) influent sur la porosité et augmentent la densité, ce qui améliore la capacité portante (indice CBR).

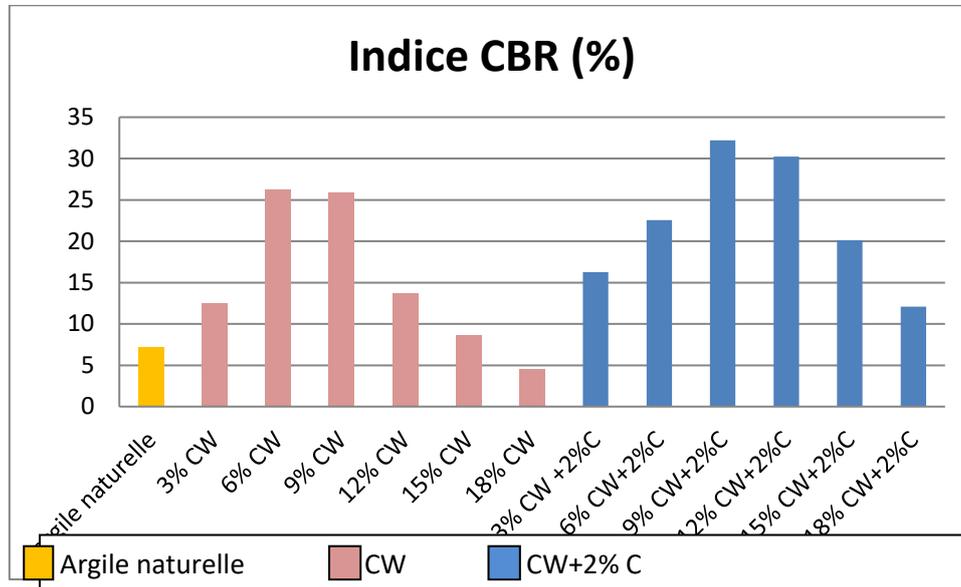


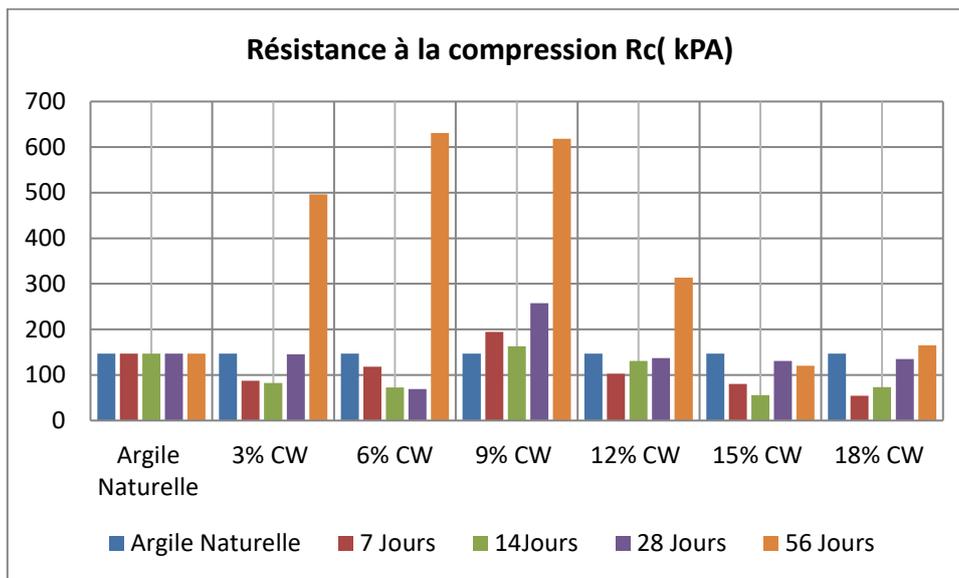
Figure V.9. Variation de CBR en fonction du pourcentage d'additifs.

### V.7. Influence de céramique calcinée sur la résistance à la compression simple non confinée.

La résistance à la compression a été déterminée à l'aide d'une presse hydraulique avec une vitesse de chargement de 1 mm/min. L'essai consiste à mesurer la résistance à la compression des éprouvettes de forme cylindrique (diamètre 15 cm et hauteur 7.5 cm) et avec les caractéristiques optimales qui ont été obtenues par le compactage Proctor conservées en 7, 14, 28 et 56 jours et traitées avec des pourcentages de la céramique calcinée, 3%, 6%, 9%, 12%, 15% et 18%. Les éprouvettes traitées sont soumises à une compression entre deux plateaux jusqu'à la rupture.

Le graphique montre l'effet de l'ajout de céramique calcinée sur la résistance à la compression du sol argileux. Dans les pourcentages de 3% et 6%, on observe effectivement une chute de la résistance à la compression. **Cela peut s'expliquer par:**

- Liaison insuffisante : L'effet du traitement de la céramique calcinée à ces pourcentages (3% et 6%) est insuffisant et ne permet pas une liaison optimale avec le sol argileux.
- En effet, la céramique dans ce contexte peut également jouer un rôle de remplissage, sans pour autant apporter de résistance mécanique significative.



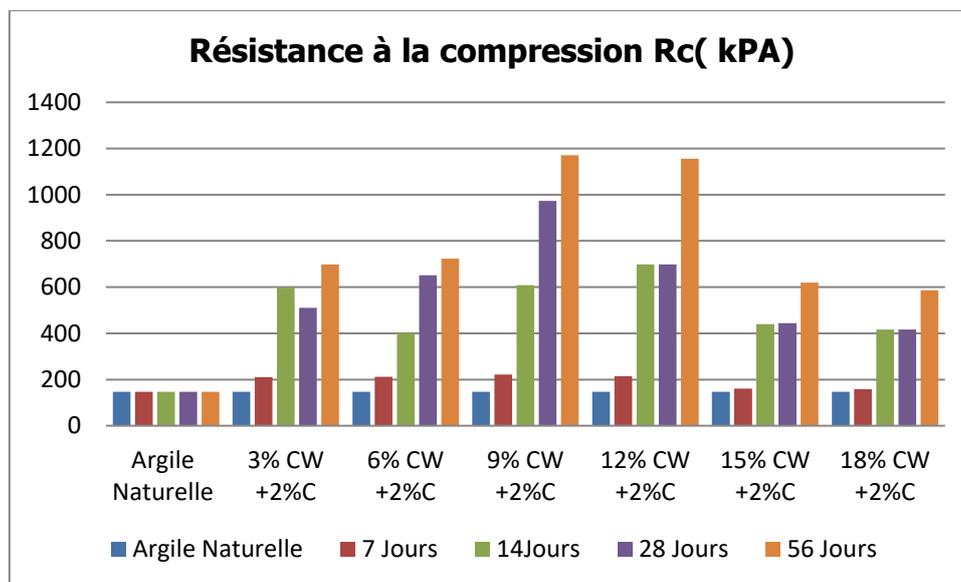
**Figure V.10.** Variation de la résistance de compression de l'argile traitée en fonction des pourcentages de céramique calcinée .

Malgré cette baisse observée pour 3% et 6%, il est important de souligner que la résistance à la compression reste significativement supérieure à celle de l'argile non traitée (environ 146,59 kPa) pour tous les temps de cure et pour les différents pourcentages de céramique calcinée ajoutée. La résistance maximale est atteinte pour un pourcentage de 9% après 56 jours de cure, avec une valeur de 618,18 kPa.

Au-delà de 12% de céramique calcinée, la résistance à la compression commence à diminuer. Cela peut s'expliquer par la formation de microfissures dans le matériau, dues à la différence de coefficient de dilatation thermique entre la céramique calcinée et le sol argileux. En résumé, l'ajout de céramique calcinée peut améliorer la résistance à la compression du sol argileux, mais il est important de ne pas dépasser un certain pourcentage (environ 9%) pour éviter une chute de la résistance. C'est résultats sont en très bonne concordance avec celles trouvés par Okagbue [29] et Das [17] .

Pour activé plus la céramique calcinée on à ajouté un pourcentage minimal de 2% de ciment . Le graphique montre l'effet de l'ajout de 2% de ciment sur la résistance à la compression du sol argileux en fonction du pourcentage de céramique calcinée ajoutée et du temps de cure.

Le graphique montre que l'ajout de 2% de ciment a un effet positif sur la résistance à la compression du sol argileux pour tous les pourcentages de céramique calcinée et pour tous les temps de cure. L'augmentation de la résistance à la compression est plus importante pour les pourcentages de céramique calcinée plus élevés et pour les temps de cure plus longs. La résistance à la max dans ce cas atteint 1170,45Kpa avec une augmentation de 698,25% à, 9% de CW par rapport à l'argile non traitée.



**Figure V.11.** Variation de la résistance de compression de l'argile traitée en fonction des pourcentages de céramique calcinée et 2% de ciment

L'ajout de ciment a plusieurs effets positifs sur la résistance à la compression du sol argileux l'augmentation de la résistance à la compression **dans ce cas et due à :**

- **Hydratation du ciment:** Le ciment réagit avec l'eau pour former une matrice poreuse et résistante qui lie les particules de sol argileux et de céramique calcinée.
- **Produits d'hydratation:** Les produits d'hydratation du ciment, tels que le gel de silicate de calcium, ont des propriétés de liaison et de renforcement qui contribuent à la résistance du matériau.
- **Remplissage des pores:** Le ciment peut remplir les pores du sol argileux et de la céramique calcinée, ce qui réduit la porosité du matériau et augmente sa résistance.

Donc l'ajout de 2% de ciment peut être un moyen efficace d'améliorer la résistance à la compression du sol argileux, en particulier pour les applications où une résistance élevée est requise. Il est important de choisir le bon pourcentage de céramique calcinée et le temps de cure appropriés en fonction des besoins spécifiques de l'application.

#### V.8. Impact la céramique calcinée sur la variation du gonflement et de la consolidation du sol .

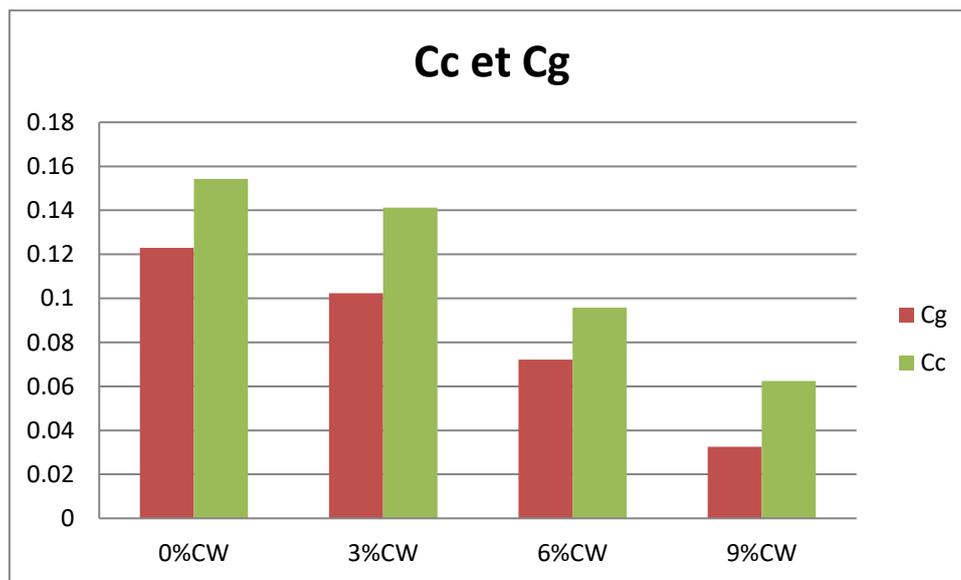
Les résultats de l'essai de gonflement pour l'argile traitée à différents % de CW et 2% de ciment sont représentés sur le tableau suivant :

**Tableau V.4.** Variation de l'indice de gonflement et de compressibilité en fonction de différent % Céramique .

% CW	0%	3%	6%	9%
<b>Cg</b>	<b>0,1229</b>	0,1024	0,0721	0,0325
<b>Cc</b>	0,1543	0,1412	0,0958	0,0254

**Tableau V.5.** Variation de l'indice de gonflement et de compressibilité en fonction de différent % CB et 2% de ciment .

% de CW+2%C	0%	3%	6%	9%
<b>Cg</b>	<b>0.1229</b>	0,0425	0,0361	0,0251
<b>Cc</b>	0.1543	0,102	0,0945	0,0425

**Figure V.12.** Variation de l'indice de gonflement et de compressibilité en fonction de différent % CW.

Le graphique présenté illustre l'évolution du coefficient de compressibilité (Cc) et du coefficient de gonflement (Cg) de l'argile en fonction du pourcentage de céramique calcinée ajoutée. Observations:

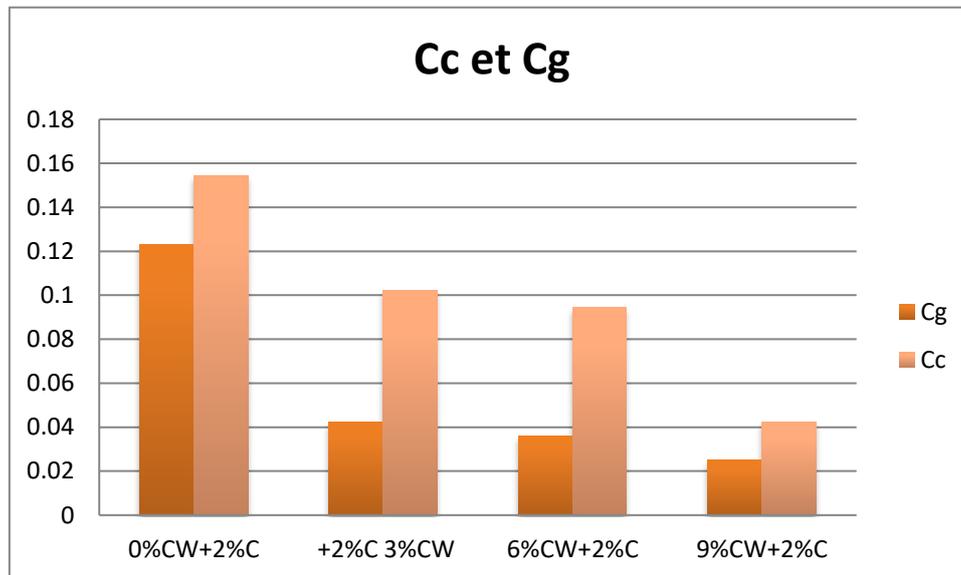
- **Coefficient de Compressibilité (Cc):**
  - Le Cc diminue graduellement avec l'augmentation du pourcentage de céramique calcinée.
  - La diminution la plus importante est observée à 9% de CW
- **Coefficient de Gonflement (Cg):**

- Le  $C_g$  présente une tendance similaire au  $C_c$ , avec une diminution graduelle en fonction du pourcentage de céramique calcinée.
- La diminution la plus notable est observée à 9%

#### La diminution du $C_c$ et du $C_g$ est due à :

- L'ajout de céramique calcinée renforce la structure de l'argile, réduisant sa porosité et augmentant sa densité.
- Ces modifications réduisent la capacité de l'argile à se comprimer ( $C_c$ ) et à se gonfler ( $C_g$ ) sous l'influence de variations de contrainte et d'humidité.

En présence de ciment, la valeur du coefficient de compressibilité ( $C_c$ ) diminue de 0,1543 à 0% de céramique calcinée avec cure à l'air (CW) à 0,0425 à 9% de céramique calcinée et 2% de ciment. De même, le coefficient de gonflement ( $C_g$ ) diminue de 0,1226 à 0% de céramique calcinée avec CW à 0,0251 à 9% de céramique calcinée et 2% de ciment.



**Figure V.13.** Variation de l'indice de gonflement et de compressibilité en fonction de différent % CW et 2% de ciment.

- En comparaison avec le cas sans ciment, la présence de 2% de ciment entraîne une diminution plus importante des coefficients  $C_c$  et  $C_g$  pour tous les pourcentages de céramique calcinée.
- Cet effet est plus marqué pour le  $C_c$  que pour le  $C_g$ .
- La présence de ciment renforce davantage la structure de l'argile, réduisant sa porosité et augmentant sa densité, ce qui se traduit par une diminution plus importante de sa capacité et réduisent la capacité de l'argile à se comprimer ( $C_c$ ) et à se gonfler ( $C_g$ ) sous l'influence de variations de contrainte et d'humidité à se comprimer et à se gonfler. Le ciment joue un rôle supplémentaire de renforcement de la matrice argile-céramique calcinée.

- La présence de ciment permet une meilleure liaison entre les particules d'argile et de céramique calcinée, ce qui renforce davantage la structure du matériau.

## V.7. Analyse statistique

### V.7.1. Analyse de variance ANOVA

**ANOVA** (analysis of variance) est un ensemble de modèles statistiques permet d'étudier le comportement d'une variable quantitative à expliquer en fonction d'une ou de plusieurs variables qualitatives. En utilisant les moyennes, il peut être intéressant de spécifier nommément sur quel groupe porte ces différences. Elle consiste essentiellement à partitionner la variation totale d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et les erreurs générées. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par **P-value** et **F-value** d'ANOVA [13]. Dans le tableau d'ANOVA, P-value est la probabilité (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude (ou résultats plus extrêmes) ont pu se produire par hasard.

- Si  $P > 0,05$ , le paramètre est insignifiant (Non significatif);
- Si  $P < 0,05$ , le paramètre est significatif.

Pour notre étude expérimentale, nous souhaitons estimer l'influence des additifs Céramique calcinée (CW) et le ciment sur la résistance à la compression ( $R_c$ ) et le poids volumique max  $\gamma_{dmax}$ . Le tableau VI.7 présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA).

Selon le tableau, le facteur ayant l'influence la plus significative sur l'indice  $R_c$  le pourcentage de Ciment © avec une contribution de 45,57 %. Ensuite, le pourcentage de CW contribue à hauteur de 22,42 %, et l'intersection ( Argile\*CW) avec une contribution de 29,88%. Les autres paramètres n'ont pas d'influence significative  $R_c$ . Pour  $\gamma_{dmax}$ , l'influence des paramètres est moindre. On remarque que CW a la plus grande influence avec un taux de contribution de 16,31 %, suivie de l'argile avec 21,27 %.

**Tableau V.6.** Analyse de la variance pour l'indice  $R_c$  et  $\gamma_{dmax}$ .

La résistance à la compression $R_c$ (kPA)							
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	% de contribution	Remarque
Model	1,266E+06	5	2,532E+05	6,58	< 0.0001	82,42	significatif
A-argile	1,651E+05	1	1,651E+05	4,29	< 0.0001	10,74	significatif
B-CW	3,417E+05	1	3,417E+05	8,88	0,0205	22,24	Non significatif
C-C	6,853E+05	1	6,853E+05	17,80	< 0.0001	45,57	significatif

AB	4,493E+05	1	4,493E+05	11,67	< 0.0001	29,88	significant
AC	5,774E+05	1	5,774E+05	15,00	< 0.0001	37,59	significant
Residual	2,695E+05	7	38497,55			17,54	
Cor Total	1,536E+06	12				100	
<b>La densité sèche max <math>\gamma_{dmax}</math> (T/m<sup>3</sup>)</b>							
<b>Model</b>	0,0138	5	0,0028	69,27	< 0.0001	97,87	significant
Model	0,0001	1	0,0001	1,30	0,0012	7,09	Non Significant
A-argile	0,035	1	0,0000	0,4136	< 0.0001	21,27	Significant
B-CW	0,0023	1	0,0003	7,26	< 0.0001	16,31	Significant
C-C	0,0011	1	0,0001	1,91	0,0401	2,90	Non Significant
AB	0,0002	1	0,0002	3,85	< 0.0001	0,136	Significant
Residual	0,0003	7	0,0000			2,56	
Cor Total	0,0141	12				100	

### V.7.2. Analyse de régression.

L'équation de régression fournit des informations utiles concernant l'influence de chaque variable explicative sur les valeurs de prévision, notamment le coefficient de régression pour chaque variable explicative. Les valeurs de pente peuvent être comparées pour déterminer l'influence relative de chaque variable explicative sur la variable dépendante ; plus la valeur de pente est éloignée de zéro (que la valeur soit positive ou négative), plus l'influence est grande.

L'ensemble des caractéristiques essentielles d'ajustement du modèle postulé est groupé dans le tableau V.1. La relation fonctionnelle entre les variables de sortie ( Rc et  $\gamma_{dmax}$ ) et les variables d'entrées (le % de l'argile, CW et C ) a été exprimé avec un coefficient de détermination ( **$R^2= 82,45\%$  pour CBR et  $R^2= 98,02\%$  pour  $\gamma_{dmax}$** ) qui est le rapport entre la variation due au modèle et la variation totale, montre que le modèle à un bon ajustement pour les deux réponses. Le tableau renseigne également la valeur de l'écart type résiduel, la valeur de la moyenne des réponses et le nombre des essais effectués.

Les coefficients de détermination prédits ( $R^2$ ) et ajustés ( $R^2$  ajusté) indiquent une bonne corrélation pour les deux paramètres étudiés : Rc et  $\gamma_{dmax}$

- **Pour RC :**
  - $R^2_{\text{prédit}} = 0,8688$
  - $R^2_{\text{ajusté}} = 0,6992$
- **Pour  $\gamma_{\text{dmax}}$ :**
  - $R^2_{\text{prédit}} = 0,9291$
  - $R^2_{\text{ajusté}} = 0,9574$

Dans les deux cas, la différence entre  $R^2_{\text{prédit}}$  et  $R^2_{\text{ajusté}}$  est inférieure à 0,2, ce qui traduit un accord raisonnable entre les valeurs prédites et observées.

### V.7.3. Estimation des coefficients.

Afin de déterminer les facteurs influents les deux réponses des modèles de régression multiple postulés ci-dessus, nous avons évalué les valeurs des coefficients, leur écart type, f-valeur t et p-valeur par le biais de la méthode de screening. La valeur 0,05 est le seuil de vérification indiquant en probabilité que le coefficient n'est pas nul et par conséquent il est significatif

Le calcul des coefficients des facteurs et de leur interaction ainsi que l'évaluation de leur aspect significatif nous a permis de prédire les modèles polynomiaux qui sont présentés par les équations correspondantes.

$$Rc = -1950,15 + 2144,05 A - 2311,80B + 2376,56C + 2471,00AB - 1806,96AC$$

$$\gamma_{\text{dmax}} = +28,77 + 5,92A + 3,96B + 7,541C - 2,81AB - 0,6075AC$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de la variable de sortie ( $Rc$ ) et ( $\gamma_{\text{dmax}}$ ) est présentée dans les Figures V.11 et V.12. Les résultats montrent une excellente concordance entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs expérimentales mesurées, confirmant ainsi la validité des équations pour prédire les sorties ( $Rc$  et  $\gamma_{\text{dmax}}$ ) en fonction des facteurs d'entrée (% d'argile, % de CW et % de C). Ces observations indiquent que le modèle de régression quadratique est capable de représenter avec précision la relation fonctionnelle entre les variables d'entrée et les variables de sortie. Par conséquent, ces résultats sont très encourageants, car ils suggèrent que le modèle peut être utilisé pour prédire avec précision l'indice CBR et  $I_p$ .

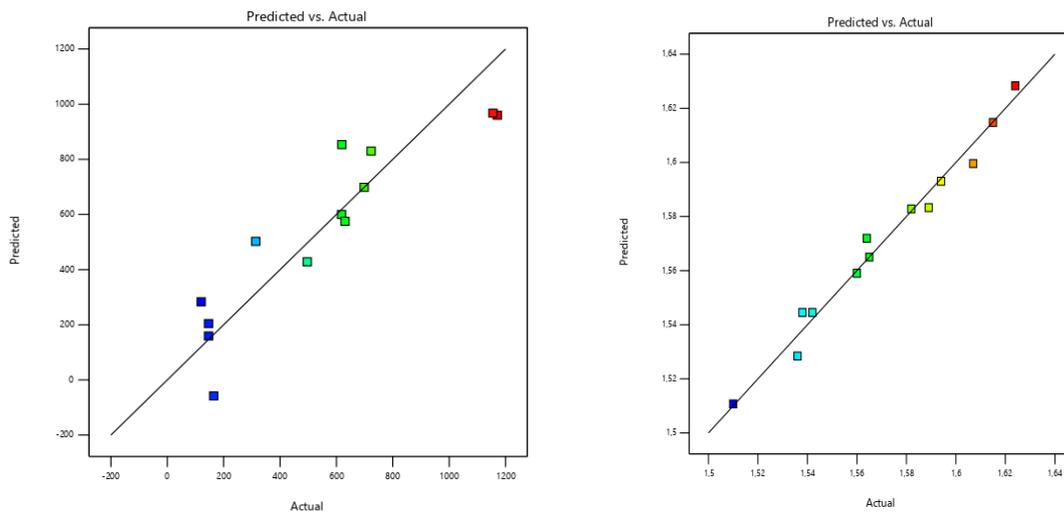


Figure V.14. Valeurs expérimentales et valeurs prédites pour  $R_c$  et  $\gamma_{dmax}$ .

#### V.7.4. Optimisation des paramètres d'influence ( % d'argile, % CW et % C%).

Une optimisation est effectuée pour déterminer les valeurs des entrées du processus à utiliser pour obtenir la sortie du processus souhaitée. Les objectifs d'optimisation habituels peuvent être de maximiser le rendement d'un processus, de minimiser le temps de traitement nécessaire à la fabrication d'un produit ou d'atteindre une spécification du produit cible.

Les contraintes utilisées pendant le processus d'optimisation sont illustrés dans le tableau V.2. Le problème revient à cibler la fonction de désirabilité (D) qui est la fonction objective sous les contraintes des variables.

Tableau V.7. Contraintes appliquées sur les paramètres à optimiser.

Paramètres	Objectif	Limite inférieure	Limite Supérieure	Poids inférieure	Poids Supérieure	Importance
A:argile	is in range	0	81	1	1	3
B:CW	maximize	0	18	1	1	3
C:C	minimize	0	2	1	1	3
$R_c$	maximize	120,45	1170,9	1	1	3
$\gamma_{dmax}$	maximize	1,51	1,624	1	1	3

Les valeurs optimales des paramètres de traitement du sol, conformément aux contraintes fixées, sont illustrées dans le tableau ci-après, qui contient les cinq meilleures solutions.

Tableau V.8. Valeurs des paramètres à optimiser.

Number	Argile	SB	CB	CBR	Ip	Desirability	
1	81,000	18,000	1,341	547,148	1,617	0,895	Selected
2	81,000	18,000	1,329	540,748	1,616	0,895	
3	81,000	18,000	1,371	564,658	1,617	0,895	
4	81,000	18,000	1,309	528,904	1,616	0,594	
5	81,000	17,923	1,357	555,189	1,616	0,593	

### V.10. Conclusion.

Plusieurs essais ont été menés en laboratoire pour étudier l'effet la céramique calcinée avec et sans 2% de ciment, sur les propriétés physiques et mécaniques d'une argile gonflante. Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

#### 1. Limites d'Atterberg :

- Diminution des limites de liquidité et de plasticité.
- Diminution significative de l'indice de plasticité.
- La limite de liquidité et la limite de plasticité augmentent avec la teneur croissante en CW, tandis que l'indice de plasticité diminue pour tous les pourcentages étudiés.

#### 2. Densité et teneur en eau optimale :

- CW font augmenter la densité sèche maximale à cause à leur densité max en comparant avec celle de l'argile.

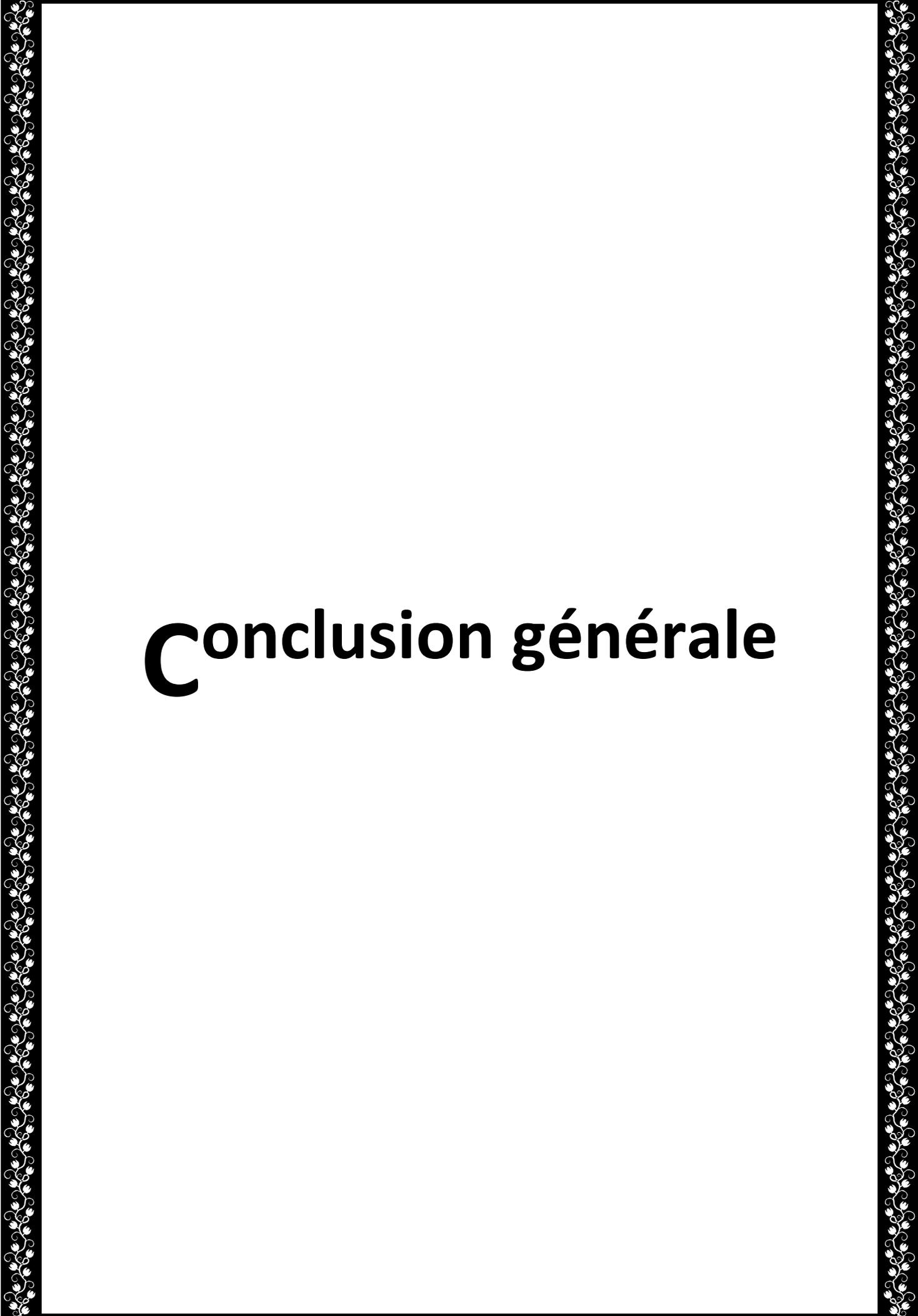
#### 3. Résistance à la compression et cisaillement :

- L'augmentation de la durée de cure a un effet considérable sur la résistance à la compression de l'argile traitée.

#### 4. Gonflement et compressibilité :

- Le traitement par CW est le plus efficace sur l'indice de gonflement et de compressibilité, qui diminuent de manière significative.

*Les meilleurs résultats ont été obtenus pour une valeur optimale de 9% de CW.*



# Conclusion générale

### Conclusion générale

Nous avons présenté dans ce mémoire de fin de cycle Master II en géotechnique un travail expérimental et d'optimisation qui a duré près de cinq mois au sein des laboratoires pédagogiques et de recherche de notre université. Ce travail constitue une contribution aux techniques de traitement des argiles gonflantes provenant de la région de Elkharba, wilaya de Mila, afin de mieux comprendre leur comportement et de proposer des solutions techniques pour lutter contre ce phénomène. Cette argile a été traitée avec le déchet de la céramique calcinée, dans le but de les valoriser en tant qu'agents de renforcement et pour leur aspect environnemental, en vue de leur utilisation dans les remblais routiers.

#### **LES RÉSULTATS OBTENUS ONT MONTRÉ QUE :**

L'ajout de la céramique calcinée CW ou d'un mélange de CW et de ciment à l'argile naturelle entraîne une augmentation générale de la densité sèche maximale ( $\gamma_{dmax}$ ), mesurée par le test Proctor. Ces observations suggèrent que les additifs étudiés modifient la structure et la compaction de l'argile. Et ca à cause que la densité spécifique de la céramique calcinée est grande (2,59 que celle l'argile naturelle testés 2,17) .

La céramique calcinée entraîne l'agrégation des particules par le procédé complexe d'échange cationique aboutissant à une modification de la granulométrie du sol et provoquant par conséquent les particules du sol à occuper de plus grands espaces (structure plus ouverte);

Les résistances à la compression simple des éprouvettes de l'argile traitée soumises à des essais de compression non confinée, augmentent en fonction de temps de cure et la proportion optimale entre le CW sans et avec 2% de ciment d'un état à l'autre selon le temps de cure et le dosage appliqué.

Ainsi il apporte des modifications des caractéristiques mécaniques que l'optimum de compactage et de la portance du CBR.

L'utilisation de déchets pour la stabilisation des sols à problème offre une solution prometteuse pour la valorisation des déchets, la protection de l'environnement et l'amélioration des performances des sols. Cependant, il est important de relever les défis techniques et environnementaux liés à cette pratique afin de la mettre en œuvre de manière durable et responsable. ces trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux.

- Avantages techniques : performante, durable, sûre et codifiée ;
- Avantages économiques : le plus souvent moins chère que les techniques traditionnelles ;
- Avantages environnementaux : limiter les quantités de déchet de bois jouté chaque année, et protégé les espace de la pollution qui influer sur la santé de habitants.

Afin de mieux cerner les paramètres ayant une influence prépondérante dans notre étude, une approche statistique d'optimisation a été implémentée en complément de l'approche expérimentale. Cette approche statistique a permis d'identifier les facteurs les plus significatifs influençant le comportement physico-mécanique (la résistance à la compression à 56 jours

Rc et le poids volumique  $\gamma_{dmax}$ ) d'une argile stabilisée avec CW avec ou sans ajout de 2% de ciment.

**L'**analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour déterminer les facteurs ayant l'impact le plus important sur les réponses mesurées. Les résultats de l'ANOVA ont révélé que le pourcentage d'additifs est le facteur le plus déterminant affectant les propriétés étudiées.

**P**ar la suite, la méthode des surfaces de réponse a été employée pour établir la relation entre les variables d'entrée (les pourcentages de l'argile, de CW et de ciment) et les variables de sortie (la résistance à la compression à 56 jours Rc et le poids volumique  $\gamma_{dmax}$ ). Les modèles de régression quadratique obtenus ont montré une forte corrélation entre les variables, avec des coefficients de détermination  $R^2 = 82,45\%$  pour Rc et  $R^2 = 98,02\%$  pour  $\gamma_{dmax}$ . Ceci indique que ces modèles permettent de prédire avec une grande précision les valeurs des réponses (Rc et  $\gamma_{dmax}$ ) en fonction des valeurs des facteurs étudiés.

	<b>Chapitre I</b>	<b>Page</b>
<b>Figure I.1</b>	Exemples des différents types de sol	1
<b>Figure I.2</b>	Représentation d'un milieu poreux non saturé.	2
<b>Figure I.3</b>	La distribution moyenne (%) des différentes phases du sol.	2
<b>Figure I.4</b>	Classification des sols .	5
<b>Figure I.5</b>	Classification des sols fins : Diagramme de plasticité (selon L.C.P.C).	7
<b>Figure I.6</b>	Classification des sols de l'AASHTO	9
<b>Figure I.7</b>	Structure de la kaolinite .	9
<b>Figure I.8</b>	Structure de la montmorillonite	10
<b>Figure I.9</b>	Structure d'illite	10
<b>Figure I.10</b>	Phénomène de gonflement.	12
<b>Figure I.11</b>	Phénomène de tassement.	12
<b>Figure I.12</b>	Phénomène de glissement.	12
<b>Chapitre II</b>		
<b>Figure II.1</b>	Les méthodes d'amélioration et de renforcement des sols [8].	15
<b>Figure II.2</b>	Compactage de surface	16
<b>Figure II.3</b>	Compactage dynamique.	17
<b>Figure II.4</b>	Vibration profondes.	17
<b>Figure II.5</b>	Colonnes ballastés (Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques).	18
<b>Figure II.6</b>	Principe du pré chargement pour le contrôle des tassements.	19
<b>Figure II.7</b>	Drains verticaux.	19
<b>Figure II.8</b>	Installation de drains verticaux préfabriqués (DVP).	20
<b>Figure II.9</b>	Traitement de sol par Déshydratation.	21
<b>Figure II.10</b>	Congélation de sol	21
<b>Figure II.11</b>	Classification des liants.	22
<b>Figure II.12</b>	Processus de fabrication de ciment.	24
<b>Figure II.13</b>	Domaine d'utilisation de la céramique.	27
<b>Figure II.14</b>	La terre cuite.	28
<b>Figure II.15</b>	Céramiques traditionnelles (terre cuite (a) ; faïence (b) ; porcelaine (c)).	28
<b>Chapitre III</b>		

<b>Figure III.1</b>	Les dommages engendrés par le séisme du 7 août 2020.	33
<b>Figure III.2</b>	Carte de découpage administratif (Est Algérien) (Atmania, 2010).	33
<b>Figure III.3</b>	Matériel de calcination et broyage.	34
<b>Figure III.4</b>	Algorithme des essais d'identification	35
<b>Figure III.5</b>	Ordres de grandeur	36
<b>Figure III.6</b>	Equipements utilisés pour l'essai pour l'essai au bleu de méthylène.	36
<b>Figure III.7</b>	Résultats de Bleu (VBS).	36
<b>Figure III.8</b>	Essai de la masse volumique absolue.	38
<b>Figure III.9</b>	Appareil d'analyse granulométrique. Mastersizer 2000 Malvern.	39
<b>Figure III.10</b>	Courbe granulométrique de céramique .	40
<b>Figure III.11</b>	Equipements utilisés pour l'essai de teneur en eau.	40
<b>Figure III.12</b>	L'analyse granulométrique par tamisage. Mettre une autre photos	41
<b>Figure III.13</b>	L'analyse granulométrique par sédimentométrie.	42
<b>Figure III.14</b>	Courbe granulométrique par tamisage et sédimentation de l'argile.	43
<b>Figure III.15</b>	Représentation des limites d'Atterberg	44
<b>Figure III.16</b>	Appareillage nécessaire pour déterminer $\square L$ .	44
<b>Figure III.17</b>	Détermination de la limite de liquidité	45
<b>Figure III.18</b>	Détermination de la limite de plasticité.	46
<b>Figure III.19</b>	Matériels de l'Essai Proctor.	48
<b>Figure III.20</b>	Les principales étapes de l'essai Proctor.	49
<b>Figure III.21</b>	Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour l'argile naturelle.	50
<b>Figure III.22</b>	L'essai CBR (California Bearing Ratio).	51
<b>Figure III.23</b>	Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité.	53
<b>Figure III.24</b>	Appareil de compression au niveau de laboratoire de recherche (université 8 Mai 1945 Guelma)	54
<b>Figure III.25</b>	Essai de cisaillement rectiligne à la boîte avec les instruments de mesure.	55
<b>Figure III.26</b>	Préparation des éprouvettes pour l'essai de cisaillement rectiligne à la boîte.	56
<b>Figure III.27</b>	Contrainte de cisaillement en fonction des déplacements (Argile étudiée).	56
<b>Figure III.28</b>	Courbe intrinsèque de l'argile naturelle.	57

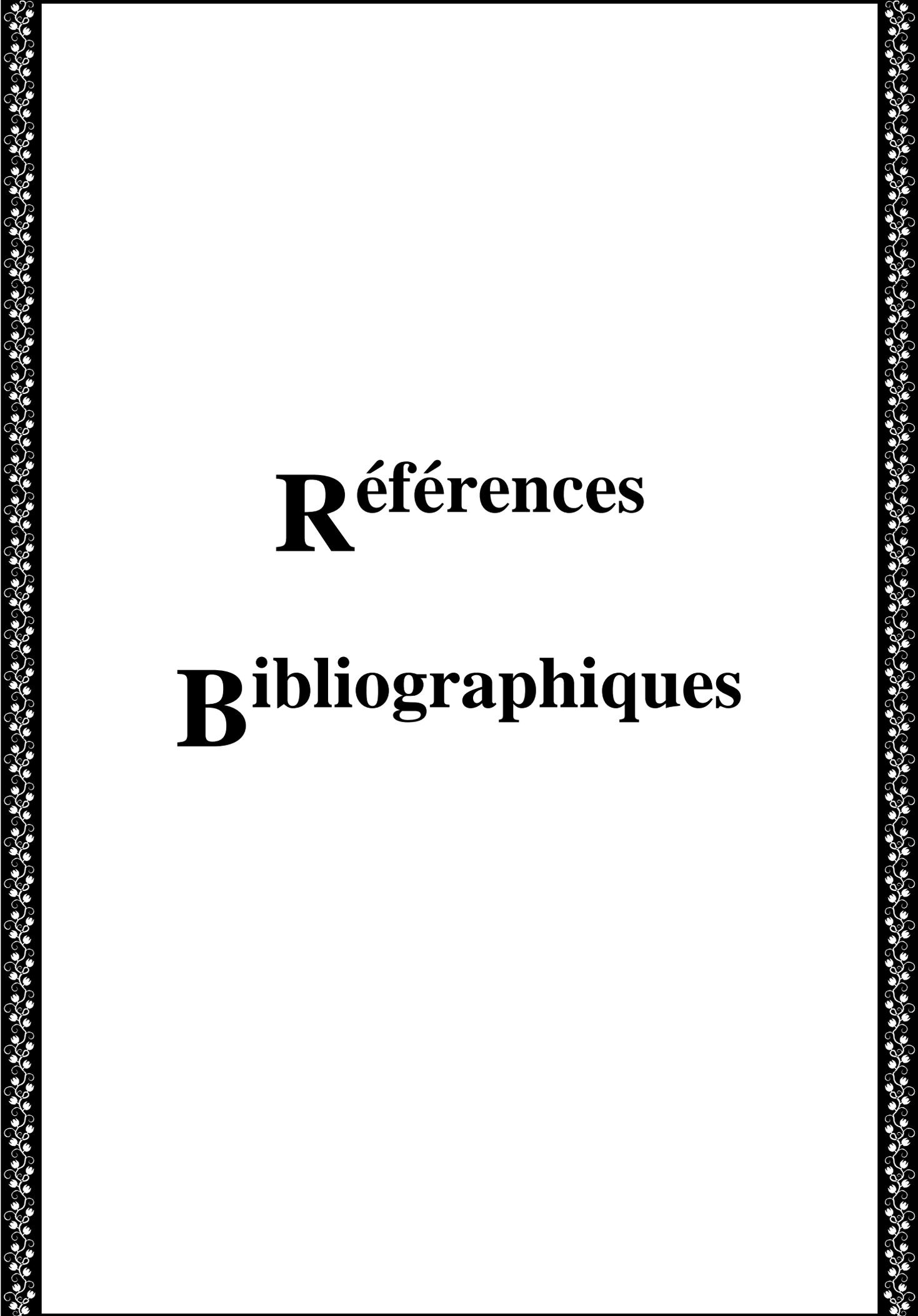
<b>Figure III.29</b>	Appareillage de l'essai Oedométrique.	58
<b>Figure III.30</b>	Essais oedométrique de l'argile naturelle .	59
<b>Chapitre IV</b>		
<b>Figure IV.1</b>	Exemple graphique de prédiction de la réponse	63
<b>Figure IV.2</b>	Exemple graphique de l'optimisation de la réponse.	64
<b>Figure IV.3</b>	Domaine de variation d'un facteur.	64
<b>Figure IV.4</b>	Représentation de l'espace expérimental [6].	65
<b>Figure IV.5</b>	Domaine d'étude défini par l'union des domaines des différents facteurs.	66
<b>Figure IV.6</b>	Représentation géométrique d'un plan à deux facteurs.	67
<b>Chapitre V</b>		
<b>Figure V.1</b>	Spectres DRX de déchet céramique calcinée	74
<b>Figure V.2</b>	Préparation des mélanges.	75
<b>Figure V.3</b>	Variation de la VBS en fonction du pourcentage de CB	76
<b>Figure V.4</b>	Variation de la limite de liquidité en fonction du pourcentage d'additifs.	77
<b>Figure V.5</b>	Variation de la limite de plasticité en fonction du pourcentage d'additifs.	78
<b>Figure V.6</b>	Variation de l'indice de plasticité en fonction du pourcentage d'additifs.	79
<b>Figure V.7</b>	Variation de $\square_{dmax}$ en fonction du pourcentage d'additifs.	80
<b>Figure V.8</b>	Variations des efforts en fonction des enfoncements pour l'argile traitée avec la CW.	82
<b>Figure V.9</b>	Variation de CBR en fonction du pourcentage d'additifs.	83
<b>Figure V.10</b>	Variation de la résistance de compression de l'argile traitée en fonction des pourcentages de céramique calcinée .	84
<b>Figure V.11</b>	Variation de la résistance de compression de l'argile traitée en fonction des pourcentages de céramique calcinée et 2% de ciment	85
<b>Figure V.12</b>	Variation de l'indice de gonflement et de compressibilité en fonction de différent % CW.	86
<b>Figure V.13</b>	Variation de l'indice de gonflement et de compressibilité en fonction de différent % CW et 2% de ciment.	87
<b>Figure V.14</b>	Valeurs expérimentales et valeurs prédites pour Rc et $\square_{dmax}$ .	91

	<b>Chapitre I</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau I.1</b>	Classification des sols grenus (selon L.C.P.C).	6
<b>Tableau I.2</b>	Tableau simplifié de la classification des sols GTR.	8
<b>Chapitre II</b>		
<b>Tableau II.1</b>	Propriétés et utilisations des céramiques traditionnelles. [18,19].	29
<b>Tableau II.2</b>	Exportations mondiales de céramique sanitaires (en tonnes) 2010-2021 selon CWR.	30
<b>Chapitre III</b>		
<b>Tableau III.1</b>	Résultats de l'essai au bleu de méthylène et surface spécifique totale.	37
<b>Tableau III.2</b>	Type de sol en fonction de la valeur de bleu de méthylène.	37
<b>Tableau III.4</b>	Masse volumique absolue des déchets.	39
<b>Tableau III.5</b>	La Teneur en eau initial	41
<b>Tableau III.6</b>	Résultat de l'analyse granulométrie par tamisage de l'argile.	42
<b>Tableau III.7</b>	Résultat de l'analyse granulométrie par sédimentation de l'argile.	42
<b>Tableau III.8</b>	Résultats de la limite de liquidité.	44
<b>Tableau III.9</b>	Résultats de la détermination de la limite de plasticité.	46
<b>Tableau III.10</b>	Type de sol en fonction de IP	46
<b>Tableau III.11</b>	Type de sol en fonction de IC.	47
<b>Tableau III.12</b>	Type de sol en fonction de IL.	47
<b>Tableau III.13</b>	Classifications de l'argile d'Elkarba Mila	47

## Listes des Tableaux

---

<b>Tableau III.14</b>	Appareillage Proctor normal.	49
<b>Tableau III.15</b>	Les résultats des paramètres de l'essai Proctor normal pour sol naturel.	50
<b>Tableau III.16</b>	Paramètres de la courbe Proctor.	50
<b>Tableau III.17</b>	Classement de sol en fonction de l'indice CBR.	51
<b>Tableau III.18</b>	Valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité.	52
<b>Tableau III.19</b>	Classification des résultats suivant l'indice de gonflement C <sub>g</sub> .	58
<b>Tableau III.20</b>	Relation entre le potentiel de gonflement et l'indice de plasticité (Seed et al., 1962).	58
<b>Chapitre IV</b>		
<b>Tableau IV.1</b>	Représentation matricielle d'un plan à deux facteurs.	67
<b>Chapitre V</b>		
<b>Tableau V.1</b>	Composition chimique de déchet de céramique calcinée	73
<b>Tableau V.2</b>	Proportions entre les différents composants.	75
<b>Tableau V.3</b>	Résultats de l'essai au bleu de méthylène	75
<b>Tableau V.4</b>	Variation de l'indice de gonflement et de compressibilité en fonction de différent % Céramique .	86
<b>Tableau V.5</b>	Variation de l'indice de gonflement et de compressibilité en fonction de différent % CB et 2% de ciment	86
<b>Tableau V.6</b>	Analyse de la variance pour l'indice R <sub>c</sub> et $\sigma_{dmax}$ .	88
<b>Tableau V.7</b>	Contraintes appliquées sur les paramètres à optimiser.	91
<b>Tableau V.8</b>	Valeurs des paramètres à optimiser.	92



**R**éférences

**B**ibliographiques

## **Références Bibliographiques**

- [1] **Tacnet, J.M., Philippe, G. (2000).** Ouvrages de protection contre les risques naturels et ouvrages en sites instables : Utilisation de matériaux grossiers : Renforcement par géosynthétiques Ouvrages de référence. Cemagref, 92p. 25-26
- [2] **Schlosser, F.** Ouvrages de soutènement, poussée et butée, Techniques de l'ingénieur, Construction, C242.17p.
- [3] **Guler, E., M. Hamderi et M. Demirkan (2007).** Numerical analysis of reinforced soil retaining wall structures with cohesive and granular backfills. Geosynthetics International, 14, No. 6, p330 -345.
- [4] **Ferber V.,** Emploi des géosynthétiques. LCPC Nantes -Reconnaissance et mécanique des sols. Géotechnique Routière. P1-36.
- [5] **Bathurst, R.J. and Hatami, K. 2001.** Review of numerical modeling of geosynthetic reinforced soil walls. Invited theme paper, Computer Methods and Advances in Geomechanics: 10th International Conference of the International Association for .Computer Methods and Advances in Geomechanics, 7-12 January 2001, Tucson, Arizona, USA, Vol. 2, pp. 1223-1232.
- [6] **Schlosser F., Unterreiner P.,** Renforcement des sols par inclusions; Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, doc C 245, p01-21.
- [7] **Burwash W.J., 2001.** Case History of a 9m high geogrid reinforced retaining wall backfilled with cohesive soil. Geosynthetics'91 Conference Alanta, USA. P485-493.
- [8] **Caquot, A.,** " Équilibre des massifs á frottement interne. Stabilité des terres pulvérulentes et cohérentes", Gauthier–Villars, Paris. (1934).
- [9] **Costet, J. & Sanglerat, G. :** Cours pratique de mécanique des sols, Tome 2. Dunod, Paris. 1969.
- [10] **J.M. Alliot, T. Schiex, P. Brisset, and F. Garcia.** Intelligence artificielle et informatique théorique. Cépadues éditions, 2002.
- [11] **R.L. Cooley.** A method of estimating parameters and assessing reliability for models of steady state groundwater flow. 2 - application of statistical analysis. Water resources research, 15(3):603–617, 1979.
- [12] **S. Levasseur.** Analyse inverse d'essais et d'ouvrages géotechniques. Master's thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2004.
- 
-

