

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 : Géotechnique

Présenté par : MRABTI MANAL & FNIDES NOUR ELHOUDA

Etude de traitement de la marne de Mila par matériau recyclé

Sous la direction de : Dr. BOUTELDJA FATHE

Juin 2022

REMERCIEMENTS

Nous remercions en particulier avant tout propos, le bon

« Dieu » le tout puissant qui nous a donné sagesse et santé pour faire ce modeste travail.

*Nous tenons à exprimer notre reconnaissance et notre gratitude à notre encadrant Monsieur : **BOUTELDJA
FATHE***

Pour la bienveillance avec laquelle il a guidé notre travail, pour son soutien, ainsi que pour les précieux conseils qu'ils nous a prodigués. Qu'il trouve ici l'expression de notre sincère gratitude.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements aux membres de jury qui ont accepté de juger notre travail.

*Nous remercions la Doctorante **Lcheheub Loubna**, dont l'aide sur le plan expérimental, notamment les essais que nous avons réalisés en laboratoire, qui ont nécessité beaucoup de rigueur, d'assiduité, de patience et aussi pour sa disponibilité qui ont permis de mener à bout ce projet fin d'étude.*

Nous voudrions également remercier l'ensemble de personnel du Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique.

Nos remerciements, également à tout l'ensemble des responsables, ingénieurs et techniciens du Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LNHC) de Guelma de nous avoir accueilli pendant notre période de stage.

Nos remerciements à tous les professeurs de génie civile et le Chef du Département « génie civile et hydraulique ».

Nous associons à ces remerciements toutes les personnes qui ; directement ou indirectement ; ont contribué à la réalisation de ce travail.

Enfin, nous adressons un très grand merci à nos amis, qui nous ont toujours soutenus et encouragés.

DEDICACES

Au sens de gratitude et d'amour je dédie ce travail à Dieu tout puissant, Allah qui m'a donné la volonté et la puissance pour réaliser cette étude dont je souhaiterai qu'elle sera acceptée par lui sobhanaho et qu'il m'aide

A ma famille :

Avec une profonde reconnaissance et toute ma gratitude, grâce et remerciement vont aussi à Mon PAPA que dieu l'accueille dans son paradis et à ma MAMAN, pour sa tendresse, amours, ses encouragements, et surtout pour avoir sacrifié ses plus belles années pour que je puisse arriver là où je suis, c'est grâce à eux; et aussi pour ma unique sœur Iméne, à mes deux frères Anis et Saleh; Ainsi à ma famille Mrabti et Laraba que je n'oublierai jamais ses encouragements et ses conseils aussi.

A mes amis :

Hamlaoui Nada; Merabti Hamdi

Ainsi à tous mes amis de promo 2021/2022 option géotechnique et à Tous les autres qui étaient là pour moi et même aux autres que je les connais bien.

Toute la promotion : M2-GC2021/2022.

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

Manel

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail:

A l'homme, mon précieux

Mon cher papa: Lekhmissi

A la plus belle femme du monde, qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences, qui n'a épargné aucun effort pour être heureuse, ma plus grande fierté:

Ma mère Fatiha

A mes chères sœurs: Imène et Ferial

A mes chers frères: Hamoud et Oussama

A mes amours: Massara, Ouwaï, Younes

A mon fiancé: Islam, qui n'a pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long du terme de mes études.

A tous les enseignants qui m'ont dirigé vers le chemin de la réussite.

Enfin, à tous qui nous sont très chers.

Houda

RESUME

Le traitement des sols par les techniques de stabilisation chimique est largement utilisé en terrassement routier. Les marnes sont des matériaux relativement tendres qui présentent une résistance élevée à l'état sec mais leur comportement est différent en contact avec l'eau, elles deviennent gonflantes et non résistantes, ce qui limite leur utilisation comme matériau de remblais dans les travaux de terrassement. Ce travail de fin d'étude a pour but d'évaluer au laboratoire le comportement de la marne argileuse de Mila, compactée et traitée avec matériau recyclé. Dans ce contexte, la démarche adoptée dans ce travail est basée sur une étude expérimentale. Dans cette étude, des essais de compression non confinée et de cisaillement rectiligne ont été réalisés sur différents échantillons de marne traitée à différents dosages. Les résultats montrent que l'ajout de la coquille d'œuf calcinée et de la zéolite au sol conduit à une amélioration des caractéristiques mécaniques, c'est-à-dire la résistance à la compression simple qui se traduit par une meilleure portance et la cohésion, l'angle de frottement interne et la résistance au cisaillement maximal. Par la suite, une étude numérique par le logiciel Plaxis vient compléter l'étude expérimentale afin d'étudier le comportement d'un remblai de grande hauteur confectionné avec la marne stabilisée.

Mots clés : Marne, coquille d'œuf calcinée, zéolite, étude expérimentale, étude numérique, Plaxis

ABSTRACT

Soil treatment by chemical stabilization techniques is widely used in road construction. Marls are relatively soft materials that present a high resistance in the dry state but their behavior is problematic in contact with water, they become swollen and non-resistant, which limits their use as embankments materials in earthworks. The aim of this work is to evaluate in the laboratory the behavior of clayed marl of Mila department, compacted and treated with recycled material. In this context, the approach adopted in this work is based on an experimental study, which unconfined compression tests and shear tests were carried out on different samples of treated marl at different dosages. The results show that the addition of calcined eggshell and zeolite to the soil improve their mechanical characteristics, which leads to a simple compressive strength resulting in better bearing capacity and cohesion, internal friction angle and maximum shear strength. Then, a numerical study achieved by the Plaxis software completes the experimental study in order to study the behavior of a high embankment made with the stabilized marl.

Key words: *Marl, calcined eggshell, zeolite, experimental study, numerical study, Plaxis.*

ملخص

تستخدم معالجة التربة بتقنيات التثبيت الكيميائي على نطاق واسع في أعمال الحفر على الطرق، التربة الطينية هي مواد لينة نسبياً لها قوة عالية في الحالة الجافة ولكن سلوكها يختلف عند ملامستها للماء ، فهي تصبح منتفخة وغير متماسكة، مما يحد من استخدامها كمواد ردم في أعمال الحفر. تهدف مذكرة التخرج هذه إلى تقييم سلوك التربة الطينية من ولاية ميري في المختبر بعد ضغطها ومعالجتها بمواد معاد تدويرها. في هذا السياق ، فإن المنهج المتبع في هذا العمل مبني على دراسة تجريبية. في هذه الدراسة تم إجراء اختبارات الضغط غير المحصور والقص المستقيم على عينات مختلفة من التربة تمت معالجتها بجرعات مختلفة. أظهرت النتائج أن إضافة قشر البيض المكلس والزيوليت إلى التربة يؤدي إلى تحسن في الخصائص الميكانيكية ، أي مقاومة الضغط البسيط الذي ينتج عنه قدرة تحمل وتماسك أفضل ، وزاوية الاحتكاك الداخلي والحد الأقصى لقوة القص. كما تضمن هذا العمل دراسة رقمية بواسطة برنامج البلاكسيس استقرار الردم المتكون من التربة.

الكلمات المفتاحية: التربة الطينية ، قشر البيض المكلس ، الزيوليت ، دراسة تجريبية ، دراسة رقمية، برنامج البلاكسيس

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
------------------------------	----------

CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES SOLS NATURELS	2
---	----------

1. INTRODUCTION	2
2. DÉFINITION D'UN SOL	2
3. CARACTÉRISTIQUES DES SOLS	4
3.1. CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES	4
3.2. CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-MÉCANIQUES	5
4. CLASSIFICATION GÉOTECHNIQUE DES SOLS	6
4.1. CLASSIFICATION USCS / LCPC	7
4.2. CLASSIFICATION DES SOLS SELON LA NOMENCLATURE GTR	8
4.3. SYSTÈME DE CLASSIFICATION AASHTO	9
5. DIFFÉRENTS TYPES DES SOLS FINS	9
5.1. ARGILES	10
5.2. LIMONS	10
5.3. VASES	11
5.4. TOURBES	12
5.5. MARNES	13
6. PATHOLOGIE LIÉES AUX SOLS MARNEUX	16
6.1. PORTANCE INSUFFISANTE	16
6.2. TASSEMENT EXCESSIF	17
6.3. RETRAIT-GONFLEMENT IMPORTANT	18
6.4. RISQUE DE GLISSEMENT DE TALUS NATUREL	18
6.5. PROBLÈME D'ÉROSION	19
7. CONCLUSION	20

CHAPITRE 2 : AMÉLIORATION DES SOLS	21
---	-----------

1. INTRODUCTION	21
2. TRAITEMENT CHIMIQUE	21
2.1. TRAITEMENT CONVENTIONNEL	21
2.2. TRAITEMENT NON CONVENTIONNEL	23
3. TECHNIQUES D'EXÉCUTION	28
3.1. TECHNIQUE COURANTE DE REMBLAI	28
3.2. TECHNIQUE DE TRAITEMENT EN COUCHE DE FORME	29
4. TECHNIQUE DE RENFORCEMENT DES OUVRAGES GÉOTECHNIQUES	31
4.1. COLONNES BALLASTÉES	31
4.2. INCLUSION RIGIDE	32
4.3. TIRANT D'ANCRAGE	33

4.4. CLOUAGE DU SOL	35
4.5. LES GÉO SYNTHÉTIQUES	35
4.6. LA TERRE ARMÉE	36
5. CONCLUSION	37

CHAPITRE 3 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE TRAITEMENT DE LA MARNE

1. INTRODUCTION	38
2. LOCALISATION DU PRÉLÈVEMENT	38
3. CARACTÉRISATION DE LA MARNE	39
3.1. INDENTIFICATION DU SOL	39
3.2. ESSAI PROCTOR ET CBR	48
3. PRODUITS DE TRAITEMENT UTILISÉS	52
3.1. ZÉOLITE	52
3.2. COQUILLE D'ŒUFS CALCINÉE	52
4. CHOIX DES MÉLANGES ET DOSAGES	52
5. COMPORTEMENT DE LA MARNE APRÈS TRAITEMENT	53
5.1. ESSAI DE COMPRESSION NON CONFINÉE	53
5.2. ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE (CONSOLIDÉ DRAINÉ)	59
6. CONCLUSION	66

CHAPITRE 4 : ETUDE NUMÉRIQUE

1. INTRODUCTION	66
2. PRÉSENTATION DU PLAXIS	66
2.1. CODE DE CALCUL PLAXIS	66
2.2. LES SOUS-PROGRAMMES DE PLAXIS	67
2.3. LES MODÈLES DE COMPORTEMENT UTILISÉS DANS PLAXIS	70
3. MODÉLISATION DU REMBLAI MARNEUX	74
3.1. PARAMÈTRE DE LA MODÉLISATION	74
3.2. INTRODUCTION DE LA GÉOMÉTRIE DU REMBLAI	74
3.3. INTRODUCTION DES PROPRIÉTÉS DE LA COUCHE DE SOL	75
4. RÉSULTATS NUMÉRIQUES	76
5. CONCLUSION	80

CONCLUSION GÉNÉRALE

RÉFÉRENCES

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 Les phases des sols.....	2
Fig. 2 Différents états de l'eau dans les sols	3
Fig. 3 La répartition moyenne en (%) des différentes phases du sol	4
Fig. 4 Classification des sols fins selon le système USCS/LCPC.....	8
Fig. 5 La classification GTR pour les sols A, B, C et D	9
Fig. 6 Photo d'une argile	10
Fig. 7 Photo d'un sol limoneux	11
Fig. 8 Photo d'un sol vaseux	12
Fig. 9 (a) Tourbe blonde, (b) Tourbe brune, (c) Tourbe blonde.	13
Fig. 10 Etang de marne.	13
Fig. 11 cycle des roches	14
Fig. 12 Aspect visuel de la marne	15
Fig. 13 Talus de déblais routier-alternance marne-calcaire	15
Fig. 14 Principaux types de marne	16
Fig. 15 Difficulté de la traficabilité des engins sur les sols marneux.....	17
Fig. 16 Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation	18
Fig. 17 Phénomène de retrait-gonflement	18
Fig. 18 a) Glissement talus b) Glissement sur route	19
Fig. 19 Phénomène d'érosion dans les remblais	19
Fig. 20 Enchaînement des tétraèdres SiO_4 et AlO_4	27
Fig. 21 Coquille d'œuf	28
Fig. 22 Schéma de la réalisation du mélange par la technique dite du dépôt-reprise	29
Fig. 23 Opération élémentaires de mise en œuvre d'une couche de forme traitée	31
Fig. 24 Colonnes ballastées	31
Fig. 25 Inclusion rigide	32
Fig. 26 Tirant d'encrage	33
Fig. 27 Clouage du sol.....	35
Fig. 28 Situation géographique du prélèvement du sol.....	38
Fig. 29 : Zone de prélèvement de la marne	39

Fig. 30 Détermination la teneur en eau naturelle	39
Fig. 31 Essai granulométrique par tamisage (voie humide).....	41
Fig. 32 Courbe granulométrique de la marne de Mila	41
Fig. 33 Essai de granulométrique par sédimentation	42
Fig. 34 Courbe granulométrique par tamisage et sédimentation de la marne	43
Fig. 35 Essai de détermination de la limite de liquidité par la coupelle de Casagrande	44
Fig. 36 Détermination de la limite de liquidité	45
Fig. 37 Détermination de la limite de plasticité	45
Fig. 38 Essai au bleu de méthylène	46
Fig. 39 Essai Proctor normal	48
Fig. 40 Courbe Proctor de la marne	49
Fig. 41 Courbe force – pénétration de l’essai IPI.....	51
Fig. 42 Évolution de l’IPI en fonction de la teneur en eau.....	51
Fig. 43 Zéolite avant et après broyage	52
Fig. 44 Coquille d’œuf avant et après calcination et après broyage	52
Fig. 45 Photos des éprouvettes préparées.....	54
Fig. 46 Photos de l’éprouvette après 28 jours	54
Fig. 47 Exécution de l’essai de compression	55
Fig. 48 Photos de l’écrasement de l’éprouvette de sol naturel.....	56
Fig. 49 Evolution de la résistance à la compression Rc en fonction du dosage.....	56
Fig. 50 Evolution de Rc en fonction des différentes proportions de Coquille - Zéolite	57
Fig. 51 Evolution de la force de compression en fonction du déplacement pour le dosage 6% ..	58
Fig. 52 Evolution de la force de compression en fonction du déplacement pour le dosage 10%	59
Fig. 53 Préparation des mélanges pour le compactage	59
Fig. 54 Compression avec l’appareil CBR.....	60
Fig. 55 Les échantillons après la compression	60
Fig. 56 Cisaillement des éprouvettes dans la boite de Casagrande	61
Fig. 57 Courbe contrainte de cisaillement-déplacement de la marne naturelle	62
Fig. 58 Courbe contrainte de cisaillement - contrainte normal de la marne naturelle	62
Fig. 59 Courbe contrainte de cisaillement-déplacement de la marne traitée à 6%	63
Fig. 60 Courbe contrainte de cisaillement - contrainte normal de la marne traitée à 6%	63

Fig. 61 Courbe contrainte de cisaillement-déplacement de la marne traitée à 10%	64
Fig. 62 Courbe contrainte de cisaillement - contrainte normal de la marne traitée à 10%	64
Fig. 63 Evolution de angle de frottement et la cohésion en fonction du dosage en liant.....	65
Fig. 64 Résistances au cisaillement maximales (τ_{max}) avant et après traitement	66
Fig. 65 Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (Mode de création géométrique).....	67
Fig. 66 Fenêtre principale du programme de calcul.....	68
Fig. 67 Fenêtre de calcul	68
Fig. 68 Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Output.....	69
Fig. 69 Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Curves	69
Fig. 70 Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.....	71
Fig. 71 Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb.....	72
Fig. 72 Fenêtre des paramètres du Hardening Soil Model.....	73
Fig. 73 La géométrie du modèle de terrain sur Plaxis (H=15m, pente =45°)	75
Fig. 74 Propriétés de la couche de marne.....	75
Fig. 75 Déformation du remblai en marne naturelle	76
Fig. 76 Les lignes de rupture du remblai de la marne naturelle	76
Fig. 77 Les lignes de rupture du remblai de la marne traitée à 6% (pente 45°).....	77
Fig. 78 Les lignes de rupture du remblai de la marne traitée à 10% (pente 45°).....	77
Fig. 79 Les lignes de rupture du remblai de la marne traitée à 6% (pente 60°).....	78
Fig. 80 Les lignes de rupture du remblai de la marne traitée à 10% (pente 60°).....	78
Fig. 81 Coefficient de sécurité en fonction de la pente avant et après traitement avec et sans chargement (H=15m)	79

LISTE DES TABLEAUX

Tab. 1 Classification des sols grenus selon L.C.P.C	8
Tab. 2 Classification des sols de l'AASHTO.....	9
Tab. 3 Dénomination des sols fins calcaires.	14
Tab. 4 Classification des zéolithes selon leurs compositions chimiques	27
Tab. 5 Analyse granulométrique par tamisage de la marne	41
Tab. 6 Résultat de l'essai granulométrie par sédimentation.....	42
Tab. 7 Paramètres de la courbe granulométrique de la marne	43
Tab. 8 Résultats de la limite de liquidité.....	44
Tab. 9 Résultats de la détermination de la limite de plasticité.....	46
Tab. 10 Résultat de l'essai VBS.....	47
Tab. 11 Classifications de la marne de Mila	47
Tab. 12 Résultats de l'essai Proctor normal.....	49
Tab. 13 Paramètres de la courbe Proctor.....	49
Tab. 14 Données de poinçonnement du sol par l'essai IPI	50
Tab. 15 Valeurs de l'IPI en fonction de la teneur en eau	51
Tab. 16 Proportions entre la coquille d'œuf et la zéolite	53
Tab. 17 Quantité de chaque composant des mélanges sol-liant.....	55
Tab. 18 Les résistances maximales pour différentes proportions de coquille et zéolite	56
Tab. 19 Rapport d'amélioration de Rc par rapport au sol naturel.....	57
Tab. 20 Écart entre Rc à 6% et à 10% de dosage.....	58
Tab. 21 Résultats des essais de cisaillement de la marne naturelle.....	62
Tab. 22 Résultats des essais de cisaillement de la marne traitée à 6%	63
Tab. 23 Résultats des essais de cisaillement de la marne traitée à 10%	64
Tab. 24 Angles de frottement et cohésion de la marne naturelle et traitée après 7 jours.....	65
Tab. 25 Paramètres de la modélisation du sol utilisé	74
Tab. 26 Coordonnées des points des modèles géométriques	74
Tab. 27 : Facteurs de sécurité des remblais instables après renforcement.....	79

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

De par la géologie de notre territoire, les sols inadaptés présentent des contraintes fréquentes pour la réalisation des terrassements des projets d'infrastructures de transports (routes, chemins de fer, aérodromes, plateforme industrielle, ...). Il est donc nécessaire d'améliorer ces sols afin qu'ils puissent être utilisés pour la construction de ces ouvrages géotechniques. Pour ce fait, deux solutions se présentent à savoir les méthodes chimiques et les méthodes de renforcement mécanique. Le choix de l'une de ces méthodes dépend de plusieurs paramètres, tels que des considérations économiques, la nature des sols à améliorer et le respect des conditions environnementales.

La technique de stabilisation chimique du sol par l'utilisation d'additifs minéraux tel que le ciment, la chaux et les liants hydrauliques routiers est largement utilisée dans de nombreuses applications de génie civil. Mais, la production de ces additifs présente l'inconvénient d'être nocif pour l'environnement à cause son empreinte carbone élevée, consommation d'énergie importante, dégagement de poussière dans l'air et épuisement des ressources naturelles.

Dans ce contexte, nous chercherons à travers ce travail de fin cycle Master à réutiliser une marne argileuse de la région de Mila de caractéristiques géotechniques initiales médiocres dans la construction des remblais routiers. Cette réutilisation nécessite un traitement par l'ajout d'un agent chimique adapté. Pour cela nous avons proposé l'utilisation d'un nouveau liant formulé à base de matériau recyclé qui est la coquille d'œuf calcinée et un matériau naturel qui est la zéolite.

Notre mémoire contient quatre chapitres :

Le premier chapitre décrit les caractéristiques physiques et minéralogiques des différents sols et consacre une partie pour les sols fins. Il contient aussi les systèmes de classification des sols (GTR et USCS...). Il présente également les principales pathologies liées aux sols fins (tassement, gonflement, glissement, ...).

Le deuxième chapitre est consacré au traitement des sols. Il parle des produits de traitement, et la technique et le matériel nécessaire pour réaliser un traitement de sol. De plus, nous avons fait le point sur les techniques de renforcement des sols et leurs techniques d'exécution.

Le troisième chapitre présente l'étude expérimentale réalisée dans notre travail. Il est consacré aux différents essais d'identification de la marne de Mila et présente également les résultats obtenus sur le comportement mécanique et géotechnique après traitement chimique.

Enfin, le dernier chapitre présente une étude numérique réalisée à l'aide de logiciel Plaxis d'un grand remblai construit en marne naturelle et traitée.

***CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SOLS
NATURELS***

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SOLS NATURELS

1. INTRODUCTION

Le sol est un système complexe qui se constitue de particules de différentes tailles avec une composition chimique et minéralogique diverses. Nous présentons dans ce chapitre des généralités sur les sols naturels. Nous avons commencé par une définition et un aperçu général sur les diverses phases du sol. Ensuite, nous décrivons les caractéristiques minérales et physico-mécaniques des sols. Puis nous avons montré les différents systèmes de classification des sols comme la classification USCS/LCPC, GTR et AASHTO. Nous avons également cité les différents types de sols fins tels que les argiles, les limons et les marnes ... etc. Par la suite, nous avons focalisé notre bibliographie sur les marnes en faisant zoom sur leurs natures, leurs formations, types ... etc. Enfin, nous avons terminé ce chapitre par la présentation des différentes pathologies liées à l'utilisation des sols marneux dans les terrassements.

2. DEFINITION D'UN SOL

Le sol est un matériau complexe et variable. Il est hétérogène, d'origine minérale et organique et est constitué de grains et de pores. Le sol est donc un matériau à trois phases, phase solide (Squelette minéral), phase liquide et phase gazeuse (Fig. 1). Chaque phase joue un rôle bien précis dans le comportement du sol.

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

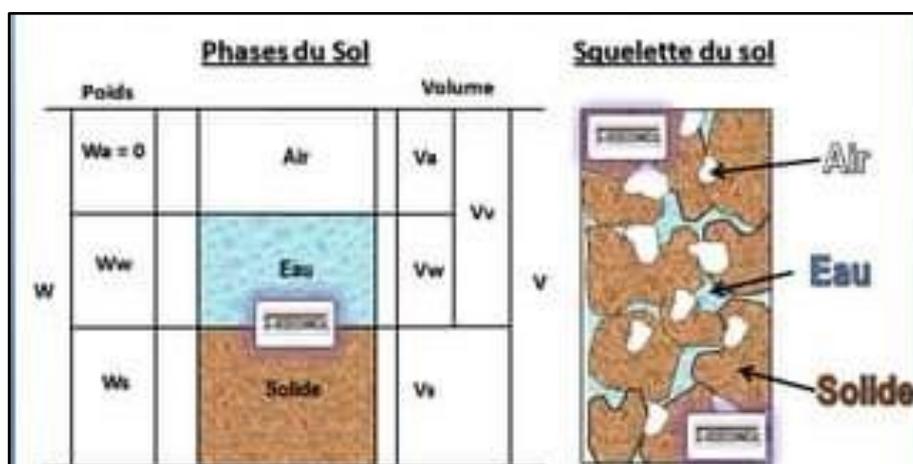


Fig. 1 Les phases des sols

a) Phase solide

Les propriétés physiques essentielles d'un sol pour les applications de Génie Civil se déduisent généralement de la taille des grains, de leurs formes, de leurs arrangements, de la qualité de leurs contacts, de leurs compositions minéralogiques, etc. Pour les sols grenus, les grains sont le résultat d'une désagrégation mécanique de la roche mère. Ils gardent par conséquent la même structure minéralogique. Ces éléments sont en général quartzeux, donc insensibles à l'eau, c'est le cas des sables et des graviers. Pour les argiles, les particules solides sont le résultat d'une désagrégation de la roche mère suite à des attaques chimiques combinées ou non avec des attaques mécaniques ou physiques. Ces éléments ont donc une structure minéralogique différente de celle de la roche mère. Cette famille de sol est très sensible à l'eau. [1]

b) Phase liquide

Le liquide qui remplit les vides entre les grains du sol est en général l'eau. (Fig. 2). Elle se rencontre sous différentes formes :

- **L'eau libre** : dite aussi gravifique parce qu'elle s'écoule sous l'effet de la gravité. C'est l'eau ordinaire rencontrée dans les lacs et les rivières. Elle s'élimine à 100°C et peut contenir des sels minéraux ou de l'air dissous.
- **L'eau capillaire** : c'est une eau qui est maintenue à l'aide de force de tension superficielle entre les points de contact des grains chez les sols partiellement saturés. Elle ne s'écoule pas sous l'effet de la gravité mais s'élimine à 100°C.
- **L'eau adsorbée** : dite aussi eau hygroscopique. Elle forme une mince couche autour des particules argileuses. Elle possède des propriétés plus proches des solides que des liquides. Elle ne s'élimine qu'à de très fortes températures.
- **L'eau de composition**: Elle est constituée de molécules d'eau qui entrent dans la composition minéralogique de l'élément. Elle ne peut être libérée qu'en détruisant la structure élémentaire du matériau.

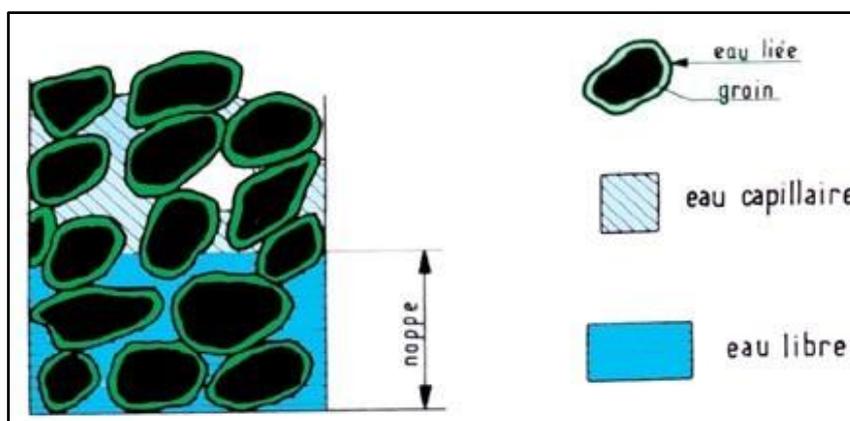


Fig. 2 Différents états de l'eau dans les sols

c) Phase gazeuse

Lorsque le sol n'est pas saturé, la phase gazeuse est constituée par un mélange d'air, de vapeur d'eau et éventuellement de gaz provenant de la décomposition de matières organiques. Chaque phase joue un rôle bien précis dans le comportement du sol. (Fig. 3). [1]

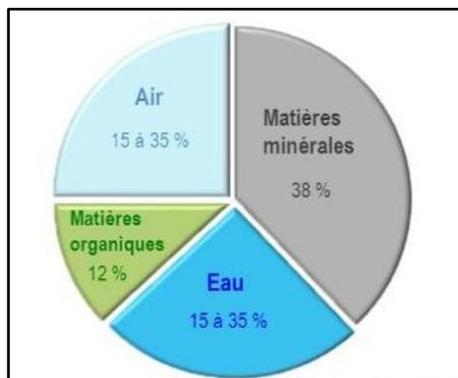


Fig. 3 La répartition moyenne en (%) des différentes phases du sol

3. CARACTERISTIQUES 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.

3.1. Caractéristiques minéralogiques

Lorsque la terre s'est formée, plusieurs roches différentes ont été créées. 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. [2]

3.1.1 Minéraux primaires

Ce sont les minéraux résiduels qui ont échappé à l'altération, ils sont stables c-à-dire qu'ils conservent la signature minéralogique et géochimique des matériaux source, ou instables c-à-dire primaires n'ayant pas subi suffisamment les effets de l'altération.

Le quartz, les feldspaths et les micas qui se retrouvent dans diverses fractions granulométriques sont les minéraux primaires les plus abondants dans les sols. Ils peuvent résulter d'une simple érosion des substrats avec tris granulométrique au cours du transport, surtout par l'eau, et au cours de la sédimentation. Cette catégorie de minéraux se retrouve souvent dans **les sols grenus** (sables grossiers, graviers, etc.).

3.1.2. Minéraux secondaires

Les minéraux secondaires résultent de la transformation (ou dégradation) géochimique des minéraux primaires, ce qui implique donc un changement de statut minéralogique accompagné d'une réduction de taille. Ils comprennent divers types de minéraux argileux (simples ou inter stratifiés), ainsi que des hydroxydes ou des oxydes généralement de fer, parfois de Manganèse ou d'Aluminium. Les minéraux argileux se cantonnent dans une gamme granulométrique comprennent entre le micron et quatre microns.

3.1.3. Sels solubles

Les solutions qui résultent de l'altération par hydrolyse, transportent des éléments chimiques actifs tels que le potassium K, le sodium Na, le calcium Ca, le magnésium Mg. Soit ces éléments quittent définitivement les sites de l'altération, soit ils y demeurent en constituant des phases minérales neuves (carbonates, sulfates, sels). Les carbonates peuvent jouer un rôle de ciment temporaire ou scellant définitif les minéraux argileux. Le potassium et le sodium peuvent aussi subsister dans ou à proximité des minéraux argileux. Par conséquent, ces sels peuvent influencer fortement sur le comportement hydromécanique des sols.

3.1.4. Matières organiques

Elles résultent de la transformation hydrolytique ou des résidus biologiques des végétaux à la surface des sols. Ces résidus peuvent être réincorporés plus bas dans le matériau argileux du sol. La matière organique, à raison de quelques pourcent peut être présente dans les sédiments. Elle se caractérise par une forte capacité de rétention d'eau, ainsi, agit selon le comportement géo mécanique d'un matériau argileux.

3.2. Caractéristiques physico-mécaniques

Les caractéristiques physiques sont obtenues en laboratoire à partir d'essais très simples tels que les pesées avant et après passage à l'étuve et les mesures de volume.

- **Texture** : composition granulométrique du sol, c'est à dire la proportion de chacun de ses constituants solides (argiles, sables, graviers...), qui ont des tailles différentes.
- **Structure** : la structure d'un sol est l'assemblage, un moment donné, de ses constituants solides. La stabilité structurale dépend de la matière organique des sols. Une mauvaise structure peut donc empêcher l'écoulement des eaux dans le sol, les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère.
- **Porosité** : volume total des espaces laissés libres entre les agrégats ou les particules solides. Elle conditionne la circulation de l'eau et des gaz dans le sol.
- **La perméabilité du sol** : dépend de la structure du sol, c'est sa capacité à laisser passer l'eau vers les couches inférieures.

- **Capacité de rétention d'eau** : quantité d'eau retenue par le sol qui est liée aux particules solides par les forces physiques [3].

Le comportement mécanique des matériaux est caractérisé par des paramètres qui permettent d'estimer les tassements, la compressibilité ou la consolidation, et la résistance au cisaillement des sols. Ces paramètres sont obtenus à partir des essais géotechniques en laboratoire, notamment :

- L'essai de compactage Proctor, il a pour objectif d'étudier l'influence de la teneur en eau d'un échantillon de sol sur le poids volumique sec de cet échantillon soumis à une énergie de compactage déterminée. Il permet ainsi, de déterminer la teneur en eau optimale nécessaire pour avoir la densité maximale du sol ou des matériaux analysés.
- L'indice portant immédiat (IPI), à teneur en eau naturelle exprime la capacité au pointage d'une éprouvette de sol compacté à énergie Proctor.
- L'essai de cisaillement direct à la boîte, a pour objectif de déterminer la résistance au cisaillement du sol (la contrainte de cisaillement à la rupture τ), ainsi que les caractéristiques mécaniques (c et ϕ) pour une contrainte normale donnée (σ), suivant un plan de cisaillement horizontale imposée.
- L'essai de cisaillement à l'appareil triaxial, a pour objectif de déterminer la résistance au cisaillement du sol ainsi que les caractéristiques mécaniques (c et ϕ) pour une contrainte de confinement donnée σ_3 .
- L'essai de compression simple appelé également compression non confinée, a pour objectif de mesurer la force axiale de rupture de l'échantillon sous une vitesse de compression donnée.
- L'essai œdométrique, permet d'évaluer le tassement et le gonflement du matériau au cours du temps. Il permet également de classifier les sols vis-à-vis de leur compressibilité [1].

4. CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES SOLS

Les systèmes de classification des sols ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Il existe plusieurs systèmes de classification des sols, parmi elles on peut citer :

- 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.
- Classement G.T.R (Guide des terrassements routiers Français).
- Classification A.A.S.H.T.O (American Association State Highways and Transportation Officials).

4.1. Classification USCS / LCPC

Cette classification est la plus utilisée en mécanique des sols. Elle a été développée aux Etats-Unis dans les années 1950 sous le nom United Soil Classification System (USCS) puis francisée au début des années 1960 sous le nom de Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) LC PC. La classification USCS / LCPC est basée sur les dimensions des particules (granulométrie) et leur comportement à l'eau (plasticité). Elle prend en compte également la teneur de la fraction organique dans le cas des sols fins en attribuant la teneur en matières organiques par la méthode de la perte au feu. D'après cette classification, on peut distinguer :

- **Les sols grenus** : plus de 50 % des éléments > 0,08 mm.
- **Les sols fins** : plus de 50 % des éléments < 0,08 mm.
- **Les sols organiques** : dont la teneur en matière organique est > 10 %.

Pour **les sols fins**, la méthode de classification est basée sur les limites d'Atterberg (Fig. 4). [4]

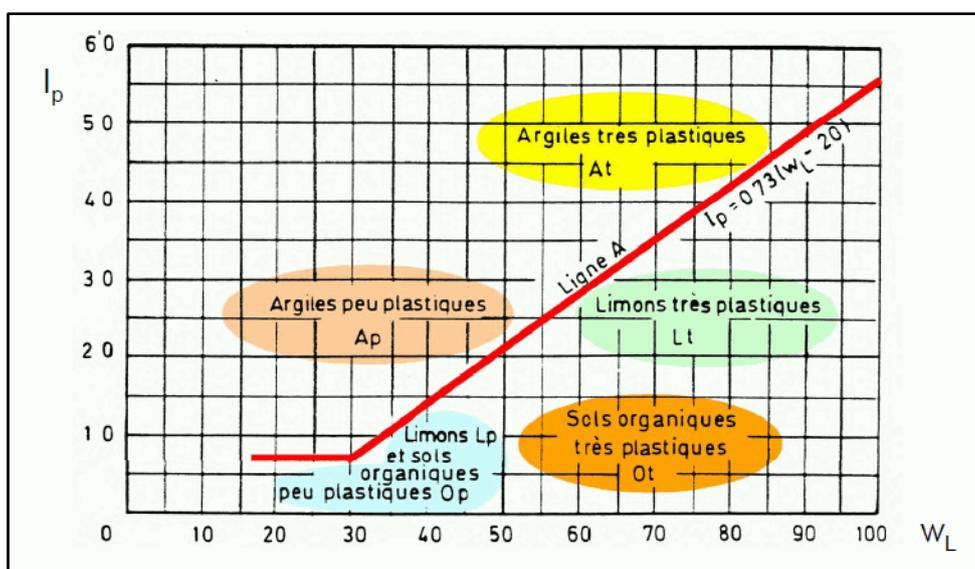
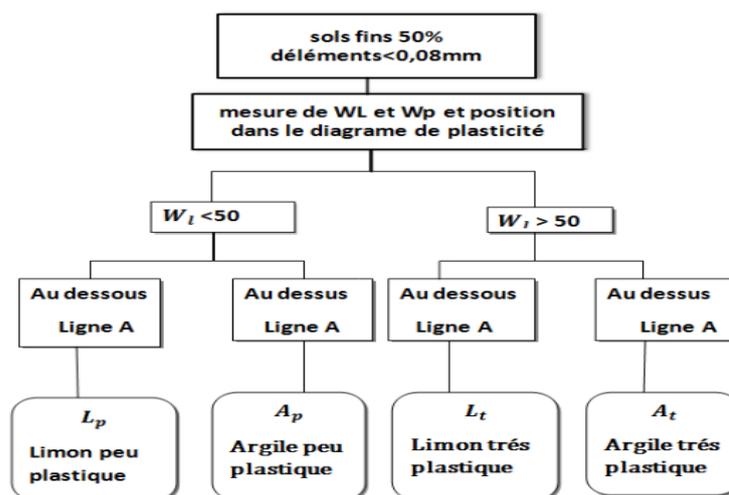


Fig. 4 Classification des sols fins selon le système USCS/LCPC

Pour les sols grenus, la classification se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg. Elle est présentée dans le Tab. 1.

CLASSIFICATION DES SOLS GRENUS (plus de 50% des éléments > 0,08 mm)					
Définitions		Symb	Critères	Appellation	
GRAVES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm (Tamis ASTM N° 7)	Moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	$C_u > 4$ et $1 < C_c < 3$	Grave propre bien graduée
		Plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	Gm (GP)	Une des conditions Gb non satisfaites	Grave propre mal graduée
			GL (GM)	Limites d'Atterberg au dessous de la ligne A (Voir figure 2.3)	Grave limoneuse
			GA (GC)	Limites d'Atterberg au dessus de A	Grave argileuse
SABLES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	Moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Sb (SW)	$C_u > 6$ et $1 < C_c < 3$	Sable propre bien graduée
		Plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	Sm (SP)	Une des conditions Sb non satisfaites	Sable propre mal graduée
			SL (SM)	Limites d'Atterberg au dessous de la ligne A (Voir figure 2.3)	Sable limoneux
			SA (SC)	Limites d'Atterberg au dessus de la ligne A (Voir figure 2.3)	Sable argileux
Lorsque : $5\% < \% \text{ d'éléments inférieurs à } 0,08 \text{ mm} < 12\% \Rightarrow$ on utilise un double symbole					

Tab. 1 Classification des sols grenus selon L.C.P.C

4.2. Classification des sols selon la nomenclature GTR

On distingue 3 familles de matériaux :

- 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 de famille 1 (Fig. 5) : 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 de cette 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 : Los Angeles (LA)
- Résistance à l'usure : Micro Deval (MDE)
- Friabilité : friabilité des sables (FS)

Les paramètres d'état hydrique :

- État hydrique : teneur en eau, essai proctor, essai IPI. [5]

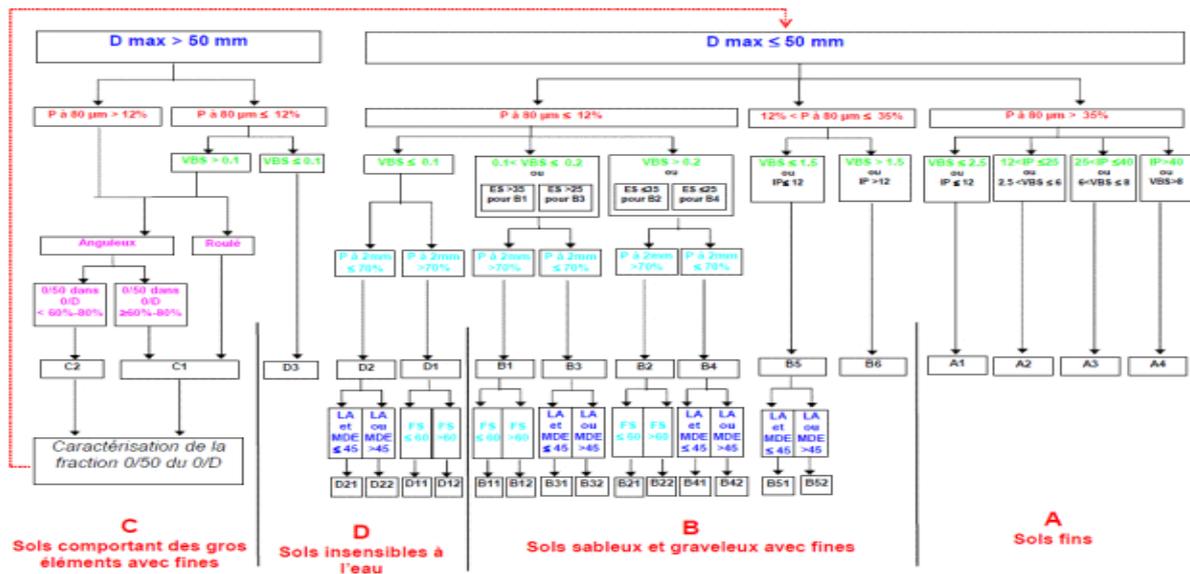


Fig. 5 La classification GTR pour les sols A, B, C et D

4.3. Système de classification AASHTO

Les systèmes de l’American Association of State Highway and Transportation Official est mondialement utilisé pour la construction des routes. On entre dans la table de la gauche à droite et d'en haut en bas, jusqu'à rencontrer le premier groupe et sous groupe qui correspond en accord avec les données de granulométrie et de plasticité (Tab. 2).

Classification générale	Matériaux granulaires 35% ou moins passent au tamis H200							Matériaux argille-limon + 35% passent au tamis H200			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7.5 A-7.6
Classification par groupes	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamissage % qui passe											
2.00 mm (N. 10)	50 max.	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.425 mm (N. 40)	30 max.	50 max.	51 min.	----	----	----	----	----	----	----	----
0.075 mm (N. 200)	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Fraction qui passe tamis N40											
Limite Liquide	----	----	40 max.	41 max.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	41 min.
Indice de plasticité	6 max.		N.P.	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
Matériaux le + commun	Fragment roche Grave sable		Sable fin	Graves et sables Argileux - Limoneux				Sols limoneux		Sols argileux	
Comportement général comme sous-couche	Excellent à Bon							Régulier à mauvais			

Tab. 2 Classification des sols de l’AASHTO

5. DIFFERENTS TYPES DES SOLS FINS

Les sols à grains fins regroupent tous les sols dont les particules sont invisibles à l’œil nu. Le diamètre équivalent de ces particules peut varier d’environ 1 nm à 0,08 mm. Les sols à grain fin sont généralement identifiés sur la base de leur plasticité.

5.1. Argiles

De manière générale, le mot argile sert à désigner l'ensemble des particules dont la taille est inférieure à 2 μm . En termes de taille de grain, le mot argile a deux sens. Il désigne d'abord les particules faites des minéraux argileux dont les cristaux excèdent parfois 2 μm .

Les minéraux argileux proviennent essentiellement de l'altération chimique de certains minéraux composant la roche. Cette altération chimique agit de façon que certains minéraux silicates, comme les micas ou les feldspaths sont transformés en d'autres espèces minérales (kaolinite, illite, Montmorillonite), souvent de granulométrie plus fine. Les minéraux argileux sont surtout de la famille de silicates, formés à base de silice (Si) et d'oxygène (O), tels que le quartz et les feldspaths. Le mot minéral argileux comprend les minéraux qui font partie du groupe des phyllo silicates, appelés aussi silicates de structure lamellaires [8] Fig. 6 .Un feuillet d'argile est formé par l'association des couches tétraédriques (T) à base de tétraèdres.

Le terme argile désigne ensuite les débris les plus fins de la désagrégation-altération physique des roches appelés la farine de roche ($d < 2 \mu\text{m}$). Cette farine peut contenir une proportion de minéraux argileux plus ou moins importante [8].



Fig. 6 Photo d'une argile

5.2. Limons

Les limons, constitués de silt, de lœss et de lœhm, possèdent un squelette siliceux à silico calcaire à grains fins Fig. 7. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles, la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Leur assise est médiocre et donc à éviter pour les fondations.



Fig. 7 Photo d'un sol limoneux

5.3. Vases

Du point de vue géologique, les vases sont des dépôts formés en eau douce ou salée, constituées de grains généralement très fins (inférieurs à 200 μ avec un pourcentage important de particules inférieures à 2 μ m de nature minéralogique variable, disposés en flocons (structure dite en « nids d'abeilles »).

La vase contient généralement une certaine proportion de matières organiques (le plus souvent inférieure à 10%). Elle peut être tourbeuse si la présence de certains micro-organismes favorise la formation de tourbe. Dans les zones littorales, la présence de chlorure de sodium empêche la prolifération de ces micro-organismes, et de ce fait, la vase déposée n'est pas tourbeuse. En se consolidant, la vase perd une partie de son eau, la structure se détruit, et elle se transforme en une argile ou une marne d'autant moins molle que la consolidation est plus importante (Fig. 8).

En fait du point de vue géotechnique, on confond souvent vase et argile molle. Pour le géotechnicien, ces sols se caractérisent par :

- Une teneur en eau est généralement voisine de la limite de liquidité, et un faible poids spécifique sec γ_d (souvent inférieur à 10 kN /m³).
- Une teneur en matière organique de 2 à 10 % environ.
- Une faible cohésion non drainée C_u (de l'ordre de 15 kPa en moyenne).
- Une forte compressibilité donnant lieu à des tassements secondaires importants.
- Une faible perméabilité.
- Un état normalement consolidé (avec sur consolidation en surface, et exceptionnellement sous-consolidé dans les couches profondes) [11].

Il existe plusieurs types de vases à savoir :

Vases marines : les vases marines ou de marée, aussi connues sous les noms de tangué, vases marais, vases salines et parfois de vases rivières sont déposées par la marée à l'embouchure des rivières et des ruisseaux qui se jettent dans la mer et sur les bords peu élevés des baies et

des anses. Elles se composent principalement de particules rocheuses broyées, sous forme d'un sable très fin, et de limon et d'argile en différentes proportions.

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

Vases d'étangs, de lacs et de rivières : ces catégories de vases sont généralement formées par le dépôt des fines substances portées par les eaux des rivières et des ruisseaux. Ce sédiment, qui se compose surtout de particules rocheuses finement broyées, contient souvent une quantité considérable de débris organiques, aussi ces vases sont généralement plus riches en matières organiques que les vases de marées ou d'eau salée [7].



Fig. 8 Photo d'un sol vaseux

5.4. Tourbes

La tourbe se définit comme le produit de la fossilisation de débris végétaux par des microorganismes (bactéries, arthropodes, champignons, microfaune) dans des milieux humides et pauvres en oxygène que l'on appelle tourbière sur un intervalle de temps compris entre 1 000 et 7 000 ans. Les tourbes se présentent comme un matériau de texture fibreuse et elles se forment dans le fond des vallées humides et les dépressions marécageuses. Elles peuvent contenir des éléments détritiques : Sables, graviers, vases. Elles contiennent une très forte proportion d'eau. Si la tourbe est soumise à des conditions particulières de pression et de température causées par son enfouissement, elle se transforme, au bout d'une période de l'ordre du million d'années, en charbon (Fig. 9).

La tourbe est traditionnellement définie comme synonyme de gazon, étant un tissu végétal partiellement carbonisé formé dans des conditions humides par la décomposition de diverses plantes et mousses.

Il existe plusieurs types de la tourbe à savoir :

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

La tourbe brune : qui provient de la transformation de débris végétaux ligneux (arbres) et d'éricacées. Elle est composée de fibres mélangées à des éléments plus fins, provenant d'une dégradation plus poussée des végétaux, lui donnant une texture mésique. Elle est plus âgée (5000 ans) que la précédente.

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

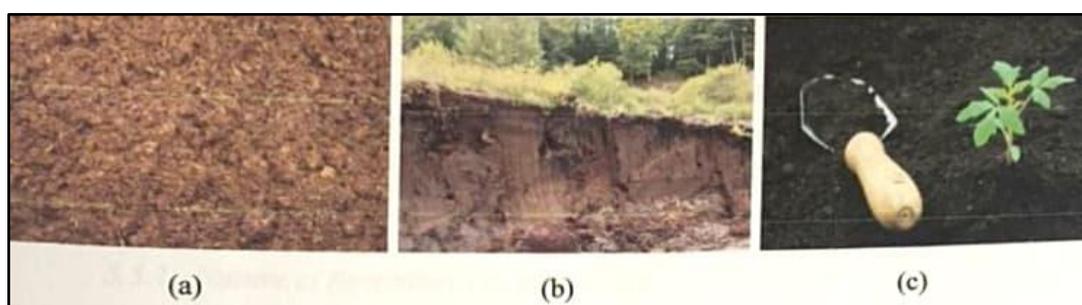


Fig. 9 (a) Tourbe blonde, (b) Tourbe brune, (c) Tourbe noire.

5.5. Marnes

Les marnes sont des formations sédimentaires, cohérents, formées dans un milieu marin peu profond (Fig. 10). Les marnes sont constituées essentiellement d'un mélange entre les calcaires et les argiles, la proportion de ce dernier varie de 30% à 70% (Tab. 3) [12].



Fig. 10 Etang de marne.

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

marnes dans le groupe des lutites, ou pyélites. Suivant la composition minéralogique, on peut distinguer des marnes dolomitiques, glauconie uses, magnésiennes, gypseuses, micacées, sableuses, humifères [13].

Pourcentage de CaCO ₃	Dénomination
0 à 10	Argile
10 à 30	Argile marneuse
30 à 70	Marne
70 à 90	Calcaire marneux
90 à 100	Calcaire

Tab. 3 Dénomination des sols fins calcaires.

a) Nature et formation des marnes

La marne est formée par un mélange de carbonates de calcium (CaCO₃) et de minéraux argileux. Elles marquent le passage entre le calcaire et l'argile (matériau de transition).

Selon le grand cycle des roches (Fig. 11), les particules constituant les marnes, sont le plus souvent transportées par l'eau et le vent. Elles s'accumulent dans les creux du relief ou au fond de l'eau. Quel que soit le milieu, marin, fluviatile ou terrestre, l'ensemble des particules finit par se déposer en couches superposées formant des dépôts sédimentaires. La fraction argileuse de la marne provient soit de l'altération des massifs émergés, qui sont des argiles, soit par un processus acheminé par un réseau hydrographique, les niveaux argileux se déposent dans le bassin de sédimentation. Les marnes auront une origine détritique ou l'héritage domine ou alors une origine chimique ou les minéraux argileux s'étaient, dans le cas, à partir d'ions en solution dans l'eau.

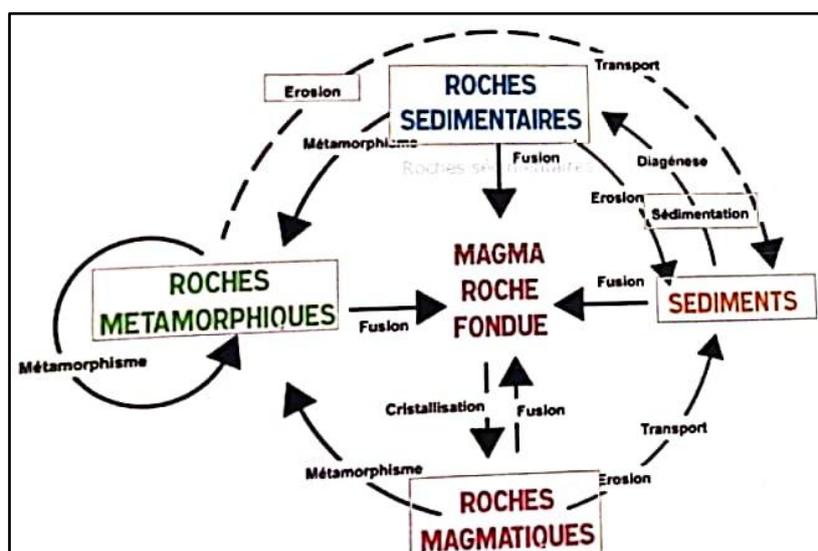


Fig. 11 cycle des roches

Pendant et après le dépôt, les phénomènes de diagenèse interviennent, aboutissant ainsi à la formation du matériau dit « marne ».

Ces dépôts sédimentaires, par leur propre poids, exercent une pression sur les particules. Les couches se compactent et se stabilisent. Cet ensemble d'actions appelé diagenèse donne aux matériaux un aspect stratifié et compact (Fig. 12). Les transformations dia-génétiques affectent particulièrement les minéraux argileux en raison de leur taille, de leur surface spécifique élevée, de leur structure feuilletée facilitant les échanges d'ions entre le minéral et son entourage.

L'ensemble des phénomènes dia-génétiques conduit à la formation d'un matériau dont les propriétés dépendront, en grande partie de l'intensité des phénomènes qui se sont produits.



Fig. 12 Aspect visuel de la marne

Après cette transformation le dépôt qui se constitue principalement de calcaire et de particules argileuses, devient une roche. Les alternances marne-calcaire sont très fréquentes dans les séries sédimentaires et portent le nom de formation marne-calcaire (Fig.13).

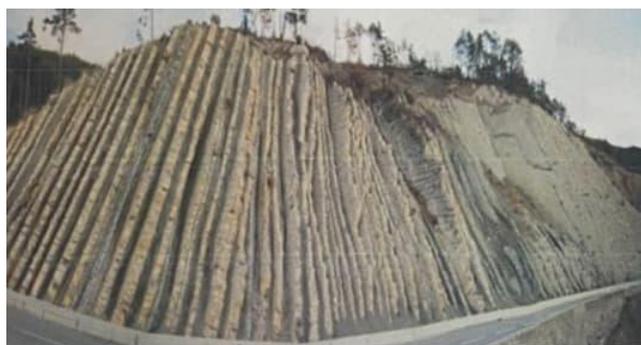


Fig. 13 Talus de déblais routier-alternance marne-calcaire

b) Principaux types des marnes [14]

Marnes bleues : Elles sont reconnaissables à leur couleur bleu nuit. Ces marnes sont extrêmement fines et essentiellement composées d'argile, elles ne contiennent aucun élément détritique.

Marnes nummulitiques ou grises souris : Elles contiennent une fraction d'élément détritique fins, en particulier des sables dont leur présence rend ces marnes reconnaissables puisqu'elles croquent sous la dent.

Marnes gréseuses : Ces marnes ont une composante gréseuse importante, et même des niveaux de grés plus indurés inter stratifiés dans les marnes.

Marnes grises : On les retrouve avec d'épaisseurs plus importantes et elles ne contiennent que de l'argile.

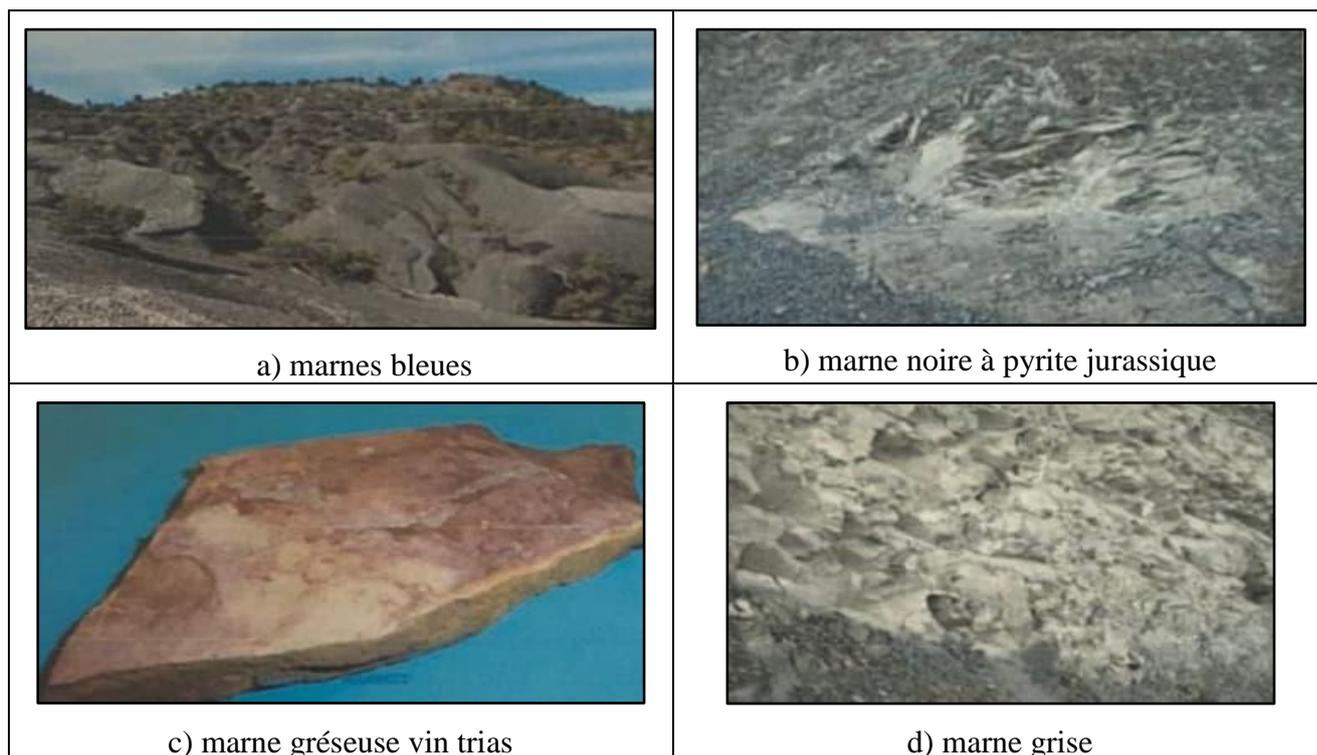


Fig. 14 Principaux types de marne

6. PATHOLOGIE LIEES AUX SOLS MARNEUX

Les sols fins, contiennent des proportions notables d'argiles et de limons, qui influent sur ses propriétés géotechniques intrinsèques. Ils gonflent et deviennent plastiques en présence d'eau, se rétractent avec la sécheresse, et foisonnent sous l'effet du gel. Alors, ces sols sont considérés comme mauvais ou médiocres [10].

6.1. Portance insuffisante

La portance est une caractéristique importante pour la construction des bâtiments, construction des routes, des chemins de fer, aéroport, plateforme industrielle, etc.

A rares exceptions près, tous les sols sont sensibles à l'eau, c'est -à-dire que leur portance diminue lorsqu'ils sont humides, Le sol marneux à une très faible portance que se traduit par l'incapacité de supporter les grandes charges dans le cas à long terme (lorsque l'ouvrage est

en service), et à court terme (vis-à-vis de la phase de réalisation de l'infrastructure). Selon les cas de chantier, on cherche à assurer, avec la couche de sol compactée, l'ensemble ou certaines des fonctions qui vont limiter les déformations au sein de la structure (Fig.15). Cependant, la sensibilité à l'eau des sols fins et leur faible résistance au cisaillement implique une portance inadéquate pour une traficabilité normal des engins sur les couches compactées. Ces sols fins présentent des limitations qui ensemble, sont une lourde contrainte pour la construction des Infrastructures routiers [6].



Fig. 15 Difficulté de la traficabilité des engins sur les sols marneux

6.2. Tassement excessif

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation [15].

Il s'agit d'une déformation lente du sol sous le poids du remblai qui se traduit (Fig. 16).

- au centre du remblai par un enfoncement vertical.
- sous l'emprise du remblai, par un enfoncement vertical combiné à un déplacement latéral de sol de fondation.
- hors de l'emprise du remblai, par un déplacement latéral de sol de fondation jusqu'à une distance fonction de l'épaisseur de sol compressible.

Les déplacements verticaux ont couramment une amplitude de plusieurs dizaines de centimètres. Pour les couches très molles ou de forte épaisseur, cette amplitude peut atteindre plusieurs mètres. Ces déplacements sont plus importants dans l'axe du remblai que vers les crêtes de talus, ce qui provoque une déformation de la plate-forme. Les déplacements horizontaux sont généralement plus faibles que les déplacements verticaux, le rapport entre les deux étant notamment fonction du coefficient de sécurité, de la géométrie du remblai et de l'épaisseur des sols mous. Néanmoins, des déplacements horizontaux de plusieurs dizaines de centimètres ont été observés. La vitesse des tassements est variable, en fonction de la nature des sols compressibles, de leur épaisseur et de la présence des couches drainantes [11].

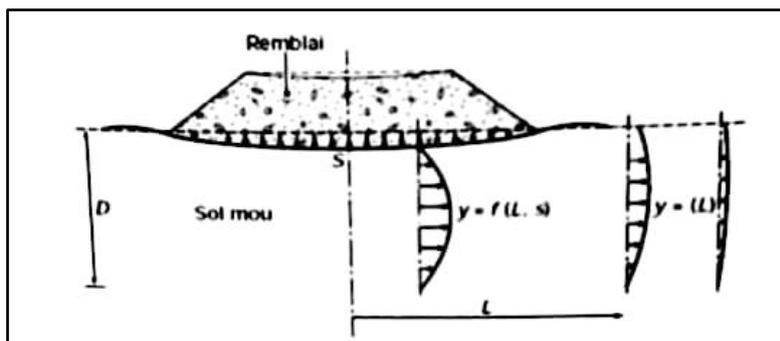


Fig. 16 Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation

6.3. Retrait-gonflement important

Les phénomènes de retrait et de gonflement des sols argileux sont observés depuis longtemps dans les pays au climat sec, où ils sont à l'origine de nombreux désordres causés tant aux bâtiments qu'aux voiries et routes. Il est lié aux variations de teneur en eau des terrains argileux (ils gonflent avec l'humidité et se rétractent avec la sécheresse). Ces variations de volume induisent des tassements plus ou moins uniformes et dont l'amplitude varie suivant la configuration et l'ampleur du phénomène. Sous une habitation, le sol est protégé de l'évapotranspiration, et sa teneur en eau varie peu dans l'année. De fortes différences de teneur en eau vont donc apparaître dans le sol au droit des façades (Fig.17) [10].

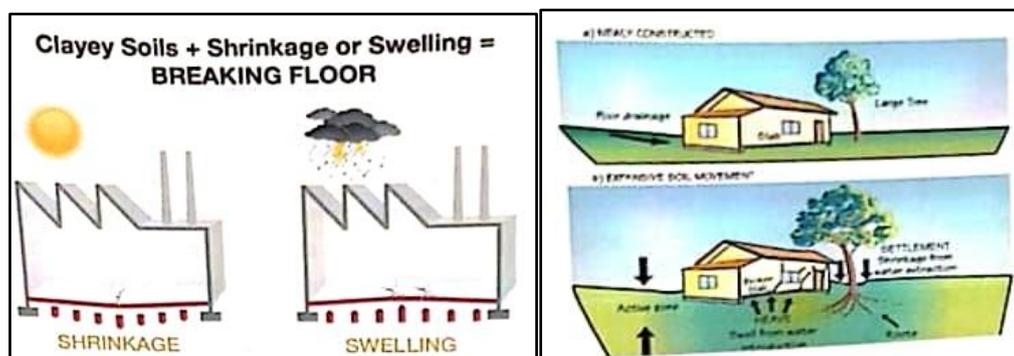


Fig. 17 Phénomène de retrait-gonflement

6.4. Risque de glissement de talus naturel

Les glissements des talus des remblais routiers peuvent survenir durant les travaux de terrassement, pendant l'exécution des remblais ainsi que pendant l'exploitation des ouvrages en terre (Figure 1.19) [6].

Un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent (de quelques mètres par an à quelques millimètres par jour) sur une pente [10]. 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 [15].



Fig. 18 a) Glissement talus b) Glissement sur route

On distingue trois types de glissements :

- Glissement plan.
- Glissement rotationnels simples.
- Glissement rotationnels complexes (composés).

6.5. Problème d'érosion

Les sols constituant les ouvrages en terre peuvent être sujets à des phénomènes d'érosion pouvant affecter les remblais routiers de différentes manières. L'érosion des sols fins peut être décrite comme un phénomène causé par un écoulement d'eau qui arrache et transporte certaines particules du sol (Fig. 19). Les phénomènes d'érosion peuvent être extrêmes ou internes. L'érosion interne intervient au sein de l'ouvrage tandis que l'érosion extrême affecte la surface extrême en contact avec l'eau [6]. Ce phénomène est observé dans les remblais qui sont implantés au voisinage des zones littorales et des cours d'eau tel que les rivières, les oueds et les barrages.



Fig. 19 Phénomène d'érosion dans les remblais

7. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la description des sols fins en général et les marnes en particulier. Nous avons utilisé pour cela différentes échelles de présentation, permettant de montrer les différents minéraux constitutifs et les différentes caractéristiques. Il est important de caractériser les sols et aussi de les classer, c'est à dire de les mettre dans un groupe ayant des comportements similaires.

CHAPITRE 2 : AMELIORATION DES SOLS

CHAPITRE 2 : AMELIORATION DES SOLS

1. INTRODUCTION

Lors de la réalisation d'un projet d'infrastructure de transport, plusieurs problèmes liés aux sols médiocres sont rencontrés. C'est pour cela, il est nécessaire d'adopter des méthodes d'amélioration pour résoudre ces problématiques. Il existe de nombreuses techniques qui permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des sols. Ces techniques sont la stabilisation chimique des sols par l'ajout de produits de traitement et le renforcement des ouvrages géotechniques par différentes techniques. Dans ce chapitre, nous présentons dans un premiers temps les différents produits de traitement (traditionnels et nouveaux) et les techniques de mise en œuvre des sols après traitement. Ensuite, nous exposons un paragraphe sur les techniques de renforcement des ouvrages géotechniques. [16].

2. TRAITEMENT CHIMIQUE

Différents produits de traitement peuvent être utilisés pour améliorer les comportements ou les propriétés des sols. Ces produits peuvent être regroupés en deux catégories : traitement conventionnel et non conventionnel.

2.1. Traitement conventionnel

2.1.1. La chaux

a) Définition

La chaux est un produit généralement poudreux et de couleur blanc, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elles permettent de mettre en œuvre et de compacter les sols mouillés qui, normalement, ne pourraient pas être compactés correctement. L'incorporation de la chaux génère immédiatement la formation d'une masse granuleuse, et a pour effet de réduire le taux d'humidité. Ce procédé convient par exemple pour la réalisation de remblais, de talus ou de voies de circulation sur le chantier. La stabilisation du sol à la chaux trouve son application dans la construction de routes et chemins de toutes natures. Effectuée dans la zone supérieure de la couche de base ou de la sous couche, cette stabilisation à la chaux utilisée comme technique de construction pour protéger les routes contre les actions du gel ou du dégel.

b) Différents types de la chaux

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,
- Chaux magnésienne provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium ;
- Chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux.

Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes elles se présentent sous quatre formes :

- Chaux vive : elle est principalement constituée d'oxyde de calcium CaO ;
- Chaux éteinte (ou hydraté) : elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium $\text{CO}(\text{OH})_2$. Elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive.
- Le lait de chaux.
- La chaux vive lourde.

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 n'est pas efficace pour les sols sableux.
- Il y a un pourcentage limité de la quantité de chaux nécessaire environ 2 à 10% du sol.

2.1.2. Le ciment

a) Définition

C'est un matériau minéral finement moulu qui forme une pâte en présence d'eau. Il fait prise et durcit à la suite de réaction et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le ciment agglomère fortement les matériaux inertes incorporés le mélange.

Le ciment incorporé au sol va se dissoudre et s'hydrater. L'hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres est suivis par une phase de prise. En s'hydratant, les

constituants du liant hydraulique enrobent et relient les grains entre eux : c'est la prise hydraulique.

b) Types de ciment

Les ciments 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. 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.

c) Avantages de la stabilisation de ciment

- Diminuer la plasticité.
- Réduire le potentiel de variation de volume.
- Augmenter la limite de retrait.
- Augmenter la résistance.
- Le coût est relativement faible.
- Ciment du sol réduit les caractéristiques de gonflement du sol.
- Il est très durable.
- Il est largement disponible.

d) Inconvénients de stabilisation ciment

- des fissures peuvent se former dans le ciment du sol.
- il est nocif pour l'environnement.

il nécessite un travail supplémentaire. [17]

2.2. Traitement non conventionnel

2.2.1. Poussière de four à ciment

La poussière de four à ciment est un produit minéral pulvérulent sous forme d'une poudre sèche très fine résultant du processus de production de clinker dans les cimenteries et collectée au niveau des échappement de gaz de four de ciment par des dispositifs de contrôle tels que des cyclones et des filtres électrostatiques, constituée de particules entraînées de clinker, des matières premières partiellement calcinées et de la cendre de carburant enrichie de sulfates d'alcali, d'halides et d'autres volatiles.

Plusieurs études antérieures ont montré que la poussière de four de ciment ajoutée au sol en quantités modestes, a un effet bénéfique sur le comportement du sol et est une matière viable pour la stabilisation de certains types de sol et elle a le potentiel de réduire de façon significative l'indice de plasticité et d'augmenter la résistance du sol en un temps relativement court. Grâce à sa teneur en chaux libre et sa capacité à accroître l'efficacité d'autres stabilisants tels que des cendres volantes, ce produit été largement utilisé comme liant dans le sol pour stabiliser la base ou s'appliquer en base de chaussées. [18]

2.2.2. Dolomie

La dolomite est un minéral constitué d'un carbonate de calcium et de magnésium de formule chimique $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, avec des traces de Fe, Mn, Co, Pb et Zn. Une roche constituée à plus de 50 % de dolomite est une dolomie. Elle est formée par imprégnation des roches calcaïques par des eaux très salines riches en magnésium à l'état naturel. La dolomite est un minéral formant des roches qui se distingue par sa mouillabilité et sa capacité remarquable d'être dispensable ainsi que par son absorption modérée d'huile et de plastifiants. La Dolomite a augmenté la capacité de résistance aux intempéries. La recherche menée par des chercheurs a permis d'apprécier l'effet de la dolomie calcinée à deux température (800 et 1000 °C) et le laitier de haut fourneau sur la résistance mécanique de certain sol, ils ont trouvé que la température de calcination à 800 °C était la plus adéquate pour la stabilisation des sols argileux. [22]

2.2.3. Poudre de marbre

Le marbre est défini comme la roche métamorphique qui s'est entièrement recristallisée et durcie dans des conditions hydrothermales. Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire et constituée principalement de cristaux de calcite. [22]

La poussière de marbre produite par la coupe et le meulage du marbre a une granulométrie très fine, non plastique et presque bien râpée. L'utilisation de techniques traditionnelles pour stabiliser le sol se heurte à des problèmes tels que des coûts élevés et/ou des problèmes environnementaux. L'amélioration du sol par la poussière de marbre est la solution alternative. Le sol stabilisé par la poussière de marbre peut être utilisé dans la construction de revêtements de canaux, de structures de chaussée et de fondations. [21]

2.2.4. La poudre de verre

La poudre de verre est du verre finement broyé. Le type de verre broyé a un impact important sur les propriétés de la poudre de verre. Le verre le plus courant est le verre sodo-calcique, qui est principalement composé de dioxyde de silicium, d'oxydes de sodium, d'oxyde de calcium et d'alumine. D'autres ingrédients peuvent être ajoutés en fonction de l'application à laquelle le verre est destiné.

La poudre de verre est un matériau polyvalent qui est connu pour sa grande résistance à la chaleur et sa forte teneur en silice. La brique réfractaire est une utilisation courante de la poudre de verre de silice qui démontre sa capacité à résister à une chaleur élevée et à conserver sa stabilité. Plusieurs chercheurs ont utilisé les déchets de poudre de verre comme précurseur de géopolymères dans l'amélioration des sols, surtout au cours des dernières années. Des chercheurs ont choisi des pourcentages de 6 %, 12 %, 18 %, 27 % et 36 % en poids pour stabiliser une argile à haute plasticité. Les auteurs ont remarqué un gonflement et une augmentation du poids unitaire sec maximal et une diminution de la teneur optimale en humidité de l'argile à des teneurs en poudre de verre plus élevées. [24]

2.2.5. La pouzzolane

C'est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique. Elle peut être d'origine volcanique : verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites. [25]

On les distingue des basaltes qui ont un aspect massif alors que les matériaux pouzzolaniques sont poreux, leur refroidissement rapide assimilé à une trempe provoque la présence d'une phase amorphe. Les pouzzolanes naturelles sont souvent utilisées dans la fabrication du ciment. L'élaboration de liant hydraulique a base de pouzzolane naturelle combiné avec de la chaux et du gypse est envisageable. Les performances de ce liant ont été testé sur des mortiers et utilisé aussi comme un produit de traitement sur une argile. Les résultats obtenus sont très satisfaisants. [20]

2.2.6. Cendre de grignon d'olive

La cendre de grignon d'olive est un sous-produit résultant de l'extraction de l'huile d'olive. Il est constitué du la chaire et l'amande de noyau de l'olive. Le grignon d'olive est considéré comme un combustible de valeur calorifique moyenne (2950 kcal/kg). Les cendres qui se produisent de cette combustion possèdent une réactivité hydraulique. Un chercheur a trouvé qu'un dosage optimal 2,5% de cendres de déchets d'olive était capable d'augmenter la résistance à la compression d'une argile plastique, et au delà de cette valeur le gonflement devient nul, mais la chute de la densité sèche influe d'une façon négatif sur la résistance à la compression. [2]

2.2.7. Métakaolin

Le kaolin est une roche argileuse blanche, friable, essentiellement composée de kaolinite. Le kaolin se forme par l'altération hydrothermale ou météorique des feldspaths, feldspathoïdes et autres silicates. Cette argile kaolinique est broyée puis calcinée à 750°C, ce qui provoque une désorganisation de la structure cristalline : le produit obtenu est du métakaolin.

Applications : mélangés avec de la chaux ou du ciment le métakaolin est l'élément principal des liants routiers élaborés pour le traitement des sols, les sables stabilisés, le roulement de chaussées routières. Pour les applications béton, il permet d'améliorer les caractéristiques techniques des bétons tout en permettant de générer des économies sensibles dans les secteurs de la préfabrication du béton prêt à l'emploi. [27]

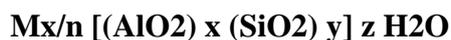
2.2.8. La zéolithe

Les zéolithes sont connues depuis longtemps en tant que minéraux solide microporeux bien cristallisés avec une structure fondée sur une charpente rigide anionique comportant des canaux et des cavités bien définie. Ce sont des minéraux aluminosilicates hydratés de type tectosilicates, contenant des éléments alcalins et alcalino-terreux qui constituent une importante famille de minéraux. Elles se divisent en deux types : naturelles et synthétiques. [29]

a) Composition et structuration

Un cristal de zéolithe est composé d'une charpente tridimensionnelle de tétraèdres (Si, Al) O₄. Les atomes d'oxygènes occupent les sommets des tétraèdres et sont fortement liés à un atome de silicium ou d'aluminium présent au centre des tétraèdres. Ces atomes centraux sont liés à leurs homologues des quatre cages voisines par l'intermédiaire d'un atome d'oxygène qui est donc commun à deux tétraèdres. Un tel arrangement atomique induit la présence de deux types d'espaces dans la structure, les pores et les canaux, dont le diamètre qui est légèrement supérieure pour les premiers par rapport aux seconds, varie communément de 3. Une zéolithe peut être caractérisée par le rapport Si /Al dans sa charpente, ou par sa maille cristalline c'est-à-dire le plus petit groupe d'atomes déterminant toutes les propriétés chimique et physique du cristal. La présence des atomes d'aluminium qui ne peuvent accepter que l'électron donné par trois atomes d'oxygène. [29]

La neutralité électrique est atteinte grâce à l'incorporation dans les cavités de cation appartenant aux groupes des métaux alcalins et alcalino-terreux. Il s'agit principalement du strontium et du baryum. Ces cations compensateurs de charge qui occupent avec des molécules d'eau les pores et les canaux jouent un rôle majeur dans les propriétés des zéolithes dans laquelle la formule chimique d'une maille de zéolithe est la suivante :



Où (M) est le cation compensateur de charge et (n) sa valence. (x)et (y) sont le nombre total de tétraèdres AlO₄ et SiO₄ par maille, et w est le nombre de molécule d'eau par maille.

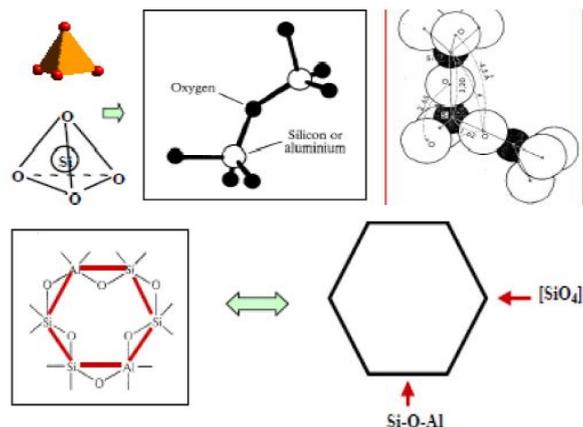


Fig. 20 Enchaînement des tétraèdres SiO₄ et AlO₄

b) Classification des zéolithes selon leur composition chimique

Type de zéolithe	Rapport Si /Al	Exemple
Zéolithes faiblement siliciques	Si /Al=1-1 ,5	A, X ; Sodalité, etc.
Zéolithes moyennement siliciques	Si/ Al=2,0-5,0	Erionte, chabazite, mordenite, X, Y, L, Ω, etc.
Zéolithes fortement siliciques	Si/ Al=5-500	MFI, FER, BEA, etc.
Zéolithes purement siliciques	Si/ Al=∞	Si-MFI (Silicalite-1), Si-MEL (silicalite-2, Si-ZSM-48, Si-UTD, etc.

Tab. 4 Classification des zéolithes selon leurs compositions chimiques

2.2.9. Coquilles d'œufs

La coquille d'œuf est un biominéral naturel composé d'un réseau de fibres protéiques associé à des cristaux de carbonate de calcium (96% du poids de la coquille) de carbonate de magnésium (1%) et de phosphate de calcium (1%), ainsi que les substances organiques et l'eau. Le carbonate de calcium (CaCO₃), le constituant majeur de la coquille, est un cristal amorphe qui se produit naturellement sous forme de calcite (cristal hexagonal). En 2008, la production mondiale d'œufs est près de 62 millions de tonnes, la Chine étant le leader avec 37,6%. La production avicole aussi entraine des déchets de la coquille d'œuf avec des quantités considérables et considérées comme n'ayant aucune valeur économique. La coquille

présente environ 11% du poids total de l'œuf, donc les déchets générés peuvent être estimés à environ 6,82 millions de tonnes par an dans le monde. [31]



Fig. 21 Coquille d'œuf

Les coquilles d'œufs ont largement été utilisées comme catalyseur efficace dans la conversion de l'huile de soja et alcool méthylique dans la production de biodiesel. En analysant différentes conditions de processus, Wei et al (2009) a conclu que CaO était la phase active de la coquille d'œuf dérivée.

L'utilisation de la coquille comme source alternative de CaCO_3 (carbonate de calcium) peuvent réduire l'impact sur les réserves naturelles de calcaire, une source naturelle non renouvelable. Un chercheur a effectué une étude comparative entre l'effet de chaux et la poudre d'œuf sur le gonflement d'une argile, la quantité de chaux était remplacée partiellement par la poudre d'œuf, il a trouvé que la chaux reste la plus efficace mais la poudre a réussi à réduire le gonflement et augmenter la résistance au cisaillement. [20]

3. TECHNIQUES D'EXECUTION

3.1. Technique courante de remblai

La technique courante est quasiment toujours réalisée par traitement en place. Elle consiste à épandre la masse de produit de traitement calculée pour l'épaisseur de sol malaxée prévue. Mélanger le sol avec le produit de traitement le plus souvent à l'aide de charrues (à disques ou à socs) jusqu'à obtention d'une mouture présentant de visu un aspect (teinte et mouture) homogène. Ensuite, suivant les cas, soit on charge et transporte le mélange à son lieu de mise en œuvre (traitement au déblai), soit on le compacte directement après malaxage (traitement au remblai).

3.1.1. Technique dépôt - reprise en remblai

Cette technique permet de mélanger des sols comportant des éléments blocailleux de $D_{\max} > 250$ à 350 mm. Elle est réservée quasi exclusivement au traitement à la chaux car incompatible avec le phénomène de prise hydraulique (rapide). Elle s'exécute de la manière suivante :

La quantité de produit de traitement correspondant au dosage choisi, calculée pour l'épaisseur de la couche qu'il est prévu d'extraire, est épandue sur le sol. L'ensemble matériau + produit

de traitement est chargé, transporté puis mis en dépôt Provisoire. Celui-ci est profilé et légèrement compacté pour minimiser les entrées d'eaux pluviales. Au moment choisi (qui peut être plusieurs jours, semaines, voire plusieurs mois plus tard), le dépôt est repris, en extraction frontale, pour réaliser le remblai.

Cette technique améliore à la fois l'homogénéité du sol du déblai et la qualité du mélange sans utiliser de matériel de malaxage spécifique. Elle présente toutefois l'inconvénient d'être propice aux émissions de poussières de produit de traitement durant les opérations d'épandage et de chargement.

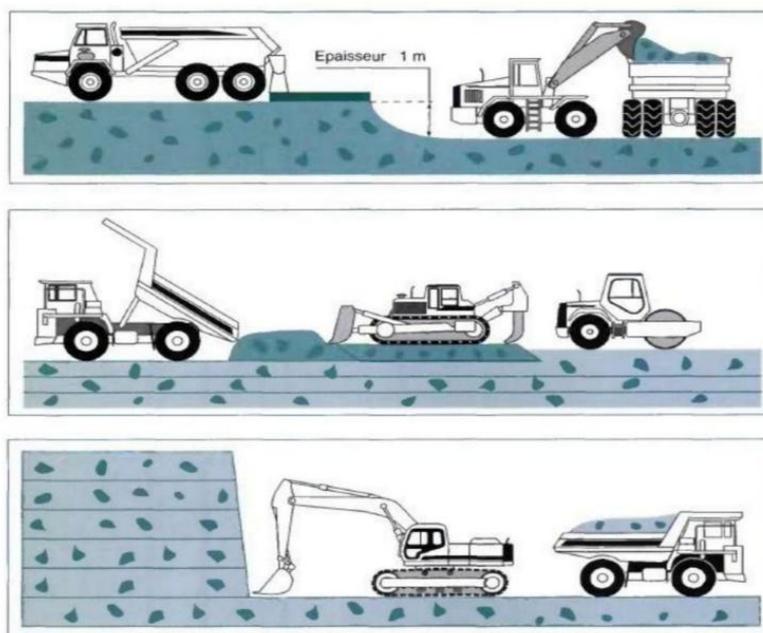


Fig. 22 Schéma de la réalisation du mélange par la technique dite du dépôt-reprise

3.2. Technique de traitement en couche de forme

La réalisation des couches de forme en sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques requiert l'exécution de différentes opérations élémentaires qui doivent être exécutées selon un ordonnancement précis et, pour certaines d'entre elles, en un temps n'excédant pas le délai de maniabilité du mélange.

Une certaine partie seulement de ces opérations élémentaires est à exécuter dans tous les cas de chantier ce sont :

La préparation initiale du sol

Elle a pour objet l'homogénéisation des caractéristiques de nature et d'état hydrique du sol pour les mettre en concordance avec les valeurs considérées dans l'étude du matériau traité. Les techniques et le coût de cette opération sont souvent difficiles à définir avec précision au stade de l'étude du projet.

a) La fabrication du mélange

Dans le cas de la fabrication en place, cette opération comprend :

- L'épandage du produit de traitement.
- Le malaxage de ce produit avec le sol.
- L'ajustement de l'état hydrique du mélange, le cas échéant.

Le mélange ne peut être fabriqué dans une centrale que pour des sols dont l'écoulement dans les organes de dosage se fait correctement. Ce qui n'est possible qu'avec des sols non argileux ou des sols moyennement argileux prétraités à la chaux.

En centrale, la formulation, le malaxage et l'épaisseur sont beaucoup mieux maîtrisés. Mais le transport des matériaux engendre une augmentation du trafic poids lourd sur la voirie locale. Elle est donc plutôt réservée aux grands chantiers ou la mise en place d'une centrale mobile. Peut de faire sur le site même.

Le traitement en place peut poser des problèmes environnementaux mais reste d'un coût souvent inférieur au traitement en centrale. Il est aussi plus souple d'utilisation.

b) Le réglage

Pour garantir la conformité de l'épaisseur de la couche traitée à la valeur prise en compte dans le dimensionnement de la structure, il est impératif que le réglage soit obtenu par rabotage. Sur toute la surface de la couche, d'une certaine épaisseur de sol traité ceci nécessite d'exécuter le réglage en deux séquences : pré-réglage à une cote sauvegardant après

Compaction, une certaine surépaisseur qui est éliminée lors du réglage final.

c) Le compactage

Il a pour objet l'obtention de valeurs de compacité, notamment en fond de couche, conformes à celles prises en compte dans l'étude du dimensionnement de la structure. Il doit se faire également en deux séquences (compactage partiel et compactage final) séparées par l'opération de réglage final.

d) La protection superficielle

Elle a pour objet de maîtriser l'évaporation du sol traité et/ou de le protéger de l'imbibition durant la prise hydraulique. Elle a également souvent un rôle de protection vis-à-vis des émissions de poussières et des agressions du trafic de chantier pour les sols fins un cloutage est recommandé. [40]

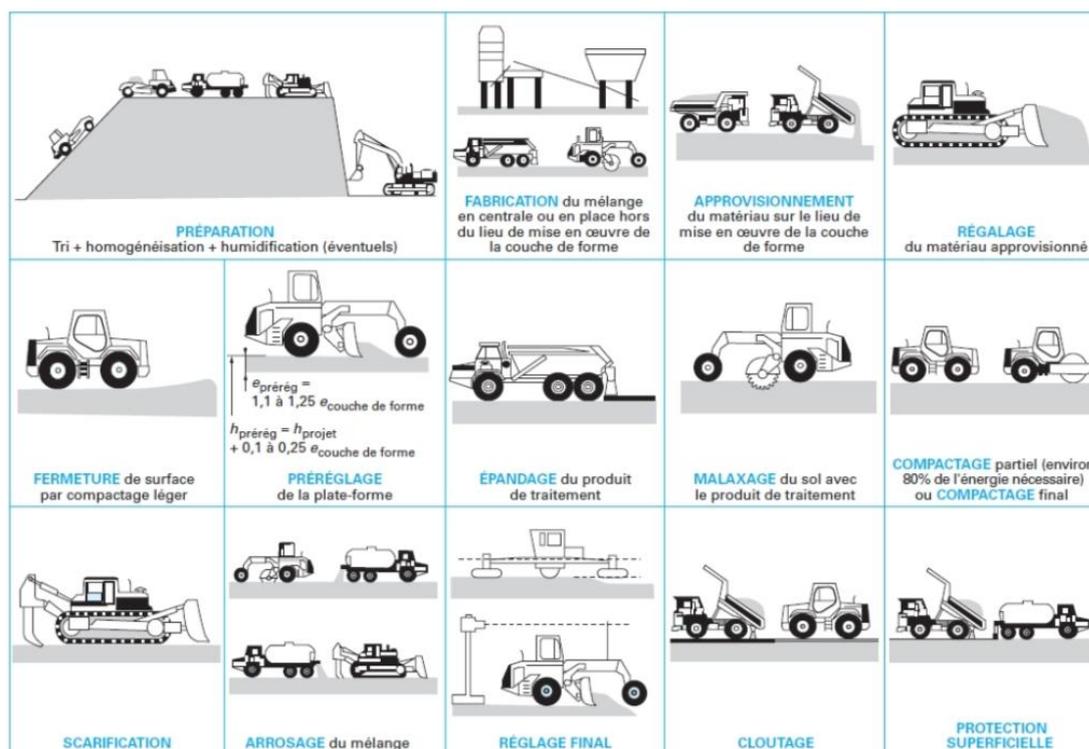


Fig. 23 Opération élémentaires de mise en œuvre d'une couche de forme traitée

4. TECHNIQUE DE RENFORCEMENT DES OUVRAGES GEOTECHNIQUES

4.1. Colonnes ballastées

Cette technique consiste en la réalisation de colonnes en gravier ou ballast avec un vibreur pour renforcer tous les sols dans la zone de traitement et densifier les sols granulaires environnants. C'est une technique développée par Johann Keller.

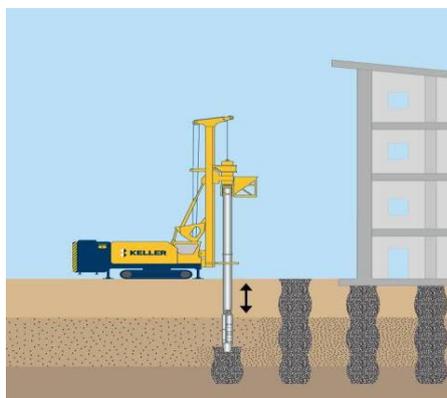


Fig. 24 Colonnes ballastées

4.1.1. Utilisations

- Réduction des tassements
- Augmenter la capacité portante
- Augmenter la rigidité du massif de sol
- Augmenter la résistance au cisaillement
- Assurer la stabilisation des talus
- Traiter le potentiel de liquéfaction

4.1.2. Avantages

- Une méthode polyvalente d'amélioration du sol qui peut être adaptée à une grande variété de conditions de sol et de fondations
- Offre une solution économique pour le renforcement de sols
- Peut être réalisé sur des profondeurs importantes
- Exécution rapide permettant la réalisation des fondations immédiatement après exécution des travaux
- Le renforcement des sols permet la réalisation de fondations superficielles
- Respectueux de l'environnement car il utilise des matériaux naturels sans liants
- Chantier propre occasionnant peu de déblais. [43]

4.2. Inclusion rigide

L'inclusion rigide est un procédé de renforcement de sol utilisant une inclusion en béton ou en mortier réalisée dans tout type de terrain, y compris dans les sols très compressibles et organiques, pour réduire les tassements et augmenter la capacité portante.

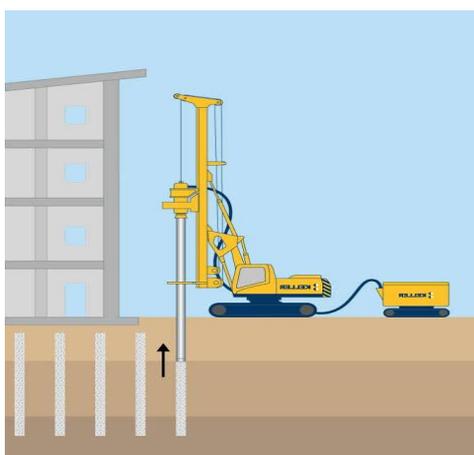


Fig. 25 Inclusion rigide

4.2.1. Utilisations

- Immeubles à usage industriel et commercial

- Remblais pour les routes et les voies ferrées
- Réservoirs de stockage et silos
- Bâtiments résidentiels
- Entrepôts
- Bâtiments publics
- Planchers industriels

4.2.2. Avantages

- Permet d'envisager des fondations superficielles en présence de sols très compressibles et organiques
- Augmente la capacité portante des sols et peut reprendre des charges élevées
- Réduit les tassements de manière très efficace (avec un facteur de réduction de l'ordre de trois à plus de huit)
- Peut être utilisé dans tous les secteurs de la construction et pour tous types de structures et de sols
- Les travaux de construction peuvent, dans la plupart des cas, commencer immédiatement après l'amélioration du sol

4.3. Tirant d'ancrage

Un tirant d'ancrage est un dispositif capable de transmettre les forces de traction qui lui sont appliquées à une couche de terrain résistante.

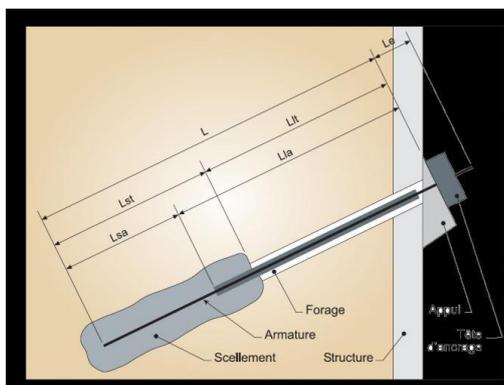


Fig. 26 Tirant d'ancrage

Il est composé :

- D'une tête d'ancrage qui transmet les forces de traction de l'armature à la structure à ancrer par l'intermédiaire d'une plaque d'appui.
- D'une partie libre qui est la longueur d'armature comprise entre la tête d'ancrage et le début du scellement
- D'une partie scellée qui est la longueur d'armature sur laquelle la force de traction est transmise au terrain environnant par l'intermédiaire d'un coulis de scellement.

Les tirants d'ancrage sont utilisés pour des efforts de traction. Ils transmettent les forces d'une structure (mur, fondation,...) au terrain dans lequel ils sont scellés. Ils sont généralement précontraints. Les ancrages sont utilisés dans tous les domaines de la construction :

- Excavation

L'ancrage assure la stabilité du sol et autorise la réalisation de fouilles profondes et larges. Il est souvent temporaire, car la stabilité du terrain est assurée à long terme par le bâtiment construit dans la fouille (parkings, sous-sols,...)

- Confortement de talus

L'installation d'ancrages inclinés évite les glissements de terrain et améliore la résistance du sol.

- Barrages

Les ancrages verticaux, généralement précontraints, améliorent la résistance au basculement des barrages et limitent les infiltrations d'eau au droit du contact avec la roche.

- Murs de quais

Les tirants portuaires assurent la stabilité d'un mur de quai en reportant les efforts sur un rideau arrière. Ce principe est également appliqué à des remblais soutenus par des murs préfabriqués (rampes d'accès,...)

- Souterrains

Les techniques d'ancrage consolident le soutènement des galeries par équilibrage des forces du terrain. On retrouve ce type d'utilisation dans les mines et les tunnels.

- Ancrages de structures

Les ancrages verticaux assurent une liaison efficace de la fondation avec le terrain, et limitent les effets de fatigue lorsqu'ils sont précontraints. Ces ancrages sont applicables aux pylônes, antennes de télécommunication, éoliennes,...

- Fondations

Les ancrages permettent la réalisation de constructions sur des terrains ayant de faibles capacités portantes, ou instables. Les descentes de charge de la construction sont transmises aux zones stables en profondeur.

- Charges de soulèvement hydrostatiques

Des ancrages, protégés contre la corrosion, sont employés pour maintenir en place des structures soumises à de fortes sous-pression d'eau et autorisent ainsi la construction d'ouvrages dans les zones humides, en compensant la poussée d'Archimède. [41]

4.4. Clouage du sol

Le clouage est une technique de renforcement des sols en place, destinée à améliorer la stabilité de pentes naturelles ou artificielles, et consistant à introduire dans le terrain des inclusions (appelées aussi clous ou armatures), rigides et passives, qui ont pour effet de limiter les déformations du sol. Dans un massif renforcé, on qualifie d'active la zone qui se déforme et de résistante, la partie rigide. Les mouvements du sol peuvent être très faibles ou plus étendus, la zone active peut rester stable ou, au contraire, s'effondrer suivant la nature et la qualité du renforcement. Les inclusions sont mises en place de manière à ce que leurs extrémités soient ancrées (par frottement) dans la zone résistante. Elles sont ainsi capables de reprendre les efforts moteurs dus au poids de la zone active. La surface qui sépare les deux parties est la surface de rupture potentielle. Les termes cloutage ou boutonnage sont parfois utilisés pour désigner cette technique bien que clouage soit maintenant consacré par l'usage. Notons à ce sujet que le boulonnage désigne la technique similaire employée dans les roches et en travaux souterrains, et que clouter signifie garnir de clous, ce qui n'est pas le but de la méthode étudiée. [42]



Fig. 27 Clouage du sol

4.5. Les géo synthétiques

Un géosynthétique est un produit, dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique (polyéthylène, polyamide, polyester ou polypropylène) ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle, utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil.

Il existe deux grandes familles de géo synthétiques :

- Les géotextiles et produits apparentés aux géotextiles qui sont des produits perméables.
- Les géo membranes et produits apparentés aux géo membranes qui sont essentiellement imperméables.

Les produits issus de la combinaison de manière industrielle de deux ou plusieurs géosynthétiques sont dits géocomposites. Ils remplissent plusieurs fonctions dans l'ouvrage.

Les principales fonctions et applications des géosynthétiques sont :

- La séparation

Pour la prévention du mélange de deux sols ou de matériaux de remblai adjacents de nature différente. Applications : routes et autoroutes, voies ferrées, pistes forestières...

- La filtration

Maintien du sol ou d'autres particules soumis(es) à des forces hydrodynamiques tout en permettant le passage de fluides à travers ou dans un géotextile ou un produit apparenté aux géotextiles. Applications : routes, voies ferrées, barrages, tranchées drainantes, protection de rivages et de berges...

- Le drainage

Collecte et transport des eaux, souterraines et/ou d'autres fluides dans le plan d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles. Applications : drainage sous dallage, drainage sous remblai, drainage, ...

- Le renforcement

Utilisation du comportement en résistance déformation d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles, afin d'améliorer les propriétés mécaniques du sol ou d'autres matériaux de construction. Applications : remblai sur sols compressibles, murs de soutènement, raidissement de talus, ...

- L'étanchéité

L'utilisation d'un géo synthétique afin de prévenir ou de limiter la migration de fluides. Applications : Bassins, ouvrages souterrains, ...

- La protection

Prévention ou limitation des endommagements localisés d'un élément ou d'un matériau donné en utilisant un géotextile ou un produit apparenté aux géotextiles. Applications : protection des géomembranes dans les divers applications,

La lutte contre l'érosion de surface : utilisation d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles, afin d'éviter ou de limiter les mouvements du sol ou d'autres particules à la surface. Applications : talus de déblai ; pente naturelles, ...

- L'anti-fissuration

Utilisation d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles pour retarder les remontées de fissures en surface. Applications : chaussées, aéroports...

4.6. La terre armée

Cette technique consiste en l'association d'un matériau granulaire frottant et d'armatures linéaires flexibles de grande résistance à la traction. Le parement extérieur de l'ouvrage est relativement mince et souple; il est généralement constitué de panneaux en béton. Pour limiter la déformation de la structure on utilise des armatures en acier, relativement inextensibles vis-à-vis du sol de remblai et qui sont galvanisées pour empêcher la corrosion.

Le concept de la terre armée basé sur le frottement d'interaction sol-renforcement y est bien représenté. Les déplacements sont mesurés dans la direction des armatures. Le mécanisme d'interaction est le résultat des contraintes tangentielles exercées par le remblai à l'interface du renforcement.

le concept de base du matériau de la terre armée. Ce matériau résulte de l'association de deux composants de modules d'élasticité différents. Une contrainte ou pression appliquée à la masse provoque une déformation du sol. L'effort de tension ainsi subi sera alors transmis du sol aux armatures de renforcement.

5. CONCLUSION

Les techniques d'amélioration de sols sont très diverses. L'application d'une de ces méthodes nécessite une bonne connaissance du sol à traité (granulométrie, composition, teneur en eau). Il existe un grand nombre de procédés différents, le but est de trouver la solution la plus efficace et la plus économique. Les traitements peuvent avoir un caractère définitif ou provisoire pendant la phase chantier.

***CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE DE
TRAITEMENT DE LA MARNE***

CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE DE TRAITEMENT DE LA MARNE

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats du travail que nous avons effectué en laboratoire. Notre travail consiste d'abord à effectuer des essais d'identification, ces essais nous ont permis de classer notre sol. Ensuite, nous étudions le comportement mécanique et géotechnique de la marne de Mila traitée avec le mélange de la coquille d'œuf et la zéolite. Dans un premier temps nous présentons la localisation de notre prélèvement. Ensuite nous présentons les caractéristiques géotechniques de la marne. Enfin, les résultats des essais de compression non confinée et les essais de cisaillement rectiligne sont présentés.

2. LOCALISATION DU PRELEVEMENT

Le sol utilisé dans cette étude expérimentale est une marne argileuse provenant de la Wilaya de Mila plus exactement vers la zone de Sidi Marouane.

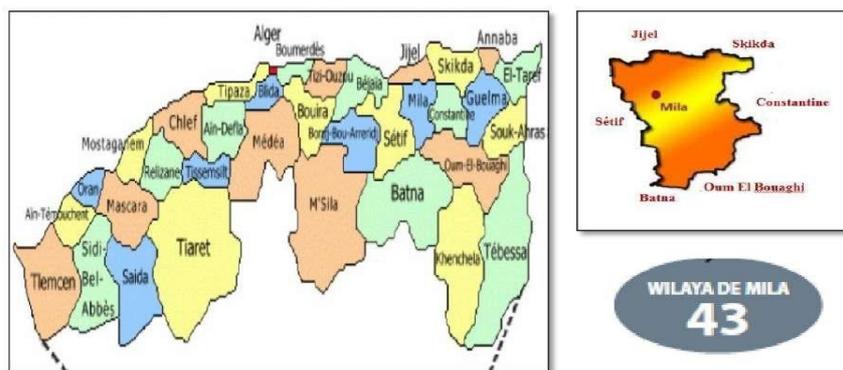


Fig. 28 Situation géographique du prélèvement du sol

L'aspect visuel de la marne est de couleur marron. Le prélèvement a été effectué sur un chantier de réalisation de conduite de transport d'eau.



Fig. 29 : Zone de prélèvement de la marne

Il y a un aspect orographique important dans cette région de prélèvement. En effet, le relief est très accidenté montrant des contrastes topographiques remarquables, avec massif très important caractérisant toutes les pentes dont la variabilité est de 35 à 60%. La région de collines rougeâtres là où les altitudes s'élèvent vers le nord jusqu'à la grande cuesta de Kolliz rebord septentrional de la cuvette. Cette dernière est taillée en falaise dans les calcaires lacustres qui domine la grande dépression de Redjas, et est creusée dans les marnes de la partie inférieure de la série tertiaire continentale et est drainée par l'Oued Maleh, l'Oued Bousslah et l'Oued Endja rejoignent le Rhuumel à l'aval de Constantine.

3. CARACTERISATION DE LA MARNE

3.1. Identification du sol

3.1.1. Teneur en eau naturelle (NF P 94 050)

La détermination la teneur en eau pondérale des matériaux consiste à calculer le rapport du poids d'eau que le sol contient au poids de ses éléments secs, après dessiccation à l'étuve à 105° C (50° C dans le cas des sols contenant des éléments organique). Nous avons besoin de l'appareillage suivant :

- Une tare.
- Etuve (50° C, 105°C).
- Balance.



Fig. 30 Détermination la teneur en eau naturelle

L'échantillon de matériau humide est pesé puis placé dans l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (correspondant alors à la masse du matériau sec). [39]

- **Présentation des résultats**

La masse humide =255g

La masse sèche =215g

donc :

$$w = (255 - 215) / 215$$

$$w = 18.60\%$$

3.1.2. Analyse granulométrique par tamisage et sédimentation

a) Par tamisage humide (NFP 94-056)

L'essai consiste à séparer par lavage les grains d'un matériau puis à les fractionner au moyen d'une série de tamis et à peser après séchage le refus de chaque tamis.

Matériels nécessaires

- Une tamiseuse.
- Une série de tamis conformes.
- Une main écope pour le remplissage.
- Une balance.

Mode opératoire

- Procéder à une prise d'essai conformément à la formule :

$$200 * D_{\max} < \text{Prise} < 600 * D_{\max}$$

- Peser l'échantillon dans un récipient.
- Sécher l'échantillon dans une étuve jusqu'à 24h
- Tamiser l'échantillon.
- Peser le refus de chaque tamis dans une balance de portée pesant au g près et compatible avec les masses à peser ;
- Rapporter les poids des différents refus au poids initiaux de matériau.
- Calculer les pourcentages des tamisas.
- Etablir la courbe granulométrique.

Les paramètres de la courbe granulométrique sont :

Coefficient d'uniformité : $C_u = d_{60} / d_{10}$

Coefficient de courbure : $C_c = (d_{30})^2 / (d_{60} * d_{10})$

d_{10} , d_{30} , d_{60} : dimensions des particules correspond à 10%, 30% et 60% des passants respectivement.



Fig. 31 Essai granulométrique par tamisage (voie humide)

Présentation des résultats

D (mm)	0.08	0.1	0.12 5	0.25	0.5	0.8	1	2	3.15	4	5	6.3
Passant (%)	82.9	85.8	89.9	95.8	98.3	98.7	99.9	99.2	99.5	99.6	99.7	100

Tab. 5 Analyse granulométrique par tamisage de la marne

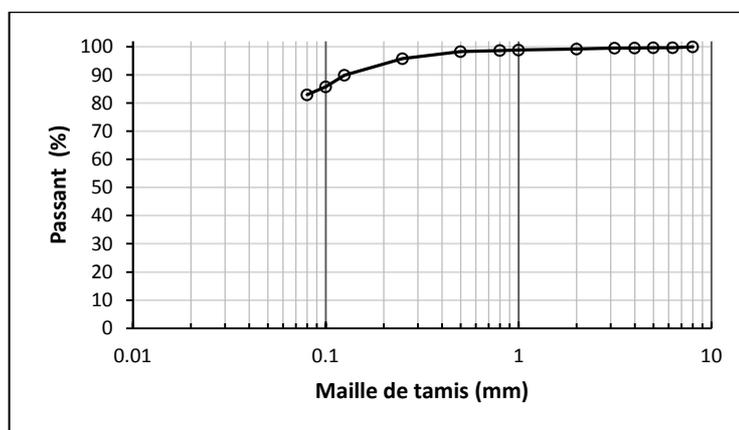


Fig. 32 Courbe granulométrique de la marne de Mila

La courbe granulométrique par tamisage montre que plus de 80% des passants ont un diamètre inférieur à 0,08 mm. 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.

b) Par sédimentation (NF P 94 – 057)

C'est la détermination de la distribution pondérale de la taille des particules de sols de dimension inférieure à 0.08 mm. C'est un essai complémentaire à l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol et qui peut être nécessaire à sa description et à sa classification.

Mode opératoire

- Récupérer le tamisât de la marne (passant au tamis 0.08 mm)
- Sécher l'échantillon dans une étuve
- Pilonner l'échantillon, et le tamiser au 0.08mm, puis prendre 40g
- Imbiber la prise d'essai dans une éprouvette cylindrique en verre de 2 litre contenant un mélange d'eau distillée ou déminéralisée et une solution à 5% d'hexamétaphosphate de sodium
- Laisser imbiber pendant au moins 15 heures à température ambiante.
- Agiter vigoureusement la suspension au moyen d'un agitateur manuel
- Retirer l'agitateur manuel et déclencher au même instant le chronomètre (début de l'essai) ;
- Plonger le thermomètre et le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre
- Procéder à la prise des lecteurs du densimètre et de la température aux temps suivant (en minutes) : 0.5-1-2-5-10-20-80-240-1440
- Calculer le pourcentage des tamisas et complète la courbe granulométrique. [39]



Fig. 33 Essai de granulométrie par sédimentation

Présentation des résultats

temps (min)	R	T°C	CD+CM+CT	Rc	Passant (%)	Passant total (%)	L	D (mm)
0	-	-	-	-	-	82.94		0.08
0.5	22.5	11	-0.1800	22.32	70.90	81.70	10.35	0.062
1	21.5	11.5	-0.1800	21.32	67.72	78.04	10.6	0.044
2	20.8	12	-0.1800	20.62	65.50	75.48	10.76	0.032
5	20	12	-0.1800	19.82	62.96	72.55	11	0.020
10	18.5	12.5	-0.1800	18.32	58.19	67.06	11.4	0.015
20	17	12.5	-0.1800	16.82	53.43	61.57	11.8	0.010
40	16.5	12.5	-0.1800	16.32	51.84	59.74	11.95	0.007
80	12.5	12.5	-0.1800	12.32	39.13	45.10	13	0.005
240	3.5	13.1	-0.1800	3.32	10.55	12.15	15.35	0.003
1440	0.7	14.5	-0.1800	0.52	1.65	1.90	16.09	0.001

Tab. 6 Résultat de l'essai granulométrie par sédimentation

La courbe granulométrique totale par tamisage et par sédimentation est représentée dans la figure ci-dessous.

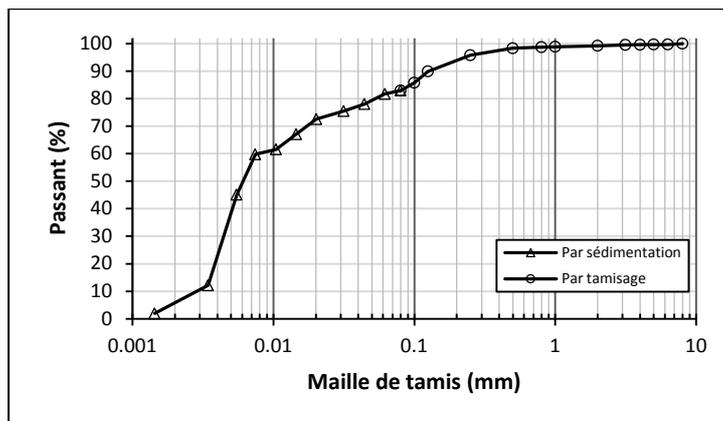


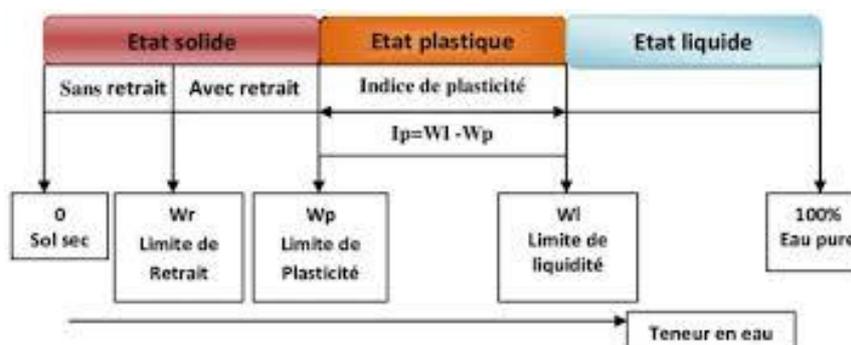
Fig. 34 Courbe granulométrique par tamisage et sédimentation de la marne

Désignation	D_{max} (mm)	% Fraction fine (0.08 mm)	d_{10} (mm)	d_{30} (mm)	d_{60} (mm)	Cu	Cc
Valeurs	6.3 mm	82.94	0.003	0.0045	0.0075	2.5	0.9

Tab. 7 Paramètres de la courbe granulométrique de la marne

3.1.3. Les limites d'Atterberg (NF P 94 – 051)

Les limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) sont les teneurs en eau pondérales correspondant à des états particulières d'un sol.



- Limite de plasticité (W_P) : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.
- Limite de liquidité (W_L) : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide est plastique.
- Indice de plasticité (I_P) : différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique ($I_P = W_L - W_P$).

a) *Limite de liquidité*

Mode opératoire

- Après imbiber l'échantillon dans un récipient, tamiser l'échantillon au tamis de 0.40 mm (passant 0.40 mm) par siphonage, et récupérer le tamisât.
- Sécher le matériau dans une étuve réglée à 105 c°.
- Placer l'échantillon de marne dans la coupelle et tracer un sillon avec l'outil à rainurer. Par convention, la limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond à fermeture de 1 cm des lèvres de la rainure après 25 chocs.
- Prélever à l'aide d'une spatule deux échantillons des levers de la rainure dans des godets qu'on pèse puis le porter à l'étuve.
- Calculer la limite de liquidité. [20]



Fig. 35 Essai de détermination de la limite de liquidité par la coupelle de Casagrande

Présentation des résultats

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

Nombre de coup	Poids humide (g)	Poids sec (g)	Poids tare (g)	W (%)
20	39,6	33,4	18,4	41,3%
24	32,6	27,3	14,4	41,1%
29	36,8	30,7	14,8	38,4%
31	34,8	30	17,7	39,0%

Tab. 8 Résultats de la limite de liquidité

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

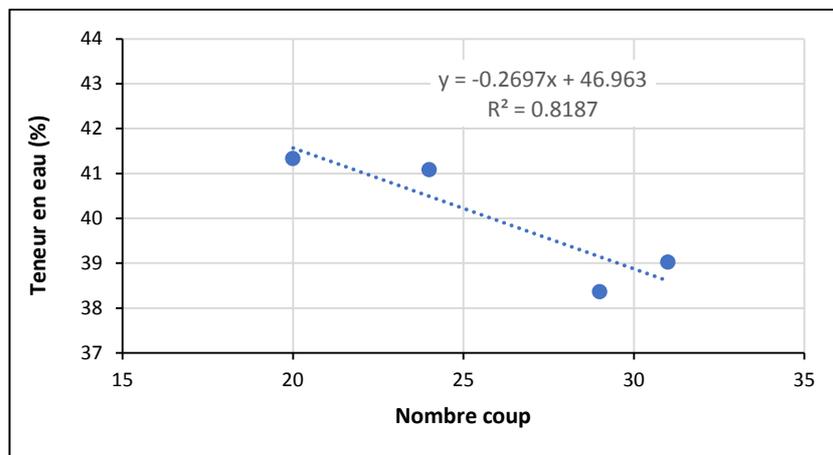


Fig. 36 Détermination de la limite de liquidité

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

$$W_L = 40,21 \%$$

b) Limite de plasticité

A partir d'une boulette, on roule à la main sur un plan, un rouleau aminci jusqu' à 3 mm de diamètre sur une longueur de 10 à 15 cm. La limite de plasticité est atteinte lorsque le rouleau soulevé par le milieu de 1 à 2 cm se fissure.

- Prélever les échantillons qu'on pèse puis on les porte à l'étuve
- Peser l'échantillon après séchage
- Déterminer la limite de plasticité
- Calculer l'indice de plasticité [20]



Fig. 37 Détermination de la limite de plasticité

Présentation des résultats

N° essai	Poids humide (g)	Poids sec (g)	Poids tare (g)	W (%)
1	4,3	3,6	0	19,44%
2	4,1	3,4	0	20,59%
3	4,5	3,9	0	15,38%
4	4,1	3,5	0	17,14%
5	2,8	2,4	0	16,67%
6	2,5	2,2	0	13,64%
W_P (%)				17,14

Tab. 9 Résultats de la détermination de la limite de plasticité

Enfin, le calcul de l'indice de plasticité nous donne : $I_p = 40.2 - 17.14 = 23.07\%$

3.1.4. Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068)

L'essai au bleu de méthylène permet la détermination de l'activité et de la quantité de la fraction argileuse d'un échantillon.

Mode Opératoire

- Additions successives de bleu à grands pas (5cm³) suivies immédiatement du test de la tache
- Additions successives de bleu à pas fins (2cm³) suivies toujours immédiatement du test de la tache
- Fin de dosage : répétition de minute en minute du test de la tâche qui doit rester positif pendant 5 min consécutives.



Fig. 38 Essai au bleu de méthylène

Lorsque les valeurs au bleu sont importantes il est intéressant de compléter la caractérisation du sol avec la mesure d'indice de plasticité (I_p) qui s'adresse préférentiellement aux sols fins. Cet indice correspond à l'écart de teneur en eau entre celle de la limite supérieure de l'état solide (W_p) et celle de la limite inférieure de l'état liquide W_L . [39]

Présentation des résultats

Poids sol (g)	30
Fraction 0/5mm	100%
Volume bleu (ml)	90
Masse bleu (g)	0,9
C	1,00
VBS	3,00

Tab. 10 Résultat de l'essai VBS

3.1.5. 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.

Systèmes de classification	Classes
<p><u>GTR</u></p> <p>$D_{max} = 6.3\text{mm} < 50\text{mm}$</p> <p>% fine ($<0.08\text{ mm}$) = 82.94% $> 35\%$</p> <p>$I_p = 23,07 > 12 < 25$</p> <p>$VBS = 3 > 2;5 < 6$</p>	<p>Sol de classe A2</p> <p>Marne peu plastique</p>
<p><u>USCS</u></p> <p>% fine ($<0.08\text{ mm}$) = 82.94% $> 50\%$ sol fin</p> <p>$I_p = 23,07$ et $WL = 40,21\%$ $< 50\%$ → au-dessus de la ligne A</p>	<p>Sol de classe Ap</p> <p>Argile peu plastique</p>

Tab. 11 Classifications de la marne de Mila

3.2. Essai Proctor et CBR

a) Proctor Normal

Le but de l'essai est de déterminer les conditions optimales de compactage d'un sol pour obtenir le meilleur compactage, la meilleure cohésion et la meilleure stabilité à une énergie de résistance normalisée. [20]

Mode opératoire

- Tamiser le matériau au tamis 20mm.
- Prendre 5,5Kg de notre matériau.
- Ajouter pour chacun une quantité d'eau pour avoir le teneur en eau visée.
- Utilisez la dame pour 56 coups pour chaque couche.
- Compacter le sol en 3 couches pour avoir la dernière débordant légèrement le haut de moule.
- Peser le moule avec le sol.
- On prend de chaque cotés (au-dessus et au-dessous) de ce moule une quantité pour la détermination de la teneur en eau réelle.
- Répéter l'essai pour des teneurs en eau croissante.
- Mettre les tares dans l'étuve de 105°C pendant 24 heures.
- Détermine la teneur en eau du matériau, ce qui permet de calculer le poids volumique sec.
- Le résultat de l'essai se traduit par un point de la courbe.
- Après ces calculs on passe à la construction de la courbe représentative de la variation du poids volumique sèche γ_d en fonction de la teneur en eau $f(w) = \gamma_d$ et on tire γ_{dmax} et ω_{OPN} .



Fig. 39 Essai Proctor normal

Présentation des résultats

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

N° Essai	W (%)	Masse (sol+moule)	Mh (kg)	Ms (kg)	γ_d (t/m ³)
1	8,0	8,92	4,595	4,255	1,90
2	12,0	9,16	4,835	4,317	1,92
3	15,0	9,315	4,99	4,339	1,93
4	18,0	9,38	5,055	4,284	1,91
5	21,0	9,39	5,065	4,186	1,87
6	24,0	9,285	4,96	4,000	1,78

Tab. 12 Résultats de l'essai Proctor normal

A partir des valeurs du tableau, nous avons tracé la courbe Proctor (figure ci-après).

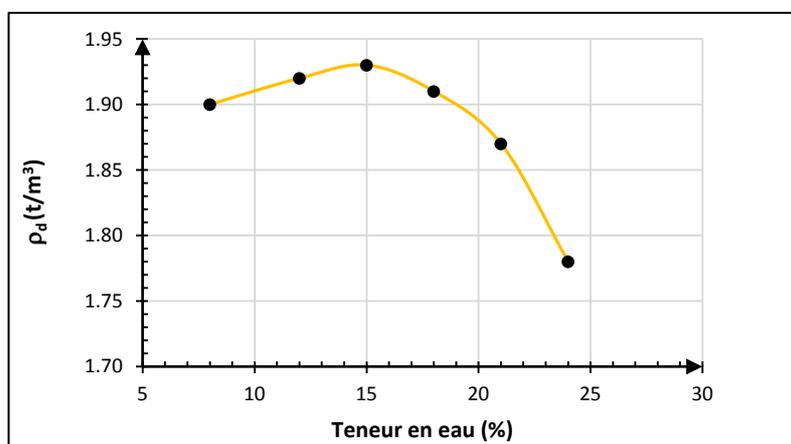


Fig. 40 Courbe Proctor de la marne

Les paramètres de la courbe Proctor sont résumés dans le tableau suivant :

W_{OPN}	15%
$\gamma_{d \max}$	1,93 t/m³

Tab. 13 Paramètres de la courbe Proctor

b) Essai CBR (NF P 94-078)

L'indice Portant Immédiat IPI a été déterminé par l'essai CBR immédiatement après le compactage. Il consiste à déterminer la résistance au poinçonnement d'un matériau. Cet indice est une grandeur utilisée pour évaluer l'aptitude d'un sol ou d'un matériau élaboré à supporter directement sur sa surface la circulation des engins de chantier.

Mode opératoire

Il convient tout d'abord de choisir les différents ensembles de conditions d'état du sol (Masse volumique sèche, teneur en eau, état de saturation) pour lesquels on veut réaliser l'essai. Lorsque la dimension maximale des éléments du sol à étudier est inférieure à 20 mm, l'intégralité du sol est soumise à l'eau.

Placer l'ensemble (plaque de base, moule, éprouvette) sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et procéder au poinçonnement de manière suivant :

- Approcher, la surface supérieure de la l'éprouvette vers le piston, jusqu'à ce que le piston vienne affleurer le matériau ;
- Régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur, mesurent l'enfoncement du poinçon ;
- Exécuter le poinçonnement en maintenant la vitesse de pénétration à 1.27 mm/min ;
- Enregistrer les lecteurs obtenus du poinçonnement. [39]

Présentation des résultats

Les données de l'essai IPI sont résumés dans le tableau suivant :

Pénétration (mm)	8%	12%	15%	18%	21%	24%
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.625	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.25	2.19	1.44	1.29	0.49	0.21	0.15
2	2.80	1.88	1.62	0.75	0.31	0.21
2.5	3.09	2.06	1.83	0.85	0.41	0.22
5	3.89	2.50	2.27	1.26	0.64	0.26
7.5	4.48	2.99	2.81	1.42	0.72	0.31
10	5.04	3.40	3.22	1.54	0.82	0.33

Tab. 14 Données de poinçonnement du sol par l'essai IPI

Nous avons ensuite tracé les courbes force – pénétration pour déterminer l'indice IPI pour chaque teneur en eau. Les courbes sont présentées dans la figure suivante.

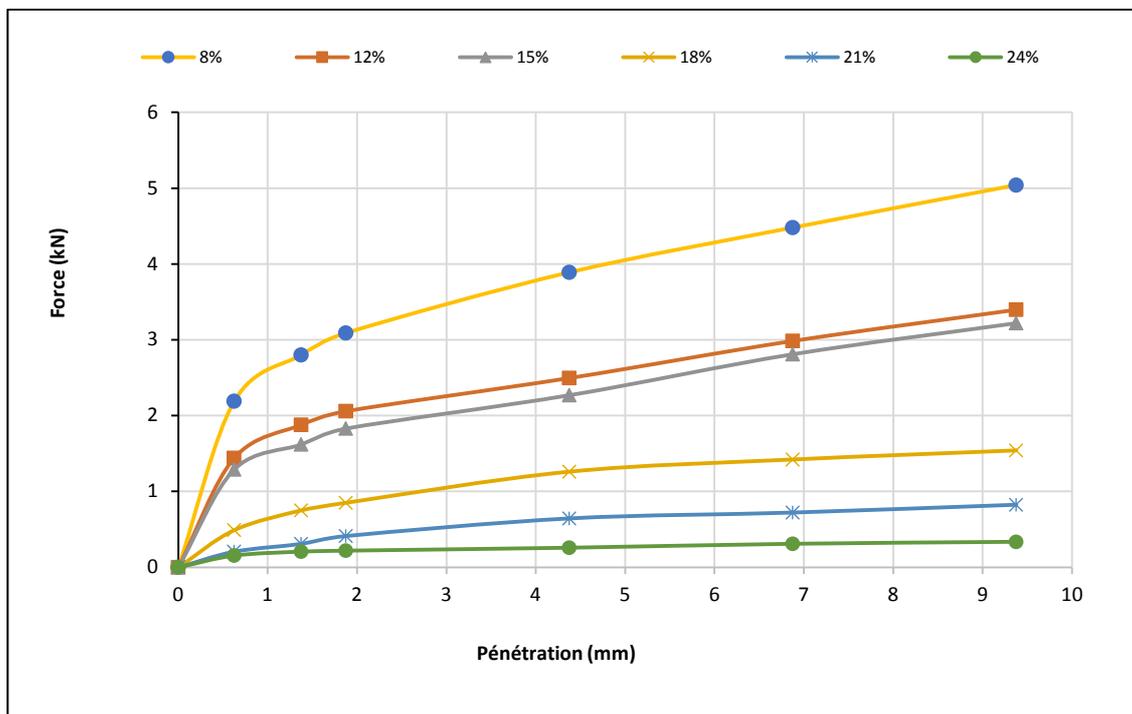


Fig. 41 Courbe force – pénétration de l'essai IPI

Les valeurs de l'indice IPI pour chaque teneur en eau sont présentées dans le tableau et la figure ci-après.

On remarque qu'il y a une diminution constante de l'indice portant immédiat en fonction de l'augmentation de la teneur en eau.

w (%)	8	12	15	18	21	24
IPI	24.52	16.18	14.47	7.03	3.45	1.71

Tab. 15 Valeurs de l'IPI en fonction de la teneur en eau

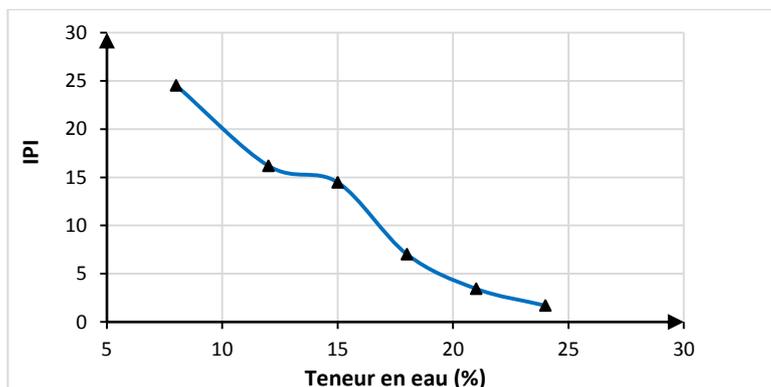


Fig. 42 Évolution de l'IPI en fonction de la teneur en eau

3. PRODUITS DE TRAITEMENT UTILISES

3.1. Zéolite

La zéolite utilisée dans ce travail est originaire de la Wilaya de Bejaia. Un broyage a été réalisé avec la machine Los Angeles en soumettant le matériau aux chocs de boulets. Par la suite, le matériau ainsi obtenu est tamisé à 80 μ m.



Fig. 43 Zéolite avant et après broyage

3.2. Coquille d'œufs calcinée

Après le lavage et le séchage de la coquille d'œuf, une calcination dans un four à 900 °C pendant 2h a été réalisée. Par la suite, un broyage a été réalisé avec une machine Mico Deval jusqu'à obtention d'une poudre fine.



Fig. 44 Coquille d'œuf avant et après calcination et après broyage

4. CHOIX DES MELANGES ET DOSAGES

Nous avons opté pour trois types de mélanges à savoir :

- Mélange 1 : Marne naturelle
- Mélange 2 : Marne + coquille d'œuf calcinée seul

- Mélange 3 : Marne +coquille d'œuf calcinée + zéolite

Nous avons choisi deux dosages 6% et 10%. Ces deux dosages se situent dans la limite des dosages économiquement rentable pour un traitement de sol.

Les proportions entre la coquille d'œuf calcinée et la zéolite (C – Z) sont résumé dans le tableau suivant :

	Mélange 2	Mélange 3		
Proportions C - Z	100% - 0%	80% - 20%	60% - 40%	40% - 60%

Tab. 16 Proportions entre la coquille d'œuf et la zéolite

Les essais de compression non confinée et les essais de cisaillement rectiligne ont été réalisés pour les trois mélanges. Ces derniers ont été testés à la teneur en eau 21% (état humide).

5. COMPORTEMENT DE LA MARNE APRES TRAITEMENT

5.1. Essai de compression non confinée

Il s'agit de la compression d'une éprouvette cylindrique de sol entre deux plateaux, l'axe de l'éprouvette cylindrique est orthogonal aux plateaux. L'essai consiste à imposer une vitesse constante de déformation longitudinale et à mesurer la force axiale appliquée à l'éprouvette. La résistance en compression, notée R_c s'effectue à 28 jours de cure. [20]

5.1.1. Mode d'opérateur

Les éprouvettes soumises aux essais de compression sont de forme cylindrique. Elles ont été confectionnées dans un moule en PVC spécialement conçu pour nos essais. Le moule a les dimensions suivantes : $H=15cm$ et $\varnothing=7,5cm$. Au total, 18 éprouvettes ont été confectionnées pour les deux dosages 6% et 10%.

La technique de fabrication se déroule selon les étapes suivantes :

- Le sol a été mis en premier lieu à l'étuve pour séchage pendant une période de 24 heures,
- La marne a été mélangée à sec avec les produits de traitement,
- Ajouter une quantité d'eau et malaxer jusqu'à l'obtention d'un mélange parfaitement homogène,
- Compacter le mélange selon le mode de compactage statique à l'aide de la presse UNIFRAME,
- Le compactage a été fait en deux couches, la première couche 2/3 de la masse totale (de chaque mélange), et la 2ème couche 1/3 de la masse totale,

- Après le démoulage, les éprouvettes ont été immédiatement scellées à l'aide d'un papier film afin de prévenir l'évaporation de l'eau contenu dans les mélanges,



Fig. 45 Photos des éprouvettes préparées

- A l'échéance des temps de cure (28 jours), les essais de compression simple ont été réalisés selon la norme NF P94-077,



Fig. 46 Photos de l'éprouvette après 28 jours

- Prendre les dimensions de l'éprouvette à l'aide d'un pied à coulisse (la hauteur et le diamètre sont pris quatre fois selon deux directions). Pour les calculs de la section nous utilisons les valeurs moyennes,
- L'éprouvette du sol est placée sur le plateau de la presse à chargement axial. Après la mise en contact des deux plateaux de la presse avec l'éprouvette, le chargement axial est appliqué avec une vitesse de déplacement constante de 1,00 mm/min (figure ci-dessous),



Fig. 47 Exécution de l'essai de compression

- La force maximale (F_{\max}) de rupture est affichée par la machine. La résistance à la compression simple R_c (la contrainte à la rupture résultant du rapport entre la force de rupture F_{\max} et la section transversale de l'éprouvette (A)) s'écrit :

$$R_c = \frac{F_{\max}}{A}$$

Où :

R_c (kPa): résistance à la compression simple,

F (kN): force maximale de compression,

A (m^2) : aire de la section transversale de l'éprouvette.

Les quantités de chaque composant du mélange sont synthétisées dans le tableau suivant :

dosages (%)	Mélange C - Z	ρ_d (kg/m^3)	Q marne (g)	Q coquille (g)	Q Zéolite (g)	Q eau (g)	
0	Naturel	1800	1209	0	0	254	
6	100 - 0		1136	1136	72.5		0
	80 - 20				58		14.5
	60 - 40				43.5		29
	40 - 60				29		43.5
10	100 - 0		1088	1088	169.2		0
	80 - 20				135.4		34
	60 - 40				101.5		68
	40 - 60				68		101.5

Tab. 17 Quantité de chaque composant des mélanges sol-liant

5.1.2. Résistance à la compression R_c

Les résultats des écrasements des éprouvettes à 28 jours pour différentes proportions de coquille et zéolite sont présentés dans le tableau suivant.

On note qu'on a pris la moyenne de deux résistances de compression pour chaque dosage.



Fig. 48 Photos de l'écrasement de l'éprouvette de sol naturel

Dosages	0%	6%				10%			
C - Z (%)	0 - 0	100 - 0	80 - 20	60 - 40	40 - 60	100 - 0	80 - 20	60 - 40	40 - 60
Force (kN)	0.62	3.723	3.4815	3.808	4.2455	3.353	3.398	3.315	4.164
R_c (kPa)	140.34	842.71	788.05	861.95	960.98	758.96	769.15	750.36	942.54

Tab. 18 Les résistances maximales pour différentes proportions de coquille et zéolite

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

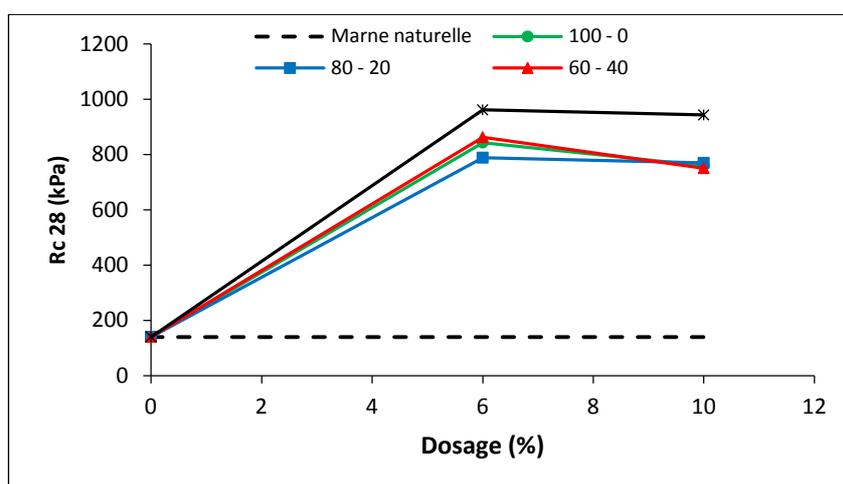


Fig. 49 Evolution de la résistance à la compression R_c en fonction du dosage

On remarque une amélioration de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation des dosages pour les différents mélanges (Coquille - Zéolite). On constate,

que les résistances de la marne traitée à 6% sont légèrement supérieures à la marne traitée à 10%. Ce résultat montre l'effet inverse de l'augmentation du dosage sur l'amélioration de résistance de la marne traitée.

Les rapports d'amélioration de la résistance de la marne traitée par rapport à la résistance de la marne naturelle pour les différentes proportions Coquille – Zéolite sont présentés dans le tableau et la figure suivantes. On remarque que le rapport d'amélioration vari entre 5 à 7 fois par rapport la résistance à la compression initiale. Ce résultat montre l'effet bénéfique de l'ajout le l'agent de traitement sur la portance de la marne.

Dosages (%)	6%				10%			
Proportion C – Z (%)	100 - 0	80 - 20	60 - 40	40 - 60	100 - 0	80 - 20	60 - 40	40 - 60
Rapport d'amélioration	6.0	5.6	6.1	6.8	5.4	5.5	5.3	6.7

Tab. 19 Rapport d'amélioration de Rc par rapport au sol naturel

Par la suite, on a tracé l'évolution de cette résistance en fonction des différentes proportions de coquille – zéolite. Les résultats sont présentés dans la figure suivante. D'après les histogrammes, on remarque une légère diminution à la proportion 80 – 20 puis une augmentation de la résistance en fonction de l'augmentation de la proportion de la zéolite. La meilleure résistance a été obtenue pour la proportion 40 – 60 et cela pour les deux dosages en liant 6% et 10%. Ce constat montre l'effet positif du traitement combiné Coquille – Zéolite avec la proportion 40 – 60 sur l'amélioration de la portance de la marne. Enfin, la plus faible résistance a été obtenue pour la proportion 80 – 20 pour le dosage 6% et 60 – 40 pour le dosage 10%.

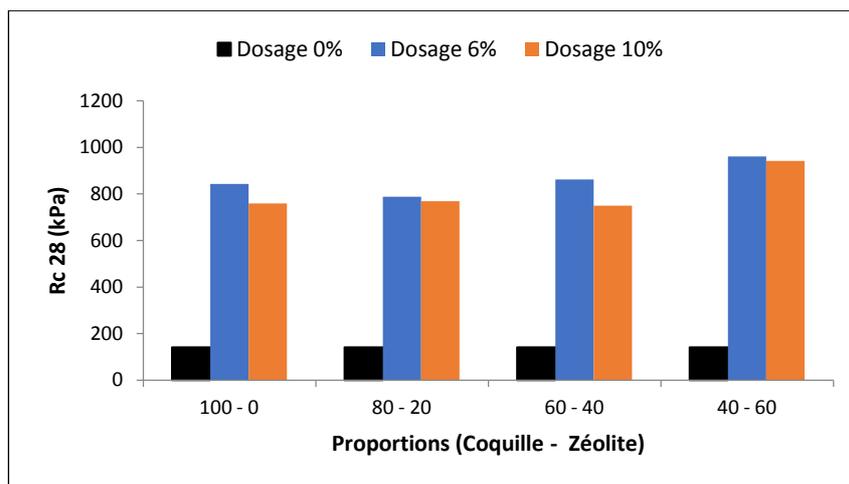


Fig. 50 Evolution de Rc en fonction des différentes proportions de Coquille - Zéolite

Concernant maintenant le pourcentage d'écart en résistance entre le dosage 6% et 10% pour les différentes proportions C – Z, les résultats sont présentés dans le tableau suivant. Il faut noter que cet écart a été calculé conformément à la formule suivante:

$$Ecart(\%) = \frac{Rc(6\%) - Rc(10\%)}{Rc(10\%)} \cdot 100$$

C - Z (%)	100 - 0	80 - 20	60 - 40	40 - 60
Écart (%)	+9.9	+2.4	+12.9	+1.9

Tab. 20 Écart entre Rc à 6% et à 10% de dosage

On constate que l'écart est positif et variable selon les proportions de coquille – zéolite. Il ne dépasse pas 13% pour l'ensemble des cas. Le plus faible écart a été obtenu pour la proportion C – Z de 40 – 60. Ces résultats montrent que le dosage de 6% est optimal pour le traitement de la marne.

5.1.3. Comportement Force - déplacement

Nous avons enregistré également l'évolution de la force de compression des différentes éprouvettes en fonction du déplacement au cours des essais. Les résultats sont présentés dans les deux figures suivantes.

On remarque que la marne naturelle a montré un comportement ductile avec une capacité de déformation importante comparativement à la marne traitée. Cela est dû à la plasticité plus importante de la marne naturelle qui sera neutralisée après traitement. Les nouvelles liaisons créées entre les particules de sol ont changé le comportement de notre marne d'un comportement plastique à un comportement rigide.

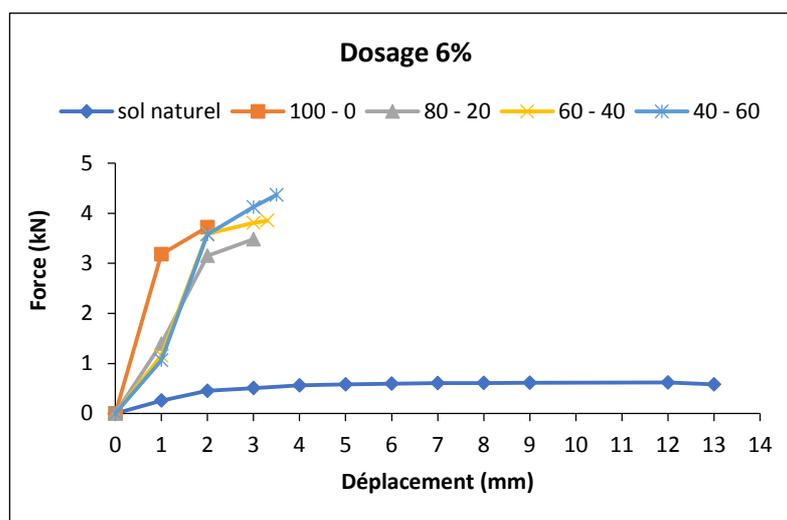


Fig. 51 Evolution de la force de compression en fonction du déplacement pour le dosage 6%

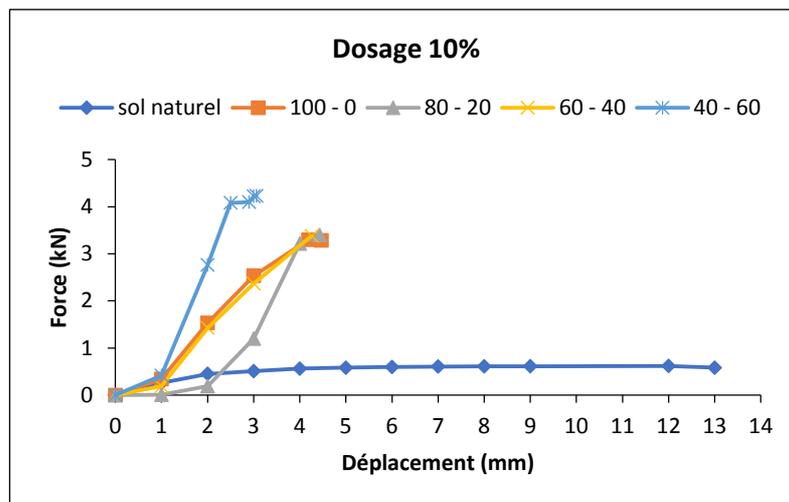


Fig. 52 Evolution de la force de compression en fonction du déplacement pour le dosage 10%

5.1.4. Synthèse

Pour la proportion optimale (C – Z) à (40 – 60), les deux dosages en liant 6% et 10% du sol traité ont été choisis pour réaliser des essais de cisaillement rectiligne à la boîte de Casagrande. Neuf (9) éprouvettes ont été confectionnées pour un cisaillement à 7 jours au lieu de 28 jours par manque de temps. Les modalités et les résultats des essais sont présentées dans ce qui suit.

5.2. Essai de cisaillement rectiligne (consolidé drainé)

5.2.1. Préparation des éprouvettes

Les échantillons de marne naturelle et traitée sont préparés comme précédemment c-à-dire avec une teneur en eau $w=21\%$ et compactés à la masse volumique sèche $\rho_d = 1800 \text{ kg/m}^3$. Les mélanges sol-liant ont été directement mélangés avec la quantité d'eau et ils ont été bien mélangés manuellement jusqu'à ce que le mélange devienne homogène.



Fig. 53 Préparation des mélanges pour le compactage

Pour que les échantillons soient compactés à la masse volumique maximale désirée, les mélanges ont été confectionnés par compression statique et reconstitués sous forme

d'éprouvettes de 2 cm de hauteur et de section (6×6) cm en utilisant la machine de compression CBR.



Fig. 54 Compression avec l'appareil CBR

Le compactage consiste à appliquer par l'intermédiaire du piston, un effort vertical exercé sur le mélange. Les parois intérieures de la boîte doivent être couvertes d'une couche de graisse afin de réduire les frottements mélange-moule et d'éviter la fracture de l'éprouvette lors de son extraction de la boîte de cisaillement. L'extraction se fait manuellement après compactage, on utilise un piston ayant le même diamètre que le diamètre intérieur de la boîte pour faire glisser l'éprouvette vers l'extérieur. On détermine ensuite son poids et ses dimensions.

Après démoulage, les échantillons sont immédiatement sellés avec un film plastique pour prévenir d'éventuelle perte d'humidité et de les éloigner de tout contact avec l'air ambiant. La maturation à 20°C est assurée au laboratoire à température ambiante.

Il faut noter que les éprouvettes sont confectionnées pour une période de cure de 7 jours. Nous avons préparé deux éprouvettes pour chaque dosage afin de prendre en considération l'incertitude de mesure. [4]



Fig. 55 Les échantillons après la compression

5.2.2. Cisaillement des éprouvettes

A la fin de la période de cure (7 jours), des essais de résistance au cisaillement consolidé drainé (CD) sont effectués. L'éprouvette est introduite dans la boîte de cisaillement rectiligne qui comprend deux parties : la partie inférieure fixe (immobile) et la partie supérieure mobile. Un effort normal vertical est appliqué tout le long de l'essai sur l'éprouvette en utilisant des masses et un bras de levier. Des masses permettent d'appliquer un effort normal vertical de 1, 2 et 3 Bar. La machine de cisaillement à vitesse constante crée un mouvement uniforme de la boîte de cisaillement qui occasionne un effort tranchant horizontal. Le cisaillement étant du type CD, donc très long, la vitesse de cisaillement est donc très faible. L'éprouvette développe alors une force en s'opposant au mouvement. Cette force, en fonction de son intensité, induit le déplacement d'un anneau métallique. Ce déplacement est appelé lecture de l'anneau et mesuré à l'aide d'un dispositif de mesure. Les lectures se font chaque déplacement de 0,25 mm. L'essai est arrêté lorsque la valeur de la lecture se répète trois fois ou lorsque le déplacement horizontal atteint au moins 5 mm. Il faut noter que la forme initiale des éprouvettes a été adaptée à la boîte de forme circulaire à l'aide d'une tresse coupante.



Fig. 56 Cisaillement des éprouvettes dans la boîte de Casagrande

5.2.3. Présentation des résultats

a) Marne naturelle

A partir des mesures d'effort de cisaillement effectuées sur des échantillons de marne naturelle, nous avons calculé les contraintes de cisaillement selon le tableau ci-dessous. Les courbes contraintes de cisaillement - déplacement et contraintes de cisaillement – contraintes normales sont présentées sur les figures ci-dessous.

Déformation (mm/mm)	Lecture a l'anneau			Contrainte de cisaillement (kPa)		
	1 bar	2 bar	3 bar	100 kPa	200 kPa	300 kPa
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.25	3.0	4.0	4.0	14.0	19.0	18.7
0.5	4.5	5.5	6.0	21.0	26.1	28.0
0.75	5.5	6.0	7.5	25.7	28.5	35.0
1	6.0	7.0	8.0	28.0	33.3	37.3
1.25	6.5	7.5	8.0	30.3	35.6	37.3
1.5	7.0	7.5	8.5	32.7	35.6	39.7
1.75	7.5	7.5	9.0	35.0	35.6	42.0
2	7.5	8.0	9.0	35.0	38.0	42.0
2.25	7.5	8.0	9.0	35.0	38.0	42.0
2.5	7.5	8.0	9.0	35.0	38.0	42.0

Tab. 21 Résultats des essais de cisaillement de la marne naturelle

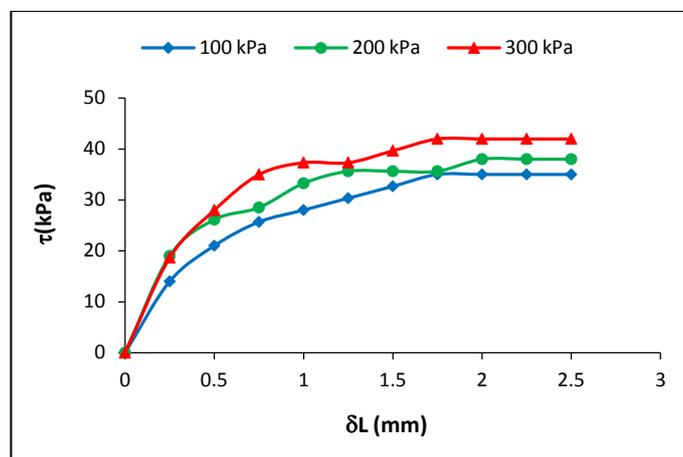


Fig. 57 Courbe contrainte de cisaillement-déplacement de la marne naturelle

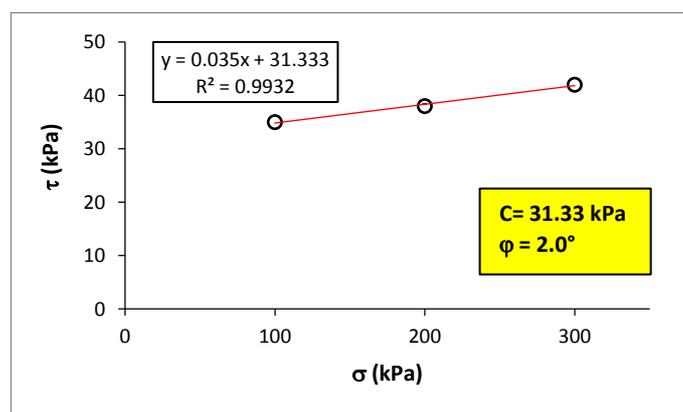


Fig. 58 Courbe contrainte de cisaillement - contrainte normal de la marne naturelle

b) Marne traitée à 6%

Déformation (mm/mn)	Lecture a l'anneau			Contrainte de cisaillement (kPa)		
	1 bar	2 bar	3 bar	100 kPa	200 kPa	300 kPa
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.25	8.0	11.0	23.0	37.6	51.6	108.0
0.5	14.0	15.0	37.0	65.7	70.4	173.7
0.75	18.0	23.0	44.0	84.5	107.9	206.5
1	21.0	39.0	47.5	98.6	183.0	223.0
1.25	22.0	38.0	48.5	103.3	178.3	227.7
1.5	23.5	38.0	49.0	110.3	178.3	230.0
1.75	24.0	38.0	49.0	112.7	178.3	230.0
2	24.5	37.0	49.0	115.0	173.6	230.0
2.25	24.5	35.0	49.0	115.0	164.2	230.0
2.5	24.5	35.0	49.0	115.0	164.2	230.0

Tab. 22 Résultats des essais de cisaillement de la marne traitée à 6%

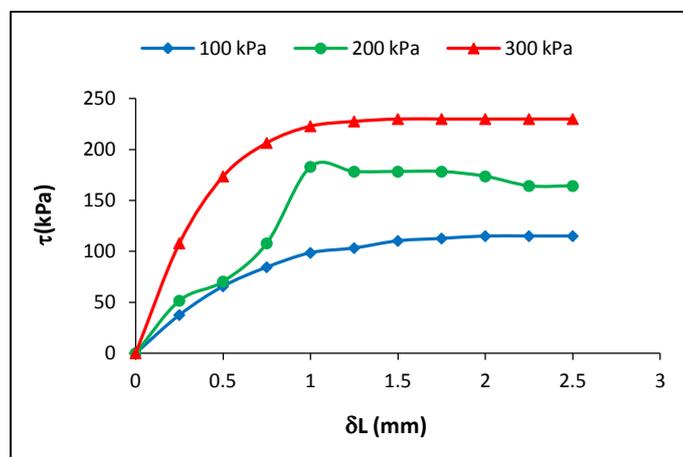


Fig. 59 Courbe contrainte de cisaillement-déplacement de la marne traitée à 6%

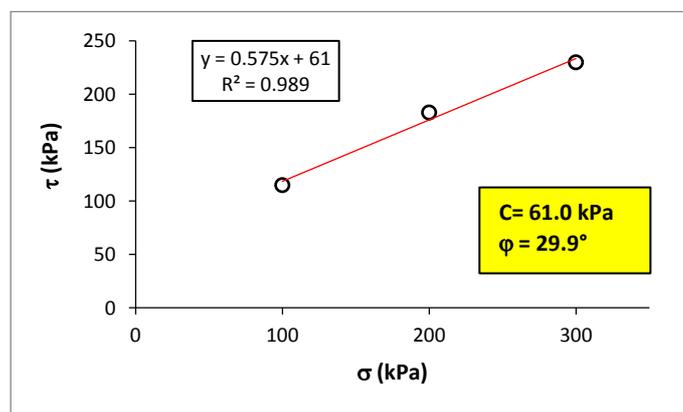


Fig. 60 Courbe contrainte de cisaillement - contrainte normal de la marne traitée à 6%

c) Marne traitée à 10%

Déformation (mm/mn)	Lecture a l'anneau			Contrainte de cisaillement (kPa)		
	1 bar	2 bar	3 bar	100 kPa	200 kPa	300 kPa
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.25	7.0	12.5	16.0	32.8	58.6	75.2
0.5	18.0	21.5	23.0	84.2	100.7	108.0
0.75	25.0	30.0	28.0	117.0	140.5	131.5
1	24.0	35.0	38.0	112.3	163.9	178.5
1.25	22.0	37.5	49.0	103.0	175.7	230.2
1.5	21.0	37.0	51.0	98.3	173.3	239.6
1.75	20.0	37.0	51.0	93.6	173.3	239.6
2	20.0	37.0	52.0	93.6	173.3	244.3
2.25	-	38.0	53.0	-	178.0	249.0
2.5	-	38.0	54.5	-	178.0	256.0

Tab. 23 Résultats des essais de cisaillement de la marne traitée à 10%

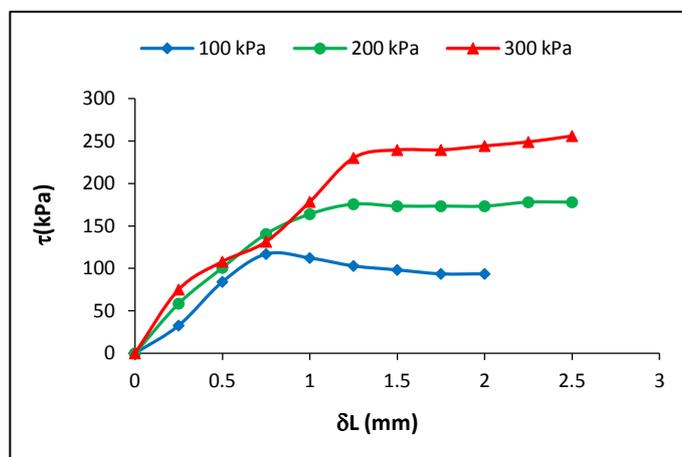


Fig. 61 Courbe contrainte de cisaillement-déplacement de la marne traitée à 10%

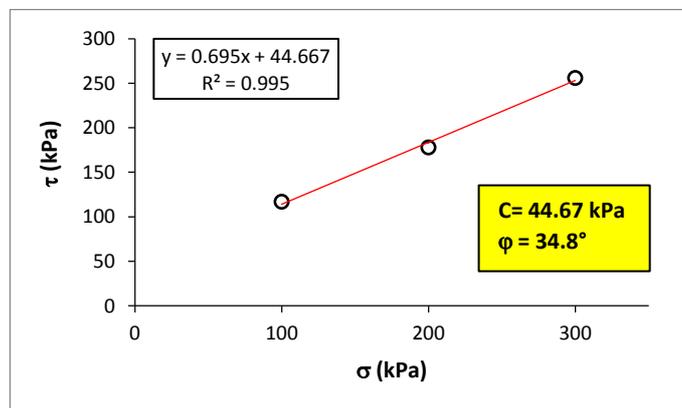


Fig. 62 Courbe contrainte de cisaillement - contrainte normal de la marne traitée à 10%

5.2.4. Analyse des résultats

Nous avons synthétisé dans le tableau suivant les résultats obtenus des angles de frottement et les cohésions afin de mettre en évidence l'effet de traitement et le dosage en liant sur les paramètres de cisaillement. De plus et pour mieux illustrer les résultats un graphe est présenté dans la figure suivante.

Paramètres	Marne naturelle	Marne traitée 6%	Marne traitée 10%
C (kPa)	31.33	61.0	44.67
φ (°)	2	29.9	34.8

Tab. 24 Angles de frottement et cohésion de la marne naturelle et traitée après 7 jours

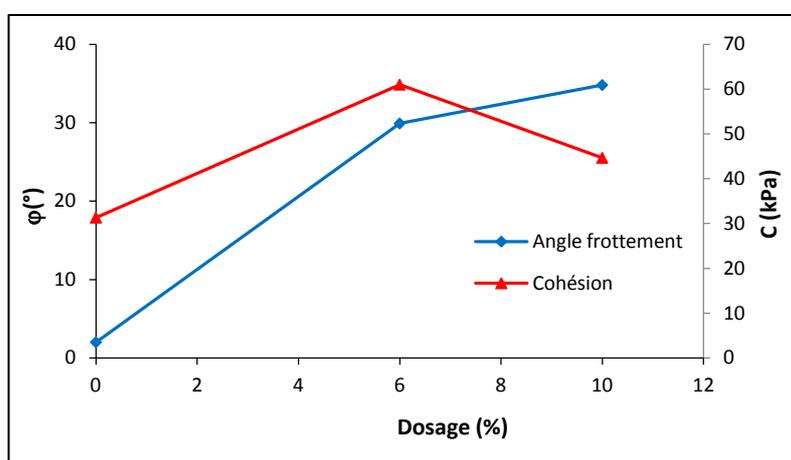


Fig. 63 Evolution de angle de frottement et la cohésion en fonction du dosage en liant

L'angle de frottement suit une tendance croissante en fonction de l'augmentation du dosage. Le traitement combiné Coquille – Zéolite a neutralisé une partie de l'argilosité de la marne ce qui a conduit à l'agglomération des particules fines de l'argile et augmenté en conséquence l'angle de frottement qui devient similaire à un sol granulaire.

En revanche, la cohésion augmente à 6% puis elle diminue à 10%. L'augmentation de la cohésion est due, à priori, à la création de nouvelles liaisons hydratées de la coquille d'œuf et la zéolite ce qui a amélioré la liaison entre les particules de sol et augmenter en conséquence sa cohésion. Concernant la diminution de la cohésion, il peut être expliqué par l'effet inverse du surdosage en coquille d'œuf et zéolite sur la prise et le durcissement du mélange avec le sol.

Par la suite, nous avons présenté les contraintes de cisaillement maximales pour l'ensemble des essais dans la figure suivante. On observe pour les trois contraintes appliquées une augmentation des résistances au cisaillement maximales après traitement à 6% puis une quasi stabilisation à 10%.

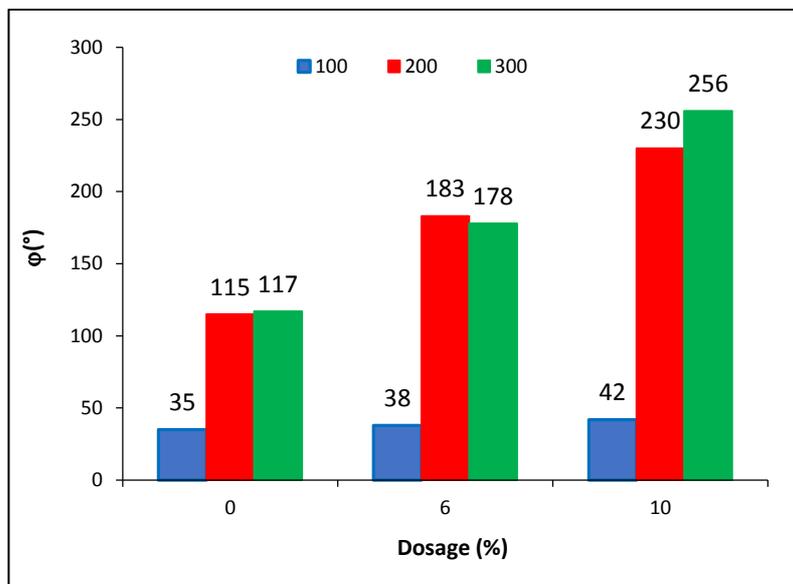


Fig. 64 Résistances au cisaillement maximales (τ_{max}) avant et après traitement

6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons fait une caractérisation complète de la marne de Mila. Les résultats de l'identification de cette marne montrent que ce sol est argileux de type A2 selon la classification GTR. A l'état naturel, ce sol ne peut pas être utilisé dans l'état, il nécessite un traitement adapté. Par la suite, nous avons montré à travers l'étude de traitement l'influence du nouveau traitement combiné coquille – zéolite, sur la résistance à la compression non confinée et le comportement au cisaillement rectiligne.

L'étude de l'effet du traitement sur les performances mécaniques a montré que l'ajout des produits de traitement au sol conduit à une amélioration des caractéristiques mécaniques du sol, c'est-à-dire la cohésion, l'angle de frottement et la résistance au cisaillement au moment de la rupture. Les résultats ont montré aussi l'amélioration de la résistance à la compression simple qui se traduit par une meilleure portance.

CHAPTRE 4 : ETUDE NUMERIQUE

CHAPITRE 4 : ETUDE NUMERIQUE

1. INTRODUCTION

Après l'étude de l'effet des produits de traitement sur les propriétés mécaniques de la marne, nous avons fait une étude numérique par le logiciel PLAXIS 8.2 sur la stabilité d'un grand remblai (hauteur 15m). Ce dernier est construit par notre marne naturelle et traitée. Il sera question de montrer l'effet des différents paramètres sur la stabilité de ce grand remblai.

2. PRESENTATION DU PLAXIS

Le logiciel PLAXIS est le programme d'éléments limités de référence dans le développement géotechnique a commencé en 1987 à l'initiative du Ministère Travaux publics et hydrologie aux Pays-Bas. Son objectif initial était de créer le code d'article limité peut être utilisé facilement en 2D pour analyser l'impact établir un barrage fluvial sur de l'argile molle aux Pays-Bas. Après des années, PLAXIS a été élargi pour inclure de nombreux autres domaines du génie géotechnique. en 1998, la première version de PLAXIS a été développée pour Windows. Pendant la même période une version 3D du logiciel a été développée. Après quelques années, le développement du programme tunnel PLAXIS 3D a été publié en 2001. PLAXIS 2D est donc un logiciel bidimensionnel spécialement conçu pour Analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechnique. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle de plan (distorsion de niveau) ou symétrie axiale. Algorithme général de lame PLAXIS dans la résolution d'un système d'équations forcées non linéaires selon processus itératif pour déterminer les valeurs de déplacement dans différents nœuds taille du réseau, champ de stress et principaux cas.

Le logiciel utilise une interface graphique pratique qui permet aux utilisateurs de créer rapidement un modèle d'ingénierie et un réseau d'élément basé sur la découpe verticale de l'œuvre à étudier. [33]

2.1. Code de calcul Plaxis

Le code d'élément limité PLAXIS est conçu par des techniciens géotechniques numériques, et est certainement un idéal scientifique et pratique actuel dans la pseudo-analyse 2D. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en plasticité flexible non standard (5 paramètres), prenant en compte la pression interstitielle (et même l'intégration linéaire), équipé de méthodes de précision et robuste, algorithmes éprouvés, ainsi que des procédures de sélection automatique qui évitent des options précises pour l'opérateur non informé. Bien

que le code soit très fiable numériquement, il utilise des éléments de haute précision (triangles de 15 nœuds), ainsi que des processus de guidage de précision modernes (méthode de longueur d'arc). D'un point de vue pratique, le système d'arborescence à l'écran rend l'utilisation flexible et agréable, parce que l'opérateur ne gâte pas inutilement l'esprit. Lorsque les manuels sont rarement utilisés, leur taille est réduite et il est facile de s'y référer. L'ensemble des options par défaut (limite requise) rend la livraison des données facile et rapide. Enfin, les options simplifiées (initiation de contraintes et pressions interstitielles) permettent une transition directe vers la cible (pour prédire le comportement métier), même si cela signifie plus tard, avec le même symbole et les mêmes données, un calcul révisé [34].

2.2. Les sous-programmes de Plaxis

L'interface utilisateur de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves) :

a) Le programme d'entrée de données (Input)



Le logiciel contient tout le nécessaire pour créer et modifier un modèle d'ingénierie pour générer les conditions initiales.

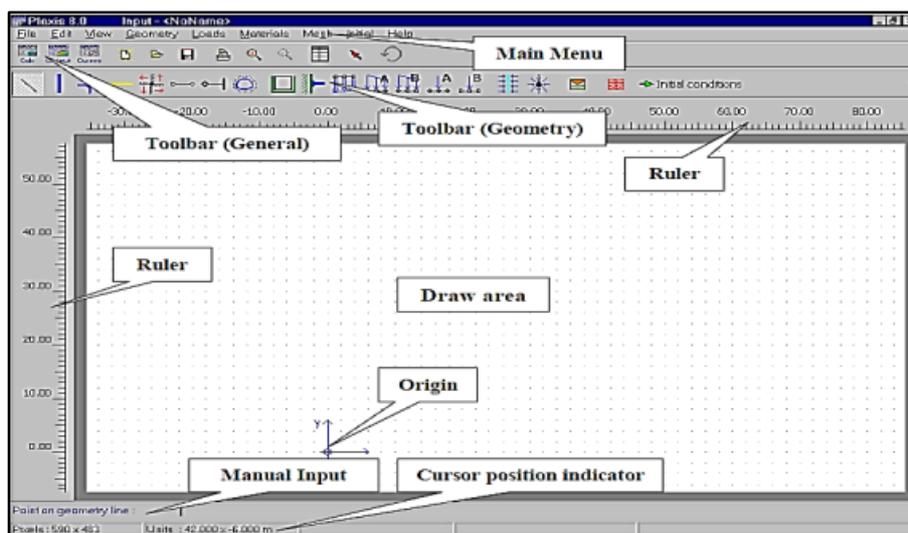


Fig. 65 Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (Mode de création géométrique)

b) Le programme de calcul (Calculations)



Ce logiciel contient tous les éléments pour identifier et commencer à calculer.

Au début du programme de compte, l'utilisateur doit choisir le projet dont les comptes seront sélectionnés.

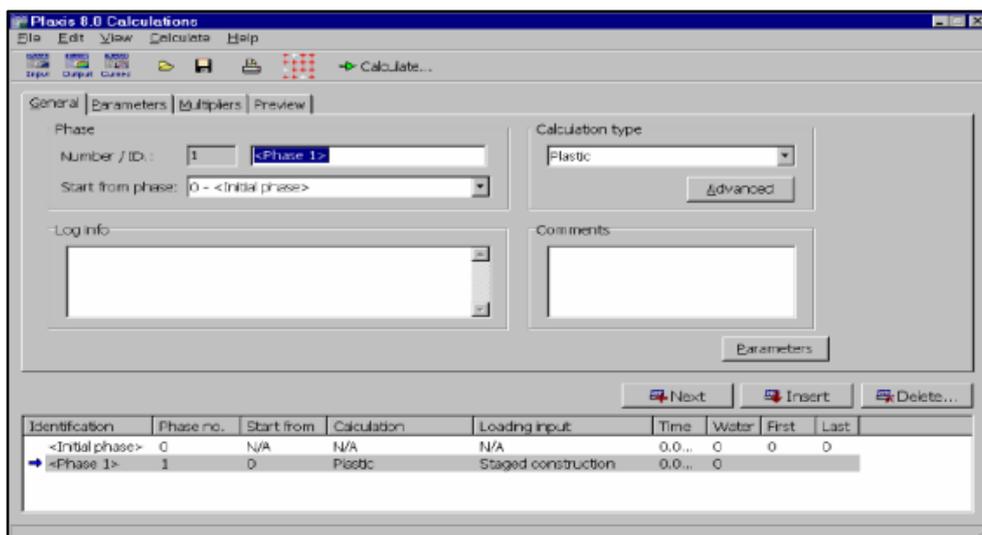


Fig. 66 Fenêtre principale du programme de calcul

Pas de calcul et itérations en cours (Step and iteration numbers)

Les valeurs actuelles d'étape et de redondance indiquent respectivement l'étape de calcul actuel et le numéro de redondance. La valeur maximale des étapes indique le dernier numéro d'étape possible pour la phase de calcul en cours après le coefficient des étapes supplémentaires. La valeur maximale de répétition correspond au paramètre maximum de répétition pour les paramètres d'action de répétition.

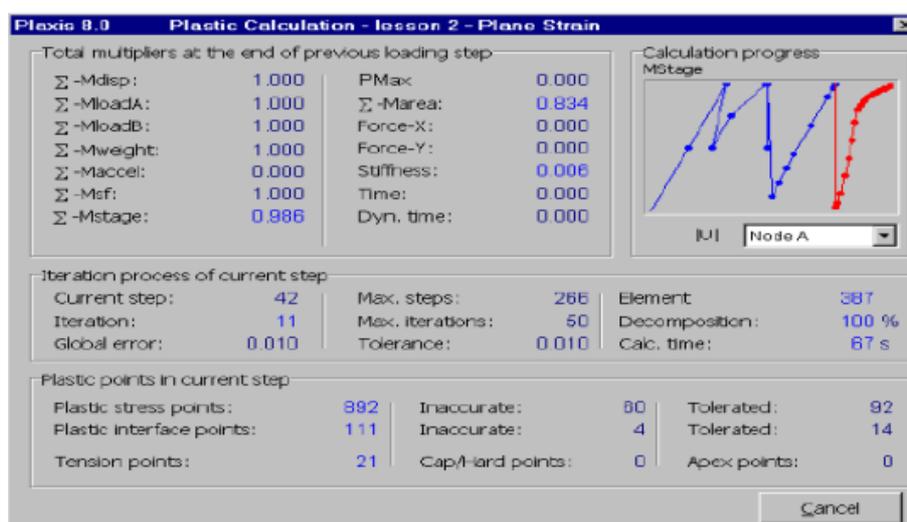


Fig. 67 Fenêtre de calcul

c) Le programme de résultats (Output)

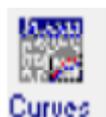


Ce logiciel contient tous les éléments qui permettent de voir les résultats des données générées et des calculs d'éléments finis. Au début du programme de résultats, l'utilisateur doit choisir le formulaire approprié et l'étape de calcul ou le numéro d'étape pour lequel les résultats seront affichés.



Fig. 68 Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Output

d) Le programme courbes (Curves)



Ce logiciel a tout ce dont vous avez besoin pour générer des courbes chargées, des trajectoires de déformation et des courbes restreintes de données.

La réalisation de la modélisation à l'aide de Plaxis se traduit généralement par la série d'étapes suivante :

- Utilisation du préprocesseur « Plaxis Input », pour la génération des données (Maillage, jeu des données et contraintes initiales).
- Lancement du code de calcul éléments finis « PLAXIS Calculate », pour effectuer la résolution numérique du problème étudié.
- Utilisation de post-processeur « Plaxis Output », pour l'interprétation des résultats sur écran graphique.
- Utilisation de post-processeur « PLAXIS Curve », pour l'interprétation des courbes (courbe de consolidation, chemin des contraintes, ... etc.).



Fig. 69 Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Curves

2.3. Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS

La modélisation du sol a pour objectif de déterminer un modèle de comportement qui permet d'étudier l'évolution de ses caractéristiques physiques et mécaniques. Il faudra que celui-ci puisse représenter le plus possible tous les aspects essentiels du comportement mis en évidence par les essais de laboratoire et in situ. Le modèle est ainsi une description complète du comportement du sol. La plupart des matériaux ont un comportement élastoplastique, qui est caractérisé par l'apparition de déformations réversibles élastiques et de déformations irréversibles plastiques. Sur la surface de charge, deux cas de comportement sont possibles : la surface de charge n'évolue pas, on parle de loi élastique parfaitement plastique, c'est le cas du modèle de Mohr-Coulomb ; la surface de charge évolue au cours du chargement, on parle de modèle élastoplastique avec écrouissage dont le modèle Hardening Soil de Plaxis fait partie [34]. Dans Plaxis, il existe plusieurs types de modèles, on définit dans la suite deux modèles élastoplastiques

2.3.1. Modèle de Mohr-Coulomb

Le modèle de Mohr-Coulomb est un modèle souvent utilisé pour représenter la rupture par cisaillement dans les sols et les roches tendres. Cette loi se caractérise par une élasticité linéaire isotrope de Hooke, une surface de charge et un potentiel plastique.

Les règles d'écoulement sont non associées. A l'intérieur de la surface de rupture, le comportement du matériau est supposé élastique linéaire isotrope ou anisotrope. Sur la surface de rupture, le comportement est considéré comme parfaitement plastique.

Le modèle de Mohr-Coulomb nécessite cinq paramètres fondamentaux :

- deux paramètres élastiques : le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν ;
- deux paramètres relatifs aux conditions à la rupture : la cohésion c et l'angle de frottement ϕ ;
- un paramètre relatif à la règle d'écoulement plastique, l'angle de dilatance ψ .

Ces paramètres peuvent être facilement identifiés à partir d'essais en laboratoire, essais oedométriques ou triaxiaux.

L'angle de frottement ϕ la valeur est généralement entre 15° et 45° . Les valeurs inférieures ou autour de 30° sont typiques de l'argile, tandis que les valeurs supérieures entre 25° et 45° distinguent le sable. À une certaine pression, l'angle de frottement est pratiquement indépendant de la teneur en eau du sol, mais augmente avec le diamètre moyen du grain. L'angle de frottement dépend également de la forme du grain et de son état de surface. [35]

Le modèle demande la détermination de cinq paramètres. Les deux premiers sont E et ν (paramètres d'élasticité). Les deux autres sont c et ϕ , respectivement.

Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité.

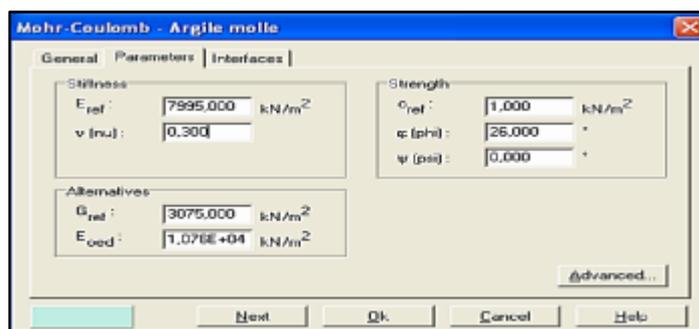


Fig. 70 Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb

a) Module d'Young

Le choix d'une unité de déformation est l'un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. L'unité de déformation varie selon la déformation et la contrainte moyenne. Dans le modèle Mohr-Coulomb, le module est fixe. Il semble irréaliste de considérer l'unité d'ombre à l'origine (qui correspond au G_{max} mesuré dans les essais dynamiques ou dans les distorsions très faibles). Cet appareil nécessite un test spécial. Il est conseillé de prendre une unité moyenne, par exemple l'unité correspondant au niveau de 50% du coefficient de retrait de rupture.

b) Coefficient de Poisson

Une valeur de 0,2 à 0,4 est recommandée pour le coefficient de Poisson. Ceci est réaliste pour une application de poids spécial (K0 ou procédure de charge par gravité). Des valeurs inférieures peuvent être utilisées pour certains problèmes, en particulier dans les décharges. Pour les sols non impressionnables, le coefficient de Poisson approche 0,5 sans que cette valeur soit utilisable.

c) Angle de frottement

PLAXIS ne tient pas compte de la différence d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement qui sera offert et soit l'angle de frottement extrême ou l'angle de palier de frottement. Il attire l'attention sur le fait que les angles de frottement supérieurs à 35 degrés peuvent considérablement prolonger les temps de calcul. Il peut être conseillé de commencer les calculs avec des valeurs d'angle de frottement raisonnables, même si cela signifie de les augmenter plus tard. Cette valeur est de 35° compatibles avec les angles de frottement ϕ .

d) Cohésion

Le sol en poudre n'a pratiquement aucune cohésion, $0 < c <$ quelques kilogrammes Pascal. Parlez de cohésion poétique ou de cohésion dans le lieu. La cohésion du sol se situe entre quelques kPa et plusieurs centaines de kPa. Il peut être utile d'attribuer aux questions numériques une très faible cohésion (0,2 à 1 KPa).

e) L'angle de dilatance

L'angle de dilatance ψ est quant à lui généralement compris entre 0 et 15. Les sables lâches et les argiles ont des valeurs de dilatance très faibles, quelques degrés à peine voire zéro. D'une manière générale, l'angle de frottement est pratiquement toujours supérieur à l'angle de dilatance. La valeur de ψ peut être simplement déterminée à partir de la pente de dilatance observée dans les essais triaxiaux (cisaillement)

Il existe également une relation empirique simple, généralement bien vérifiée pour les sables denses, reliant l'angle de dilatance et l'angle de frottement interne :

$$\Psi = \varphi - 30 \text{ pour } \varphi > 30^\circ$$

$$\Psi = 0^\circ \text{ pour } \varphi < 30^\circ$$

f) Les contraintes de traction

La pyramide de Mohr-Coulomb permet la pression de traction. Ceux-ci sont souvent irréalistes pour le sol et ces pressions de traction peuvent être réduits (tension cut-off) ou de les diminuer (Tensile strength).

g) Les paramètres avancés

Les paramètres avancés comprennent une ténacité accrue et une plus grande cohérence avec la profondeur, ainsi que l'enlèvement du tracteur. Cette dernière option est utilisée par défaut mais peut être désactivée ici, si désiré.

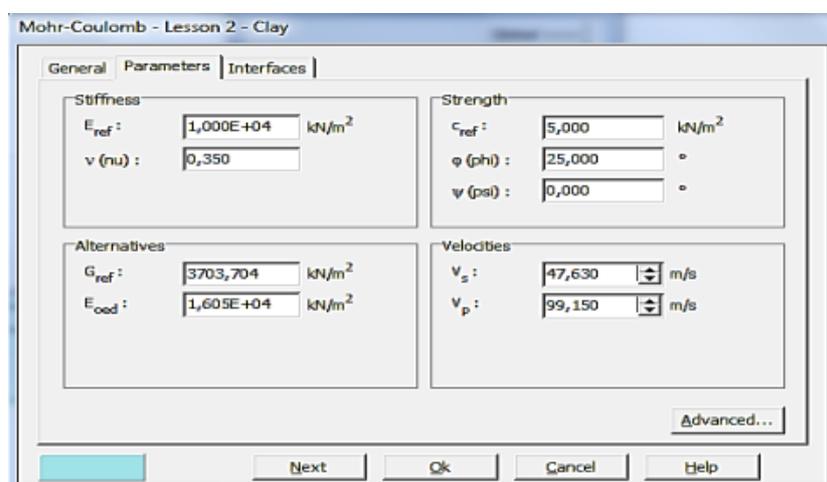


Fig. 71 Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb

2.3.2. Modèle élastoplastique avec écrouissage (*Hardening Soil Model. H.S.M*)

Une loi de comportement élastoplastique avec écrouissage telle que le modèle HSM permet de mieux tenir compte des déformations irréversibles qu'on observe dans le sol même loin de la rupture [36]. Ce concept découle du comportement des métaux effondrés (hardened). Le niveau de plasticité augmente avec la gravité des déformations plastiques.

L'implémentation de ce modèle dans le code de calcul Plaxis est présentée par Schanz et al. [37] Précisons toutefois que le modèle Hardening Soil est un modèle constitutif de sol avancé basé sur le modèle de Duncan & Chang [38] Mais ils ont été modifiés pour tenir compte de la flexibilité du sol. Les plastiques peuvent être de deux types : liés au cisaillement ou à la compression

La déformation axiale et le déviateur des contraintes sont reliés dans le modèle Hardening Soil par une fonction hyperbolique. La rigidité de cisaillement est utilisée pour modéliser des déformations irréversibles dues au chargement déviatorique primaire. La rigidité en compression est utilisée pour modéliser les déformations plastiques irréversibles dues aux compressions primaires œdométriques et isotropes respectivement.

Le modèle HSM nécessite donc principalement les huit paramètres suivant, qui comme pour le modèle de Mohr-Coulomb sont identifiables à partir d'essais œdométriques ou triaxiaux

D'un point de vue qualitatif, ce type de modèle basé sur la théorie de la plasticité avec écrouissage est capable de prendre en compte les aspects majeurs du comportement du sol et de reproduire avec suffisamment de précision l'évolution observée lors d'essais expérimentaux [35].

a) Les paramètres du HSM

Les paramètres du HSM sont représentés sur la figure

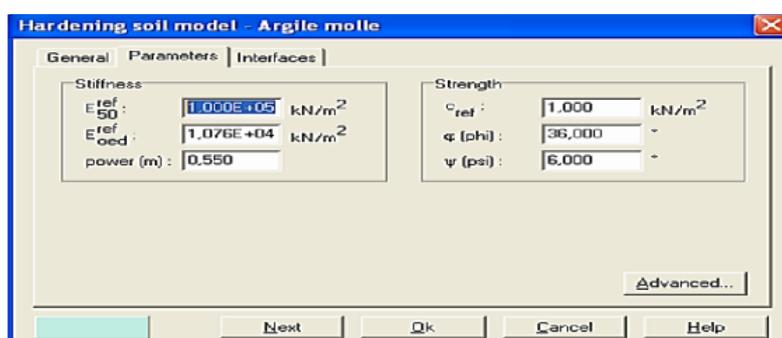


Fig. 72 Fenêtre des paramètres du Hardening Soil Model

Paramètres de Mohr-Coulomb

C : cohésion (effective) [kN/m²]

ϕ : angle de frottement effectif [°]

Ψ : angle de dilatance [°]

Paramètres de rigidité :

E_{50}^{ref} : module sécant dans un essai triaxial [kN/m²]

E_{oed}^{ref} : module tangent dans un essai œdométrique [kN/m²]

m : Puissance (environ 0,58 pour les sables) [-]

- Janbu (1963) rapporte des valeurs de m autour de 0.5 pour les sables et les silts norvégiens,
- Von Soos (1980) rapporte de diverses différentes valeurs.

3. MODELISATION DU REMBLAI MARNEUX

3.1. Paramètre de la modélisation

Dans ce travail nous considérons un talus constitué d'un sol (une couche) avec des paramètres différents (la cohésion et l'angle de frottement). Le remblai fait 15m de hauteur et on teste deux pentes de talus du remblai 45° et 60°. Nous avons appliqué deux cas sans surcharge et un cas avec surcharge (50 kN/m²). Les angles de frottement (φ) et la cohésion (C) à introduire sont les résultats déterminés dans le chapitre précédent. Les propriétés des couches de sol, et leurs natures, sont présentés dans le tableau suivant.

Matériaux Paramètres	Marne naturelle	Marne+coquille d'oeuf +zeolite	
		6%	10%
C (kPa)	31.33	61	44.67
φ (°)	2.0	29.9	34.68

Tab. 25 Paramètres de la modélisation du sol utilisé

3.2. Introduction de la géométrie du remblai

Les coordonnées des points sont présentées dans le tableau suivant:

Hauteur	Pentes	Points	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15 m	45°	X (m)	0	0	5	10	40	45	50	55	60	63	63
		Y (m)	0	10	10	15	15	10	10	5	5	3	0
	60°	X (m)	0	0	5	15	45	55	60	65	70	73	73
		Y (m)	0	10	10	15	15	10	10	5	5	2	0

Tab. 26 Coordonnées des points des modèles géométriques

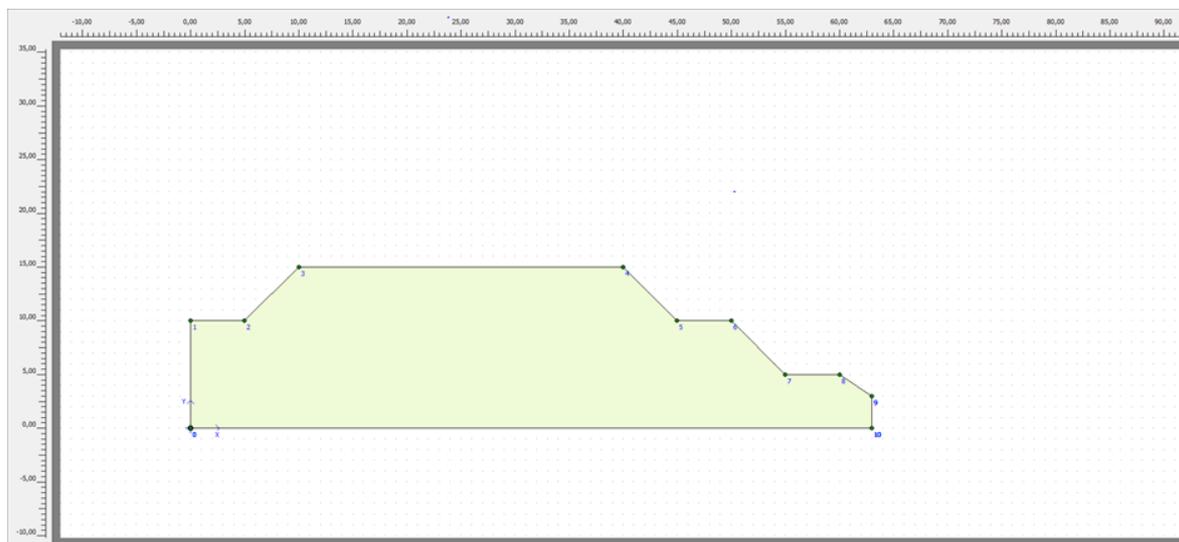


Fig. 73 La géométrie du modèle de terrain sur Plaxis ($H=15m$, pente $=45^\circ$)

3.3. Introduction des propriétés de la couche de sol

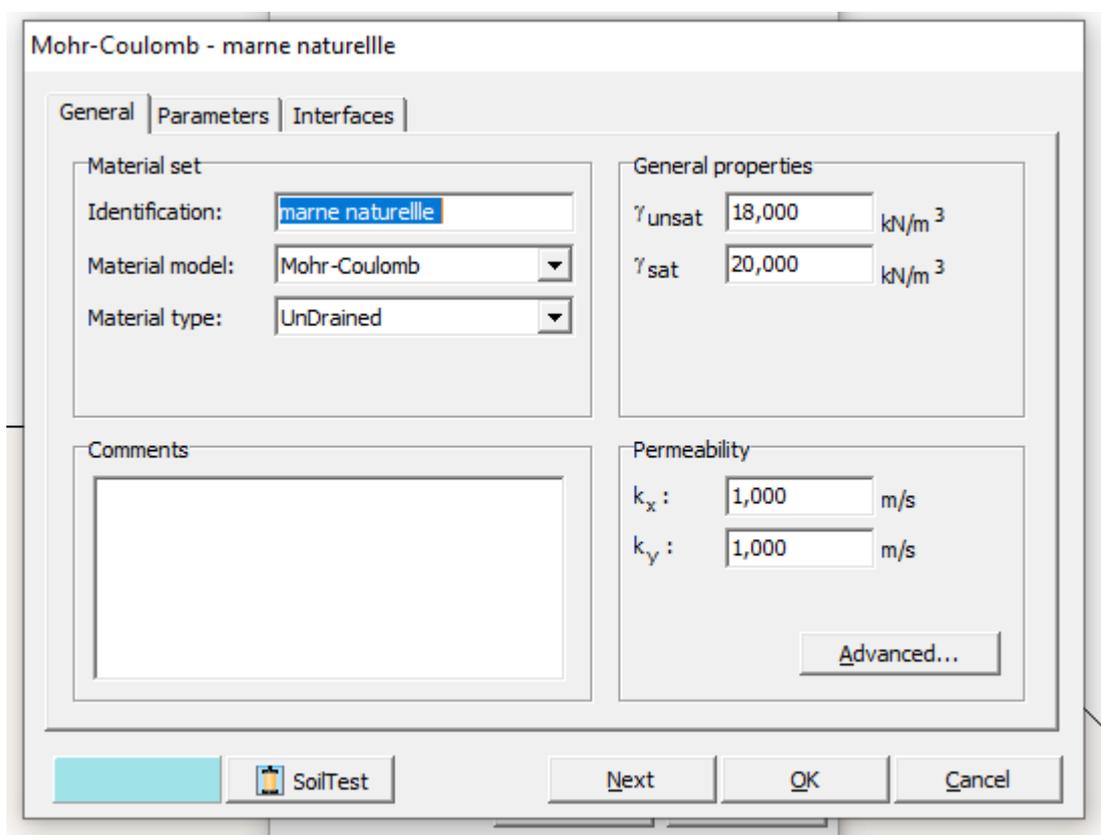


Fig. 74 Propriétés de la couche de marne

4. RESULTATS NUMERIQUES

Cas 1 : $H=15m$; pente = 45°

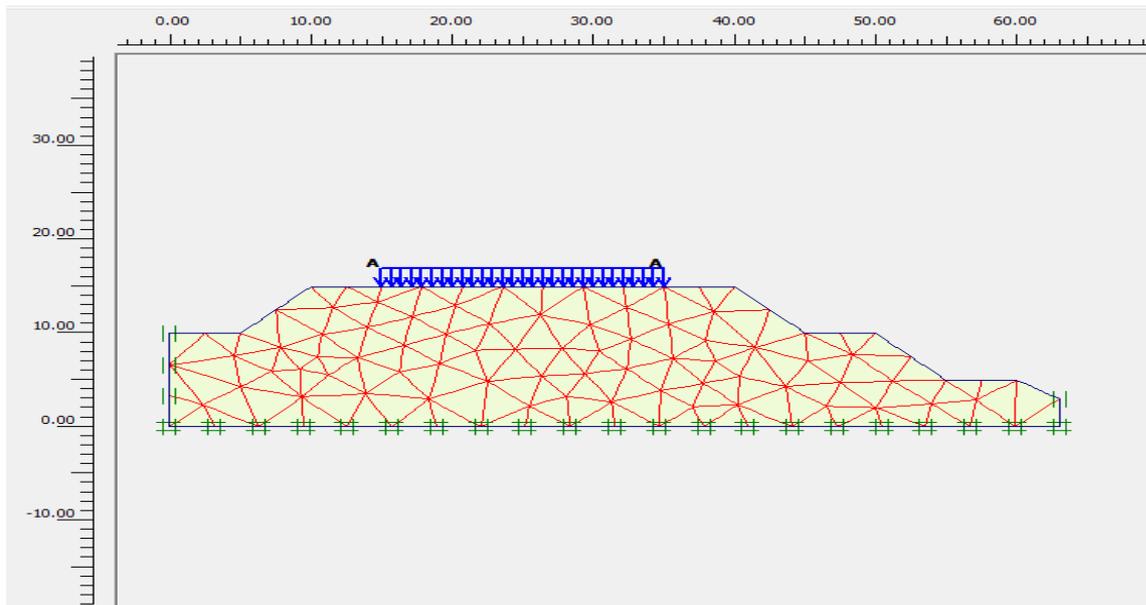


Fig. 75 Déformation du remblai en marne naturelle

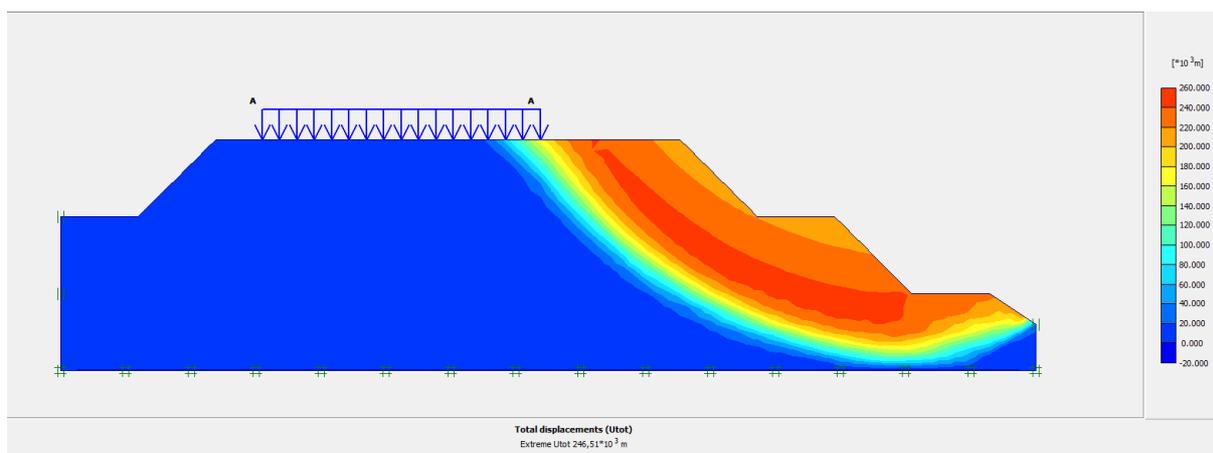


Fig. 76 Les lignes de rupture du remblai de la marne naturelle

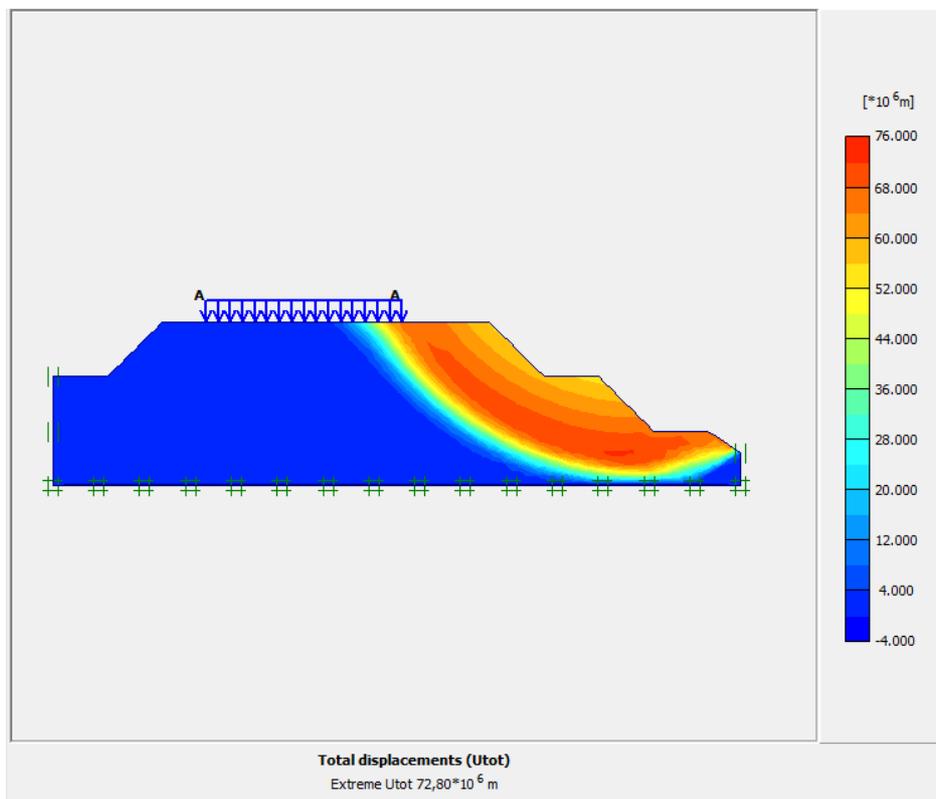


Fig. 77 Les lignes de rupture du remblai de la marne traitée à 6% (pente 45°)

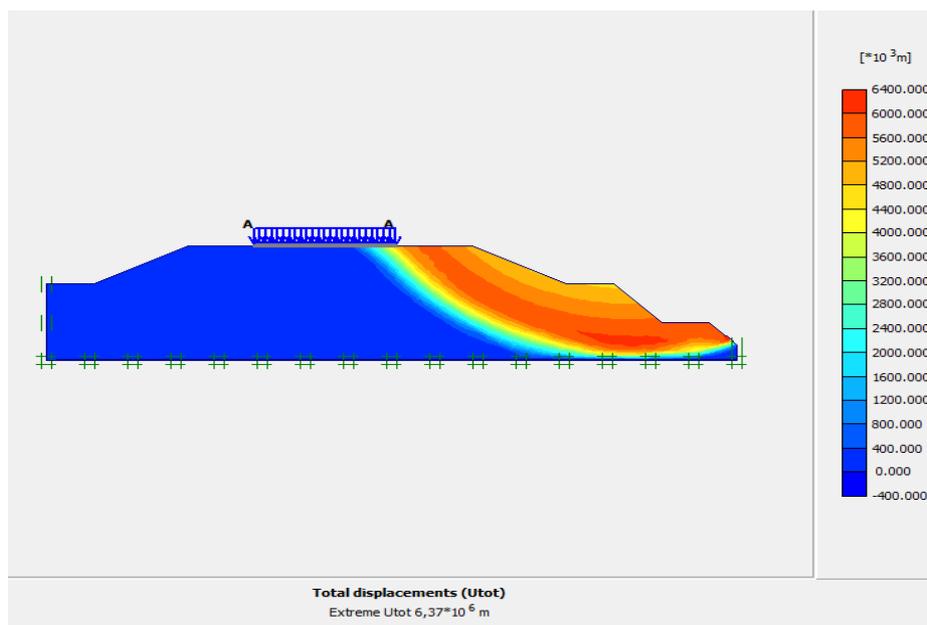


Fig. 78 Les lignes de rupture du remblai de la marne traitée à 10% (pente 45°)

Cas 2 : $H=15m$; pente= 60°

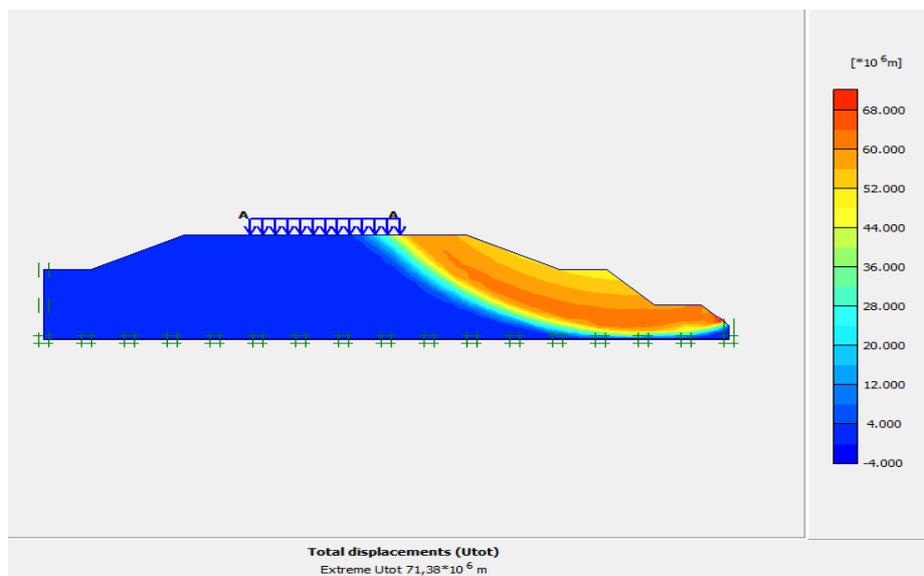


Fig. 79 Les lignes de rupture du remblai de la marne traitée à 6% (pente 60°)

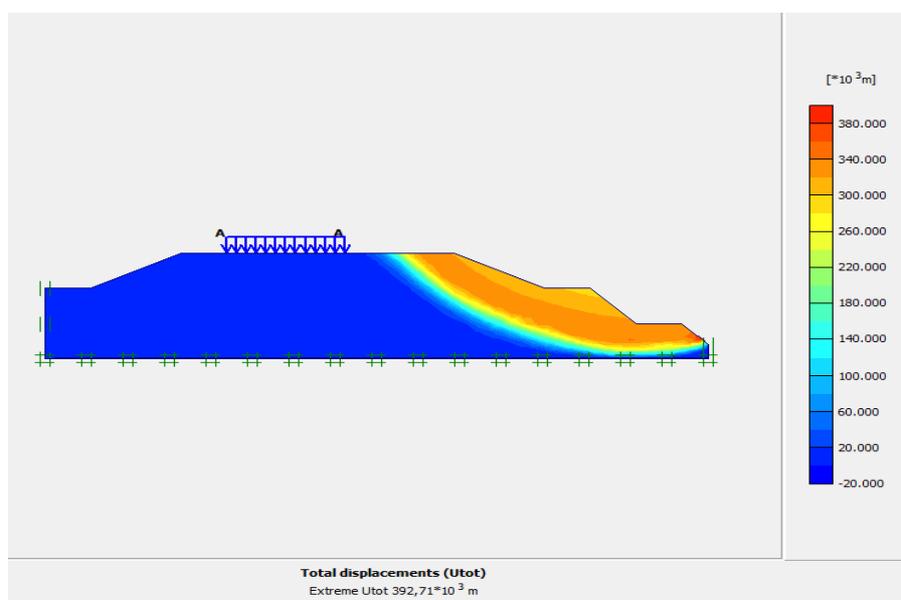


Fig. 80 Les lignes de rupture du remblai de la marne traitée à 10% (pente 60°)

Le tableau suivant donne les valeurs des facteurs de sécurité des talus de remblais avant et après traitement.

	Pentes	Marne naturelle		Marne traitée Coquille – Zéolite 6%		Marne traitée Coquille – Zéolite 10%	
		Fs (q=0 kN/m ²)	Fs (q=50 kN/m ²)	Fs (q=0 kN/m ²)	Fs (q=50 kN/m ²)	Fs (q=0 kN/m ²)	Fs (q=50 kN/m ²)
15 m	45°	0,94	0,73	2,73	2,22	2,61	2,21
	60°	0,91	0,70	2,89	2,33	2,76	2,33

Tab. 27 : Facteurs de sécurité des remblais instables après renforcement

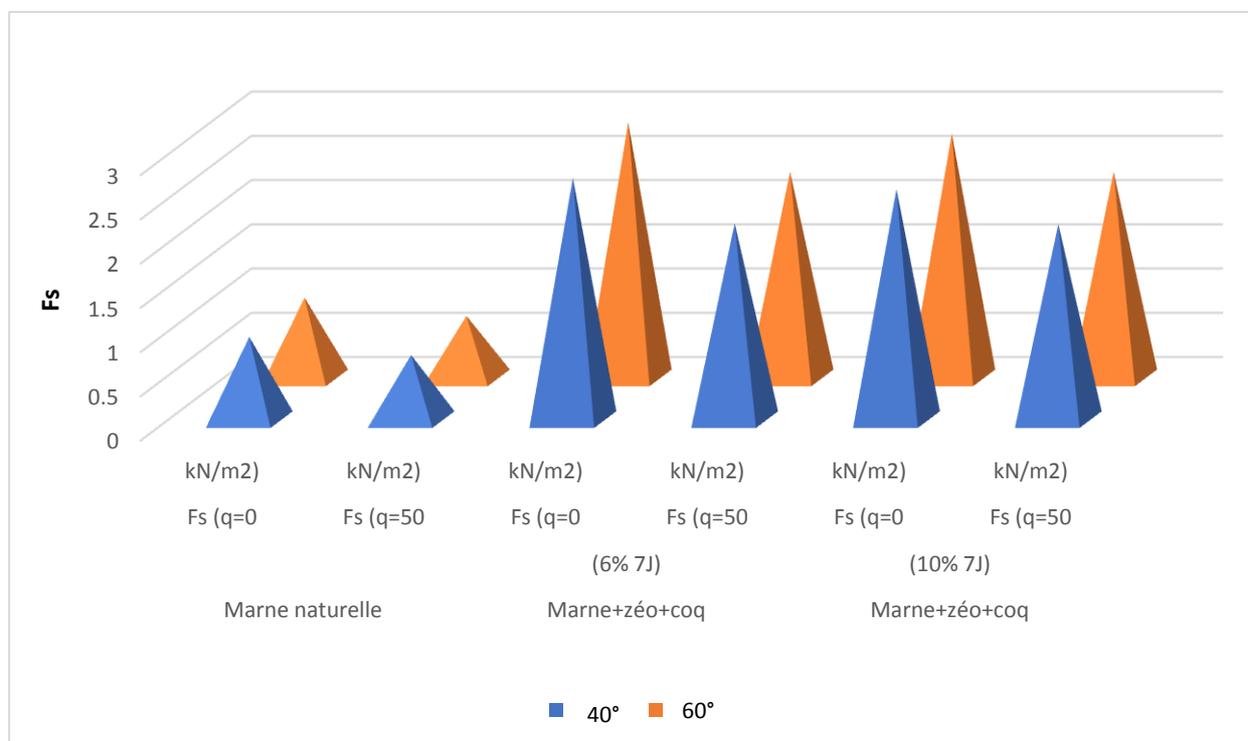


Fig. 81 Coefficient de sécurité en fonction de la pente avant et après traitement avec et sans chargement (H=15m)

Pour notre hauteur (15 m) et différentes pentes (45°, 60°), le remblai en marne naturelle est instable avec un $F_s < 1,5$ avec et sans surcharge. En revanche, pour le sol traité à la coquille et la zéolite, avec et sans surcharge F_s est significativement $> 1,5$. En conséquence, le traitement des remblais permet de concevoir des remblais avec des pentes plus fortes, ce qui réduit le volume de matériaux nécessaire pour la construction du remblai et la surface occupée à la base notamment pour les sites d'accès difficile et à emprise limité.

5. CONCLUSION

L'étude numérique menée à travers ce chapitre montre que le traitement de la marne, initialement inadaptées, permet de pallier ce problème en améliorant ses propriétés mécaniques.

Nous avons utilisé le logiciel Plaxis pour modéliser un modèle de pente de remblai d'une hauteur de 15 m et de deux pentes différentes (45° , 60°). Les résultats montrent que la stabilité au glissement de la pente dans toutes les géométries du remblai, initialement la marne à l'état naturel est instable. Après traitement, les remblais deviennent stables grâce à l'action des produits de traitement.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le traitement des sols avec des liants chimiques, est aujourd'hui une méthode éprouvée, et qui est en continuel progrès et innovation. En effet, elle offre de nombreux avantages, tant en termes d'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols traités, que sur le plan de rentabilité économique. Cependant, cette technique nécessite la réalisation d'étude de formulation car que les sols étant extrêmement variable.

A travers l'étude expérimentale menée au laboratoire, nous avons tenté, dans les limites de temps et de moyens qui nous ont été disponibles, de mieux comprendre la nature et le comportement de la marne de Mila sans et avec le traitement combiné à la coquille d'œuf calcinée et la zéolite.

Sur la base des résultats obtenus lors de l'étude expérimentale et numérique, les conclusions suivantes ont pu être tirées :

- On a constaté une amélioration de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation des dosages pour l'ensemble des proportions (Coquille – Zéolite). Les résistances de la marne traitée à 6% sont légèrement supérieures à la marne traitée à 10% avec des rapports d'amélioration variants entre 5 à 7 fois par rapport à la résistance de la marne naturelle.
- La meilleure résistance à la compression a été obtenue pour la proportion coquille – zéolite 40 – 60 et cela pour les deux dosages en liant 6% et 10%. Cette proportion est considérée comme optimale par rapport aux autres.
- Le traitement de la marne a changé son comportement plastique ductile à un comportement fragile rigide.
- L'angle de frottement augmente en fonction de l'augmentation du dosage, le traitement combiné Coquille – Zéolite a neutralisé une partie de l'argilosité de la marne et son comportement est devenu similaire à un sol granulaire à cause de l'agglomération des particules fines de l'argile.
- La cohésion a augmenté à 6% puis a diminué à 10%, d'une part, l'augmentation est due à la création de liaisons hydratées entre le sol et le liant combiné coquille - zéolite et, d'autre part, la diminution est expliquée par l'effet inverse du surdosage en coquille - zéolite sur la prise et le durcissement du mélange avec le sol.
- Les résultats de l'étude numérique de stabilité de talus d'un grand remblai ont montré que le remblai construit avec la marne traitée est stable vis-à-vis le glissement alors qu'il a été initialement instable en utilisant la marne naturelle.

Finalement, nous pouvons conclure que le traitement à la coquille d'œuf et la zéolite a montré ces performances en matière d'amélioration des caractéristiques géotechniques de la marne de Mila.

REFERENCES

- [1] Lakhdari Kahina. Amélioration de la résistance mécanique à l'action de l'eau d'un sable par incorporation des stabilisants. Mémoire de Master. Université Mouloud Mammeri-Tizi-Ouzou (2016).
- [2] Barka Zeineb, Ait Brahim Nehla. Etude du comportement d'une marne argileuse traitée pour valorisation dans les projets routiers. Mémoire de Master. Université 8 Mai 1945-Guelma (2017).
- [3] Site internet: http://keepschool.com/fiches-de-cours/lycee/svt-biologie/sols_proprietes-formation.html#
- [4] Guefaifia Lamia, Benrdjem Hiba. Traitement et renforcement d'un sol fin par différentes techniques d'amélioration : étude expérimentale et numérique. Mémoire de Master. Université 8 Mai 1945-Guelma (2020).
- [5] Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme (GTR). Editions du SETRA-LCPC, Fascicules I & II, 2000, 98.
- [6] Bensaifi El amin. Etude du comportement des marnes et des matériaux argileux gonflants : traitement et réutilisation dans les projets routiers. Thèse de Doctorat. Université 8 mai 1945-Guelma (2021).
- [7] Boumzaout Nada, Benamara Meryem, Nouredine Khaoula. Amélioration d'un sol argileux par le laitier de haut fourneau activé par la poudre de dolomie. Mémoire de Master. Université 8 mai 1945-Guelma (2019).
- [8] Abdelhadi El Hachemi. Argile Minéraux Argileux : propriétés physico-chimiques et propriétés colloïde. Mémoire de Master. Université Abdelmalek Essaadi de Tétouan-Maroc (2013).

[9] Krikou Mohammed el-akhdar. Caractérisation et amélioration des propriétés mécaniques de l'argile de DIDOUCHE (Constantine) par ajout de Liants (La chaux).Mémoire de Master. Université L'arbi Ben Mhidi-Oum El Bouaghi (2018).

[10] Bourhail Ferial. Etude Comparative sur le Comportement des sols fins traités à la Chaux. Mémoire de Master. Université L'arbi Ben Mhidi-Oum El Bouaghi (2019).

[11] Berrabah Fouad. Étude du comportement des remblais renforcés par des géosynthétiques sur sols marécageux. Mémoire de Master. Université Mohamed Khider– Biskra (2010).

[12] F.Lamas, C. Irigaray, C.Oteo,J. Chacon.Selection of the most appropriate method to determine the carboate content for engineering purposes with particular regard to marls. Engineering Geology (2005).

[13] Charles Pomerol. MARNES. Encyclopédie Universalis (en ligne). consulté le 1 Juin 2021. URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/marnes/>.

[14] Alili Boudjema. Caractérisation mécanique et minéralogique des marnes de la Grande Kabylie (Application aux marnes du Sud et de l'Ouest). Mémoire de Master. Université Mouloud Mammeri-Tizi-Ouzou (2015).

[15] Oudni selma. Effet du traitement des sols limoneux par la chaux sur lrs caractéristiques de compactage. Mémoire de Master.Université L'arbi Ben Mhidi- Oum El Bouaghi (2018).

[16] (Amélioration des sols- université de la réunion – Natasha sertier, jean Charles bordeaux, alain, assina, 2005-2006, p2)

[17] (etude de stabilisation chimique des sols – boudjadja rafika, benkedidah amina- 2017-2018, p20 à p23)

[18] Caractérisation et utilisation de poussières de four de ciment CKD dans la stabilisation/solidification des déchets de l'unité B.C.R Borj-Ménail Boumerdes. Khouan, Faiza; Lebdiri,... 2016- univ bejaia)

[19] (Suksun Horpibulsuk, Chayakrit Phetchuay, Avirut Chinkulkijniwat, Arnon Cholaphatsorn. Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash. Soils and Foundations. 53:477-486 (2013).)

[20] Hamlaoui asma. comportement d'une marne stabilisee par differents agents de traitement . Mémoire de Master. Université 8 mai 1945-Guelma (2021).

[21] (Sachin N. Bhavsar Hiral B. Joshi Priyanka K. Shrof Patel Ankit J. Impact of Marble Powder on Engineering Properties of Black Cotton Soil. International Journal for Scientific Research & Development. V 2 (2014).

[22] (wikipedia).

[23] <https://mineralmilling.com/fr/refractaire/poudre-de-verre/>

[24] (Jair J.A. Baldovino, Ronaldo L.S. Izzo, Juliana L. Rose, Matheus D.I. Domingos. Strength, durability, and microstructure of geopolymers based on recycled-glass powder waste and dolomitic lime for soil stabilization. Construction and Building Materials. V 271 (2021).

[25] (Etude expérimentale et théorique de procédés de valorisation de sous-produits oléicoles par voies thermique et physico-chimique, these Ajmia CHOUCHE)

[26] (https://www.argeco.fr/le_metakaolin.php)

[27] (<https://www.ladepeche.fr/article/2011/05/10/1078062-metakaolins-pour-quoi-faire.html>)

[28] (Yongfeng Deng, Xibing Yue, Songyu Liu , Yonggui Chen, Dingwen Zhang. Hydraulic conductivity of cement-stabilized marine clay with metakaolin and its correlation with pore size distribution. Engineering Geology. 193 :46-152 (2015).

[29] (Roche PH (1995). Mémento roches et minéraux industriels. Zéolithes naturelles. Rapport BRGM R 38759,72P.)

[30] Mémoire de master, Université du Québec A Trois-Rivières ,80P.) (Gres M(1979).Memento substances utiles (materieux de carraires) .les zéolithes .Bureau de recherches geologique et Minieres,9 P.)

[31] (Françoise Nau, Catherine Guérin-Dubiard, Florence Baron et Jean-Louis Thapon, Science et technologie de l'œuf : Volume 2, De l'œuf aux ovoproduits, Lavoisier, 2010 (lire en ligne [archive]), p. 4.)

[32][http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/Expose\(Etudiant_Amelioration_des_sols.pdf\)](http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/Expose(Etudiant_Amelioration_des_sols.pdf)) consulté le 24/05/2022

[33] Lamouri adel. Utilisation des méthodes numérique dans les calculs de la stabilité des barrages en teere. Département aménagement et génie hydraulique. École nationale supérieure hydraulique. Arbaoui abdellah 2015.

34 LEVASSEUR, S (2007) Analyse inverse en géotechnique : développement d'une méthode à base d'algorithmes génétiques. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble I.

[35] MESTAT,P (2002) Modélisation élastoplastique des sols. In Elastoplasticité des sols et des roches. Modèle de comportement des sols et des roches 1. Sous la direction de P.Y. Hicher et J.F. Shao. Hermès science.

[36] NOVA, R (2005) Fondements de la mécanique des sols. Hermes Science.

[37] SCHANZ, T, VERMEER, P.A and BONNIER, P.G (1999) formulation and verification of the hardening soil model. In Computational Geotechnics, pp. 281–290.

[38] DUNCAN, J.M and CHANG,Y.Y (1970) nonlinear analysis of stress and strain in soils.Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division.ASCE,Vol.96, pp.1629.

[39] Ali dahou. Comportement mécanique de la marne de la région de Ghardaïa sans et avec le traitement au ciment. Mémoire de matser Université de Ghardaïa 2020.

[40] Pierre ROSSI, Ludovic GAVOIS et Guy RAOUL. Techniques de l'ingénieur GTS « traitement des matériaux ». février 2017

[41] www.toutpourleforage.com/quest-ce-quun-tirant-dancrage/ consulté le 27/05/2022

[42] www.rapport-gratuit.com/le-clouage-des-sols/ consulté le 27/05/2022

[43] www.keller-france.com/expertise/techniques/colonnes-ballastees/ consulté le 27/05/2022