



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Abidine Valili Moulaye Abdallah & Guesmia Hamza

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : TRAVAUX PUBLICS

OPTION : VOIE ET OUVRAGES D'ART

Thème

**RENFORCEMENT D'UN SOL MOU SOUS REMBLAI
ROUTIER**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Nouioua Tahar	M.A. A	Président
Annane.Abdallah	M.A. A	Examinateur
Rachidi Nouari	M.A. A	Rapporteur
Bachiri Attia	M.C. B	Co-rapporteur

Promotion : juillet – 2022

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage pour réaliser ce travail.

On tient à remercier Notre encadreur Mr. Rachidi Nouari et notre Co encadrer Mr. Bachiri Attia pour leur suivi continu ainsi que leur bonne orientation du travail.

Nos remerciements vont également à nos professeurs pour leurs conseils précieux.

On remercie également les membres de jury D'avoir acceptés de nous honorer par leur présence à la soutenance de notre mémoire de fin d'étude.

Enfin, on remercie tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin afin d'achever ce travail, en particulier mes collègues.

ABIDINE Valili Moulaye Abdellah

Geussmia hamza

Dédicaces

À mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection

À mes chers frères et sœurs, source de joie et de bonheur

À toute ma famille, source d'espoir et de motivation

À tous mes amis, particulièrement ceux d'enfance

À vous cher lecteur

ABIDINE Valili Moulaye Abdellah

إهداء

الحمد لله وكفى والصلاة والسلام على النبي المصطفى وعلى أهله ومن وفى

الحمد لله الذي وفقنا لنتمين هذه الخطوة في مسيرتنا ومشوارنا الدراسي بمذكرتنا هذه ثمرة الجهد والنجاح بفضلته تعالى مهداة إلى:

- الوالدين الكريمين حفظهما الله وأدامهما نورا لدربي ورزقني برهما.
 - زوجتي فاطمة التي أكرمني الله بها فكانت السند والظهر بارك الله لي فيك.
 - ولدي العزيز محمد إبراهيم الخليل الذي هو قطعة من قلبي وقرّة عيني ومؤنسي وصاحبي فاللهم احفظه لي وبارك لي فيه و اجعله براً رضيعاً وارزقه الصلاح .
 - الإخوة: علي، عبد القادر، لعجال، يوسف، دخة، معمر وخالد
- حفظكم الله وبارك فيكم.

• الأساتذة الكرام الذين كانوا مشعلا ينير لنا الدرب:

رشيدي نواري، بشيري عطية، بدرينة المداني، الاستاذة قطيشة مسعودة، عنان عبد الله

بيقع السعيد (مهندس بمخبر الهندسة المدنية)

- رفقاء الدرب الذين تقاسموا معي المشوار: فاليلى، جعفر، الياس، ياسين، مصطفى، عبد القادر، مكي، صفوان.

• كل قسم الهندسة المدنية ومخبر الهندسة المدنية وكل دفعة 2022

- كل من كان لهم أثر من قريب أو من بعيد.

قسمة حمزة

ملخص الدراسة

تعتبر طرق تحسين التربة الرخوة إحدى الأدوات المتاحة للمهندس لمعالجة مشاكل عدم الاستقرار التي يواجهها أثناء إنجاز المشروع. بحيث تسمح بتحسين الخصائص الجيوتقنية والخصائص الميكانيكية للتربة الرخوة وتعتبر فعالة. بعض هذه الطرق قديمة جداً، مثل دق أعمدة خشبية في تربة منخفضة. والبعض الآخر أحدث، مثل الحقن أو الرص أو التجميد. وقد خضعت لتطور كبير على مدى السنوات الماضية وما زالت تستخدم الآن كجزء لا يتجزأ من المشاريع ذات الارضيات.

نقدم في هذا البحث طرق التحسين للمواقع القابلة للانضغاط. حيث تم التركيز على طريقة الأعمدة الحجرية التي تعمل على زيادة مقاومة التربة والتقليل من تشوهاتها بالاعتماد على برنامج الحساب بلاكسيس لنمذجة ردم ترابي لطريق فوق تربة هشة مشبعة. وتم التوصل الى نتائج معتبرة.

الكلمات المفتاحية: ردم ترابي لطريق، تربة هشة، أعمدة حجرية، انضغاط، بلاكسيس.

Résumé

Les méthodes d'amélioration des sols mous sous remblai routier sont des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. Plusieurs techniques ont été développées par les ingénieurs au cours des dernières années. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains. On présente dans ce travail les méthodes de renforcement des sites compressibles et principalement les colonnes ballastées. On a étudié le comportement d'un remblai routier reposant sur un sol mou renforcé en utilisant le code de calcul Plaxis2D.

Mots-clés : remblai routier ; sol compressible ; colonnes ballastes ; tassement ; Plaxis2D.

Abstract

Methods for improving soft soils under road embankments are one of the tools available to the engineer to solve stability or deformation problems encountered during project development. Engineers have developed several techniques in recent years. They allow the improvement of the geotechnical characteristics and the mechanical properties of the grounds. In this thesis, we present the reinforcement methods of compressible sites and mainly the stone columns. The behavior of a road embankment resting on reinforced soft soil was studied using the Plaxis2D calculation code.

Keywords: road embankment; soft soil; stone columns; settlement; Plaxis2D.

Table des matières

<i>REMERCIEMENTS</i>	I
<i>Dédicaces</i>	II
ملخص الدراسة	IV
Table des matières	V
Table des figures	VIII
Liste des tableaux	X
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I.....	3
I.1. INTRODUCTION	4
I.2. Généralités sur les routes	4
I.2.1. Définition de la route	4
I.2.2. Historique.....	5
I.2.3. Constitution des structures de chaussée	5
I.3. Principe de la constitution de la chaussée	7
I.4. Différents types de structures de chaussée	7
I.4.1. Les chaussées souples	7
I.4.2. Les chaussées semi-rigides	8
I.4.3. Les chaussées rigides	9
I.5. Types de routes.....	10
I.5.1. Routes principales	10
I.5.2. Routes locales et secondaires	11
I.5.3. Routes carrossables	11
I.6. Classements routiers	12
I.6.1. Classification basée sur l'emplacement de la route	12
I.6.2. Classification sur la base de la supervision, de la planification et de la conception..	12
I.6.3. Classification basée sur le type de matériaux utilisés pour construire la route.....	13
I.7. Généralités sur les remblais (matériaux, comportement, ...)	13
I.7.2.1. Sortie de forage.....	15
I.7.2.2. Casser des pierres.....	15
I.7.2.3. Le sable	15
I.7.2.4. Le gravier	15
I.8. Applications de remblayage.....	16
I.8.1. La bonne façon de remblayer.....	16
I.8.2. Les étapes du processus de remblayage et comment le calculer.....	17
I.8.3. Quand commence le processus de remblayage.....	17

I.8.4.	Comment calculer le montant du remblai	17
I.9.	Le remblaiement	17
I.10.	Les remblais de grande hauteur	17
I.11.	La Géométrie du remblai.....	18
I.12.	Problèmes posés par la construction des remblais sur sols compressibles	19
I.13.	Conclusion	20
Chapitre II		21
II.1.	Introduction	22
II.2.	Definition des sols compressibles.....	22
II.3.	Compressibilité du sol.....	23
II.4.	Les types de sols compressibles	24
II.5.	Propriétés caractéristiques des sols compressibles	28
II.6.	Comportements et caractéristiques des remblais sur sols compressibles	29
II.7.	Conclusion	35
Chapitre III		36
III.1.	Introduction.....	37
III.2.	Le pré chargement	37
III.3.	Les drains verticaux	38
III.4.	Les techniques d'amélioration par vibrations profondes	40
III.4.1.	Le compactage dynamique (ou pilonnage)	40
III.5.	Les techniques d'amélioration par inclusion (renforcement).....	42
III.5.1.	Jet Grouting.....	42
III.5.2.	Les inclusions rigides.....	43
III.5.3.	Les plots ballastés	45
III.5.4.	Les colonnes ballastées	47
III.5.5.	Objectif de traitement.....	48
III.5.7.	Mode opératoire	49
III.5.8.	Colonnes exécutées par voie humide	50
III.5.9.	Colonnes exécutées par voie sèche	50
III.5.10.	Colonnes ballastées pilonnées (« pieux de gravier Frankie »).....	52
III.5.11.	Les avantages	53
II.6.	Conclusion	53
Chapitre IV		54
IV.1.	Introduction.....	55
IV.2.	Code de calcul en éléments finis Plaxis 2D	55
IV.2.1.	PLAXIS-Input.....	55

IV.2.2. PLAXIS - calculation.....	56
IV.2.3. PLAXIS - Output	56
IV.2.4. PLAXIS - Curves.....	56
IV.3. Visualisation des Résultats.....	57
IV.4. Présentation du modèle étudié	58
IV.5. Caractéristiques des matériaux utilisés	59
IV.6. Phases de calcul.....	61
IV.7. Analyse des résultats.....	62
IV.7.1. Analyse du tassement de consolidation	63
IV.7.2 Analyse de la surpression interstitielle.....	63
IV.7.3 Analyse du facteur de sécurité	64
IV.8. CONCLUSION	66
Conclusion Générale	67
Références bibliographiques :	68

Table des figures

Chapitre I

Figure I.1 Coupe transversale d'une chaussée.	05
Figure I.2 : Structure d'une chaussée souple.	08
Figure I.3. Structure d'une chaussée semi-rigide.	09
Figure I.4 : Structures d'une chaussée rigide.	10
Figure.I.5 : Image d'une route principale.....	11
Figure I.6 : Routes locales et secondaires	11
Figure I.7 : Routes carrossables.....	12
Figure I.8 : Autoroutes	13
Figure I.9 : Exemples de Remblai	14
Figure I.10 : Types de Remblai (ferroviaire, routier).....	15
Figure I.11 : Remblai de grande hauteur	18
Figure I.12 : Caractéristiques géométrique d'un remblai	19

Chapitre II

Figure II.1 : Argile du Quaternaire, Estonie	26
Figure II.2 : Tranches de tourbe noire mises à sécher pour utilisation comme combustible. 26	
Figure II.3: Limon séché.....	27
Figure II.4: Les marnes bleues contiennent souvent des fossiles.	27
Figure II. 5 : Schémas types de rupture de remblai sur sols mous.....	29
Figure II. 6 : Mécanismes de rupture des remblais sur sols compressibles	30
Figure II.7 : Les argiles en tant que roches.	33
Figure II.8: Les argiles en tant que roches.	34

Chapitre III

Figure III.1 : Principe de pré chargement pour le contrôle des tassements	38
Figure III.2 : Chantier de réalisation des drains verticaux.....	39
Figure III.3 : Réseaux de drains de sable verticaux.	39
Figure III.4 : Exemple d'un pilon (à gauche) et l'empreinte laissée après sa chute (à droite).40	

Figure III.5 : Exemple d'un pilon (à gauche) et l'empreinte laissée après sa chute (à droite)	41
Figure III.6 : Etat de compacité du sol avant et après traitement.	42
Figure III.7 : Différentes étapes de la réalisation d'une colonne de Jet Grouting	43
Figure III.8 : Réseau d'inclusions rigides	43
Figure III.9 : Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides verticales	44
Figure III.10 : Réseau d'inclusions soumis à un chargement	45
Figure III.11 : Principe de réalisation des plots ballastés	45
Figure III.12 : Engin utilisé pour la réalisation des plots ballastés	46
Figure III.13 : Mise en œuvre des plots ballastés	47
Figure III.14 : Plot ballasté avant remblaiement type	47
Figure III.15 : Les sols concernés par la technique des colonnes ballastées	49
Figure III.16 : Mise en œuvre des colonnes ballastées par voie humide	50
Figure III.17 : Mise en œuvre des colonnes ballastées par voie sèche	51
Figure III.18 : Colonnes ballastées réalisées par voie sèche	51
Figure III.19 : Mise en œuvre des colonnes pilonnées.	52

Chapitre IV

Figure IV.1 : Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Output	56
Figure IV.2 : Définition des paramètres des matériaux.	57
Figure IV.3 : Géométrie du modèle de remblai	58
Figure IV.4 : Position des nœuds.	59
Figure IV.5 : Maillage du modèle	59
Figure IV.6 : Courbe du tassement de consolidation	63
Figure IV.7 : Courbe de Variation de la surpression interstitielle	64
Figure IV.8 : Déplacement total.	64
Figure IV.9 : Graphe du facteur de sécurité pour le sol renforcé	65
Figure IV.10 : Graphe du facteur de sécurité pour le sol non renforcé	6

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.5.1 : Propriétés caractéristiques des sols compressibles..... 28

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Propriétés des matériaux de remblai et des couches de sol 59

Tableau IV.2 : Propriétés matériaux des Colonnes ballastées et du Matelas de répartition. . 61

Tableau IV.3 : Les phases de calcul à suivre 62

Notations et abréviations

<i>Symbole</i>	<i>Unité</i>	<i>Description</i>
γ_h	kN/m ³	Poids volumique Humide.
γ_{sat}	kN/m ³	Poids volumique saturé.
γ'	kN/m ³	Poids volumique déjaugé du sol.
ε_h	%	Déformation horizontal.
ε_v	%	Déformation vertical.
ν	°	Coefficient de Poisson.
σ	kPa	Contrainte
ϕ'	°	Angle de frottement effectif interne du sol.
ψ	°	Angle de dilatance du sol.
Cu	kPa	Résistance au cisaillement non drainé.
OCR	/	Rapport de surconsolidation.
C'	kPa	Cohésion effective en condition drainée du sol.
C α	/	Indice de compression secondaire
Cc	/	Indice de compression primaire
Cs	/	Indice de gonflement
Cv	m ² /jour	Coefficient de consolidation.
e ₀	/	Indice des vides initial.
E	kPa	Module d'Young.
E_{50}^{ref}	kPa	Module sécant dans un essai triaxial.
E_{oed}^{ref}	kPa	Module tangent dans un essai œdométrique.
E_{ur}^{ref}	kPa	Module en décharge.
EA	kN/ml	Rigidité normale.
F _s	/	Facteur de sécurité
K ₀	/	Coefficient des terres au repos.
K _x	m/jour	Perméabilité horizontale.
K _y	m/jour	Perméabilité verticale.
p _{ref}	kPa	Contraintes de référence.
I _p	/	Indice de plasticité.

INTRODUCTION GENERALE

Au début des années soixante, le parc automobile en Algérie a commencé à accroître, ce qui nécessitait l'extension du réseau routier. Plusieurs difficultés ont été rencontrées lors de la construction des premières autoroutes. Pour cette raison, un vaste programme de recherches théoriques et expérimentales a été engagé afin de développer une méthodologie scientifique et technique pour l'étude des remblais sur sols compressibles (argiles molles, vases, tourbes). Ces recherches visaient à comprendre le comportement mécanique des sols compressibles et sur leur variabilité naturelle et ses implications pratiques sur le dimensionnement, le coût et la sécurité des ouvrages. Elles ont porté essentiellement sur la mesure de ces propriétés en laboratoire et en place, sur les appareils de mesure (tassements, pressions interstitielles, etc.), sur les méthodes de calcul de stabilité des remblais sur sols mous et sur le calcul des amplitudes et des vitesses de tassements des couches de sol sous-jacentes, ainsi que sur les techniques de renforcement des remblais. Les résultats d'essais in-situ et en laboratoire obtenus sur un grand nombre de sites expérimentaux ont permis de mettre à la disposition des projeteurs et constructeurs des moyens de calculs et des recommandations pratiques pour l'étude et la construction des remblais ou d'autres ouvrages en terre.

Un certain nombre de techniques sont disponibles pour améliorer le comportement géotechnique du remblai sur sol compressible comme le renforcement avec les inclusions rigides, les colonnes ballastées.

Le renforcement des sols consiste à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique (vibrations par exemple) ou par l'inclusion dans le sol ou le mélange au sol d'un matériau plus résistant dans le but de :

- Augmenter la capacité portante ou la résistance au cisaillement ;
- Diminuer les tassements (absolus que différentiels) et le cas échéant les accélérer ;
- Diminuer ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de séisme.

Les champs d'application des différentes techniques dépendent essentiellement de la nature et de la granulométrie des terrains que l'on désire améliorer. La méthode de traitement par colonnes

ballastées consiste à remplacer une partie du sol par un matériau granulaire, possédant un angle de frottement interne élevé et une cohésion négligeable.

L'objectif de ce travail, est d'étudier l'efficacité du renforcement par colonnes ballastées d'un sol compressible supportant un remblai routier. Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence l'influence de cette technique sur l'accélération de la consolidation, la réduction du tassement ainsi que l'augmentation du facteur de sécurité.

Pour mener à bien notre travail, le présent manuscrit a été structuré comme suit :

Après une introduction générale, l'essentiel du travail a été divisé en quatre chapitres ;

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les routes et les remblais ;

Le deuxième chapitre est dédié à la Présentation du comportement des sols compressibles (mous);

Le troisième chapitre est consacré aux différentes techniques et méthodes de renforcement des sols;

Le quatrième chapitre présente la Modélisation Numérique, le Principe, les points forts de PLAXIS2D, les étapes de modélisation par PLAXIS ;

Enfin, une conclusion générale qui reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude est présentée.

Chapitre I

GENERALITES SUR LES ROUTES ET LES REMBLAIS

I.1. INTRODUCTION

Le passage parfois par des sols possèdent des faibles caractéristiques physico-mécanique (les sols compressibles) pose un problème de stabilité ou de déformation des ouvrages en terre. Pour résoudre ces problèmes les ingénieurs disposent de nombreuses techniques d'amélioration de sol.

Il existe différentes méthodes de renforcement des sols, plus ou moins anciennes (le battage...) et plus ou moins développées (pilonnage...).

Dans ce présent chapitre, nous présentons des généralités sur la route avec ses parties dans la première partie. Dans la 2^{ème} parties nous présentons des généralités sur les remblais avec ses types.

I.2. Généralités sur les routes

Depuis la création de l'univers, Dieu a donné une grande richesse à l'homme en l'occurrence la terre c'est ainsi que le domaine de route constitue une partie très importante du patrimoine national d'un pays. Elle est alors un facteur très important de développement économique et social ; entre les villes, les provinces, les pays et des civilisations.

I.2.1. Définition de la route

Le mot route vient du mot latin « viarupta » qui signifie « voie frayée » c'est donc une voie de communication terrestre permettant de relier un point à une autre, un village à un autre, etc [1].

Nous allons également définir la route moderne comme étant « un espace correctement aménagé pour recevoir un ou plusieurs courants de circulation construite dans le respect des règles d'art ».

Une route est une bande de terrain avec des chemins préparés pour la circulation des voitures et autres véhicules sur roues. Les routes relient les zones urbaines entre elles, ainsi qu'aux zones rurales. Les routes qui traversent les villes sont appelées rues. Les routes sont d'une importance vitale, car les agriculteurs les utilisent pour transporter leurs récoltes vers les marchés, et de gros camions les empruntent pour distribuer la production industrielle d'une région à l'autre. Il est également coupé par les voitures, les bus, les vélos et autres moyens de transport à des fins utilitaires et récréatives [1].

La route permet les moyens de transport tels que les voitures, les camions, les bicyclettes et autres marches et déplacements afin de répondre à des besoins importants ou récréatifs et de transporter des marchandises et d'autres objectifs. terre et d'autres sont pavés ou recouverts d'asphalte [2].

I.2.2. Historique

Les premières routes sont liées à l'invention de la roue, du char et des charriots. Les Chinois disposaient d'un vaste réseau de routes. La " route de la soie " est un axe commercial très ancien. Les Romains ont développé le premier grand réseau routier pavé par des esclaves. La plupart des anciennes voies romaines existent toujours. Dans le passé les routes étaient entretenues par la corvée, l'impôt en nature, sous forme de prestations imposées de travail ou d'apports de matériaux (cailloux, silex, chaux). En ville, dans la plupart des pays les riverains doivent toujours entretenir trottoir et caniveau. Une partie importante des impôts sert encore à la construction, à l'entretien et à l'éclairage des routes.

L'Algérie dispose d'un réseau routier diversifié, des autoroutes et des routes nationales asphaltées, ainsi que des moyens de transport modernes et avancés tels que les trains à grande vitesse. Et le train express provincial. Métro et tramway. Transport suspendu téléphérique

I.2.3. Constitution des structures de chaussée

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches mises en œuvre sur un ensemble appelé plate-forme de chaussée, constituée du sol terrassé, le plus souvent surmonté d'une couche de forme (Figure I.1) [7]

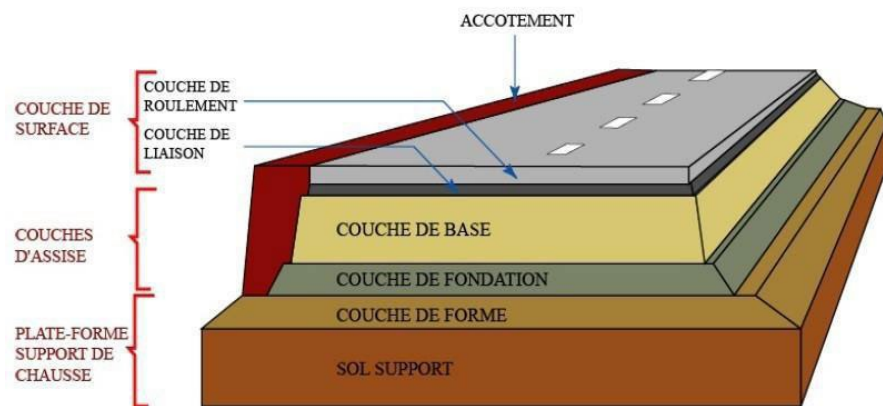


Figure I.1 Coupe transversale d'une chaussée.

a) **Couche de forme**

La couche de forme est une structure plus ou moins complexe qui sert à adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou de terrain naturel aux caractéristiques mécaniques, géométriques et thermiques requises pour optimiser les couches de chaussée. Elle n'y est utilisée que pour opérer de corrections géométriques et améliorer la portance du sol support à long terme. L'épaisseur de la couche de forme est en général entre 40 et 70 cm. [8]

b) **La couche d'assise**

L'assise de chaussée se décompose en deux sous-couches :

- **Couche de fondation :**

Complètement en matériaux non traités elle substitue en partie le rôle du sol support, en permettant l'homogénéisation des contraintes transmises par le trafic. Assurer une bonne unie et bonne portance de la chaussée finie, et aussi, Elle a le même rôle que celui de la couche de base [7].

- **Couche de base :**

La couche de base est formée en générale de grave concassée ou de grave bitume, tuf, sable gypseux, [8]

La couche de base joue un rôle essentiel, elle existe dans toutes les chaussées, elle résiste aux déformations permanentes sous l'effet de trafic ainsi lâche de sol, elle reprend les efforts verticaux et repartis les contraintes normales qui en résultent sur les couches sous-jacentes. L'épaisseur de la couche de base varie entre 10 et 25 cm. [7 ; 8]

c) **La couche de surface**

La couche de surface est en contact direct avec les pneumatiques des véhicules et les charges extérieures. Elle a pour rôle essentiel d'encaisser les efforts de cisaillement provoqués par la circulation. Elle est en générale composée d'une :

- **Couche de liaison :**

L'apport structurel de cette couche est secondaire (sauf les chaussées à assise granulaire dont la couche de la surface est la seul couche liée), elle est tributaire de la pérennité de la chaussée. [7]

- **Couche de roulement :**

C'est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et de climat. On lui demande des qualités d'usage précises à savoir : une forte adhérence, une bonne drainabilité, un bon niveau d'uni et une réduction du bruit de roulement des véhicules [7].

C'est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et de climat. On lui demande des qualités d'usage précises à savoir : une forte adhérence, une bonne drainabilité, un bon niveau d'uni et une réduction du bruit de roulement des véhicules [7].

I.3. Principe de la constitution de la chaussée

La chaussée est essentiellement un ouvrage de répartition des charges roulantes sur le terrain de fondation. Pour que le roulage s'effectue rapidement, sûrement et sans usure exagérée du matériel, il faut que la surface de roulement ne se déforme pas sous l'effet : [8]

- De la charge des véhicules ;
- Des chocs ;
- Des intempéries ;
- Des efforts tangentiels dus à l'accélération, au freinage et au dérapage [8]

I.4. Différents types de structures de chaussée

Selon le fonctionnement mécanique de la chaussée, on distingue généralement les trois différents types de structures suivants : [8]

- Les chaussées souples ;
- Les chaussées semi-rigides ;
- Les chaussées rigides.

I.4.1. Les chaussées souples

Les chaussées souples tiennent leur nom du fait qu'elles se déforment réversiblement sous sollicitations. Elles sont constituées d'une couche bitumineuse en surface et d'une assise en matériaux granulaires. La couche bitumineuse est relativement mince, la couche de base et la couche de fondation sont généralement en matériaux non traités. [9 ;10]

Plus la chaussée est épaisse, moins la contrainte appliquée à la base de la plateforme est importante. Le dimensionnement des structures souples repose sur la limitation de la déformation verticale du sol support. [9]

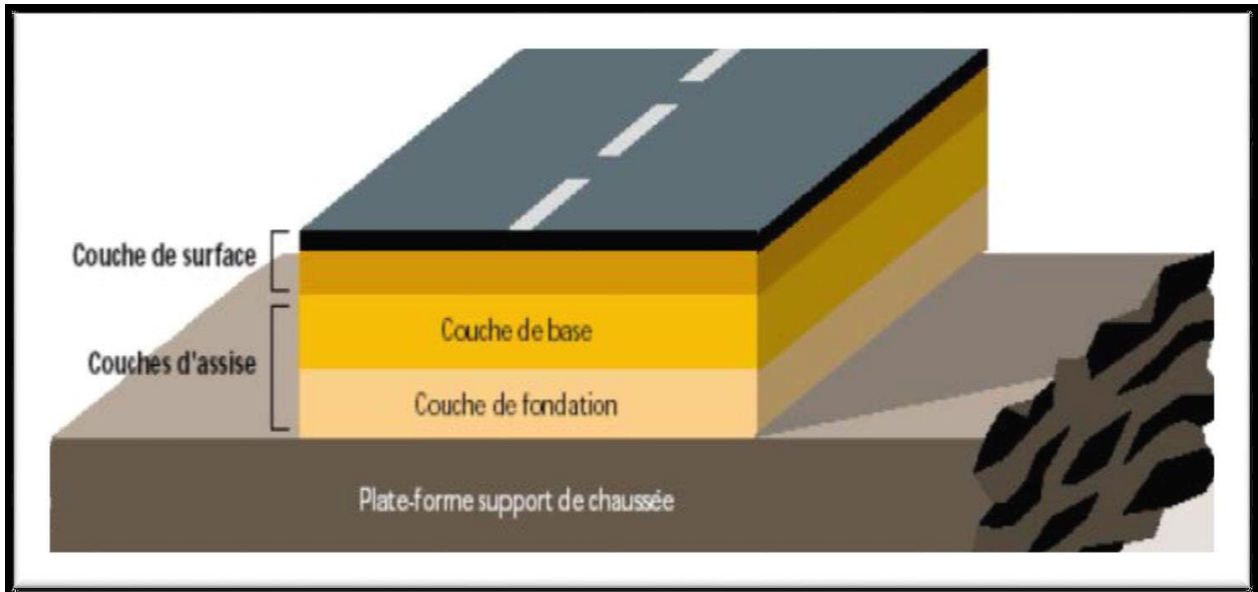


Figure I.2 : Structure d'une chaussée souple.

I.4.2. Les chaussées semi-rigides

Encore appelée chaussée mixte ou chaussée à assise traitée aux liants, sa structure comporte un revêtement bitumineux mince et un corps de chaussée en matériaux traités (en liants hydrauliques ou hydrocarbonés). Elle est utilisée lorsque le trafic devient important et que les matériaux crus ne satisfont pas aux exigences mécaniques. Le liant augmentant la rigidité de l'assise, les déformations verticales sont relativement faibles et le dimensionnement de la chaussée porte essentiellement sur la limitation de la contrainte de traction par flexion à la base des couches traitées. [9] ; [10]

Une chaussée semi-rigide est constituée d'un revêtement bitumineux relativement mince, d'une couche de base traitée et d'une couche de fondation traitée ou non. Son dimensionnement porte sur la rupture par fatigue à la base de la couche liée et l'orniérage du sol support. On doit s'assurer que la contrainte de traction à la base de la couche traitée est inférieure à la contrainte de traction admissible du matériau et que la déformation verticale à la surface des couches non liées et sol support est inférieure à une valeur admissible. [9]

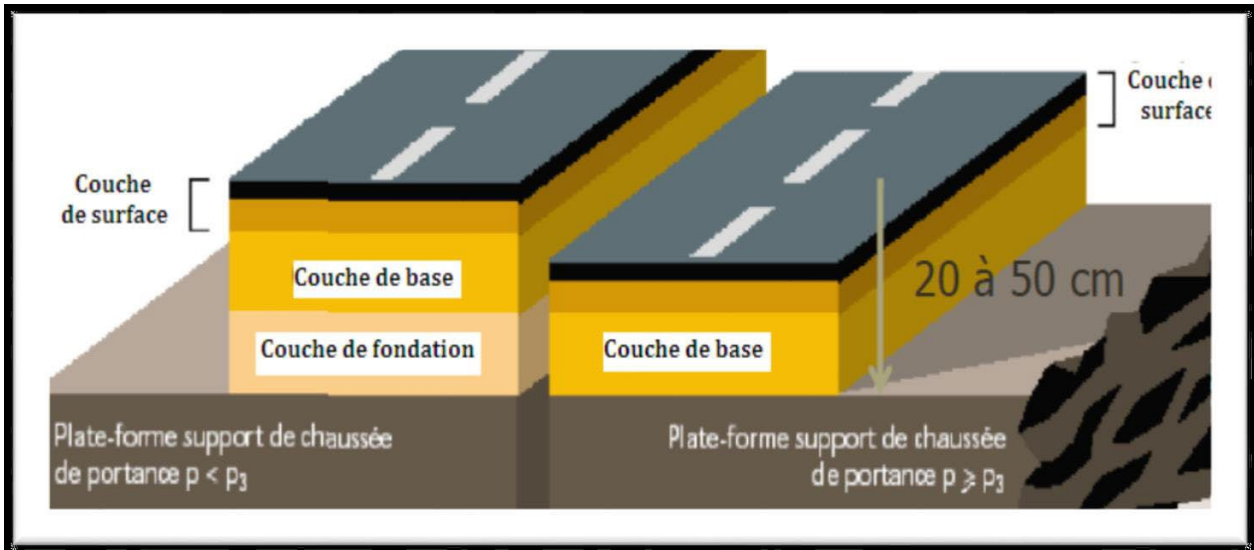


Figure I.3. Structure d'une chaussées semi-rigides.

I.4.3. Les chaussées rigides

Ces structures comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur éventuellement recouverte d'une couche de roulement mince en matériaux bitumineux. [10]. Elle est peu déformable, elle absorbe la charge enfin d'éviter une déformation, sur la fondation ou l'infrastructure, susceptible de causer la rupture. Des structures rigides mobilisent des efforts notables de traction par flexion très important par rapport à ceux subis par les structures semi-rigides et se déforment essentiellement par fissuration. [9]

Le dimensionnement des structures rigides repose sur la limitation des efforts de traction par flexion du béton sous l'effet des charges. Pour les trafics élevés, ces types de chaussée ont des performances mécaniques très intéressantes, comparées aux autres types de structures. [9]

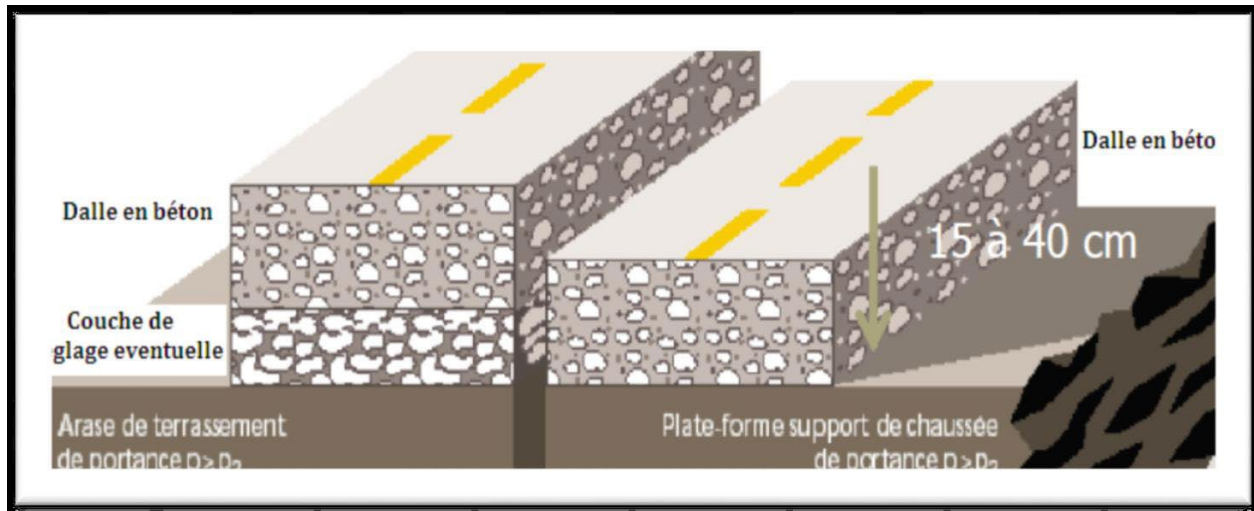


Figure I.4 : Structures d'une chaussée rigide.

I.5. Types de routes

Il existe trois principaux types de transport et de moyens de transport, à savoir : la terre, la mer et l'air [3]. Le transport terrestre dépend des véhicules à roues, tels que : les voitures, les bus, les camions et les trains. Le transport maritime dépend des navires, et des bateaux. Quant à le transport aérien, il dépend principalement des avions. Il existe trois types de méthodes, qui sont les suivantes :

I.5.1. Routes principales

Elles sont l'une des routes les plus importantes, car elles accueillent le plus grand nombre de voitures, d'autobus et de véhicules de transport, et relient entre elles de grandes zones de population, et les routes pouvant accueillir quatre voies ou plus sont divisées, avec un revêtement de sol en le milieu, connu sous le nom de jetée de sécurité, et souvent une clôture y est ajoutée.



Figure.I.5 : Image d'une route principale [20]

I.5.2. Routes locales et secondaires

Ces routes accueillent la circulation automobile dans les limites des zones locales et relient les petites zones de population les unes aux autres, en plus de relier les routes locales aux routes principales s'étendant vers des endroits éloignés.



Figure I.6 : Routes locales et secondaires [20]

I.5.3. Routes carrossables

Les routes principales ont des noms sous lesquels elles sont connues et ces noms diffèrent d'un pays à l'autre, tels que : routes ouvertes, routes carrossables ou autoroutes, qui sont des routes principales à quatre voies ou plus, à deux sens, séparées par trottoirs de sécurité centraux.



Figure I.7 : Routes carrossables [20]

I.6. Classements routiers

Il existe de nombreuses classifications, noms et spécifications pour les routes, mais les plus importantes d'entre elles sont :

I.6.1. Classification basée sur l'emplacement de la route

Il existe plusieurs types de routes suivant l'emplacement :

- ✓ Routes interurbaines ;
- ✓ Routes entre les zones urbaines et rurales ;
- ✓ Les routes qui traversent les villes s'appellent des rues ;
- ✓ Les routes sont d'une importance vitale à des fins économiques, utilitaires et récréatives ;
- ✓ routes de montagne ;
- ✓ Tunnels et ponts [4].

I.6.2. Classification sur la base de la supervision, de la planification et de la conception

Il est divisé en quatre types principaux et peut différer d'un pays à l'autre

- ✓ Autoroutes.
- ✓ routes principales
- ✓ rues de collecte
- ✓ rues locales



Figure I.8 : Autoroutes [20]

I.6.3. Classification basée sur le type de matériaux utilisés pour construire la route

Il existe de nombreux types de pavés en fonction du matériau. Par exemple, la base de données LTPP contient plus de trente espèces. Mais voici une classification approximative ou générale :

- Chemin de terre route asphaltée
- Route pavée coupée (tuiles)
- Classification basée sur le site d'Al-Tari...

I.7. Généralités sur les remblais (matériaux, comportement, ...)

On précise ici un certain nombre de termes très courants qui seront régulièrement utilisés par la suite et qu'il convient de bien connaître.



Figure I.9 : Exemples de Remblai

I.7.1. Définition des remblais

Le terme « remblai » couvre un large panel d'ouvrages en terre destinés à surélever durablement le niveau du sol support par un apport de matériaux. Dans le cadre de projets d'infrastructures, différents types de remblais sont généralement rencontrés. Ces types de remblais diffèrent par le rôle qui leur est dévolu.

Un remblai est un ouvrage en terre qui provient de la mise en place de matériaux pour rehausser ou niveler le terrain naturel. Il doit pouvoir supporter les sollicitations ultérieures (trafics routier ou ferroviaire, bâtiments, super-structures...) sans déformation préjudiciable (tassements, glissements...).

Le remblai ou l'enfouissement fait référence à la quantité de matériaux du sol tels que les roches, les gravats, le gravier et le sable qui sont placés et compactés dans les excavations, les fondations et sous les planchers dans le but de combler un trou ou d'atteindre un certain niveau. Dans cet article, nous discutons des types de matériaux utilisés pour le remblayage et de la manière d'effectuer le remblayage dans différents lieux de travail dans le bâtiment, comme le remblayage au-dessus des bases et sous les planchers.

Le diagnostic d'un remblai et l'appréciation d'une pathologie sont fortement liés à la fonction du remblai. Par exemple, des pathologies acceptables pour des merlons phoniques ne le seront peut-être pas pour un remblai sous-jacent à une chaussée routière. En effet, dans le second cas, même si la tenue globale de l'ouvrage en terre n'est pas remise en cause, des réparations lourdes pourront être entreprises afin de garantir la sécurité de la voirie et des usagers.

Le diagnostic est enclenché lorsque le gestionnaire ne peut identifier la cause des pathologies et souhaite mettre en œuvre la solution de réparation la plus appropriée à sa situation. Ce diagnostic peut être demandé dès l'apparition des premiers désordres ou plus tardivement, soit après plusieurs réparations inefficaces, soit à un moment plus approprié dans le temps.

I.7.2. Types de matériaux de remblai

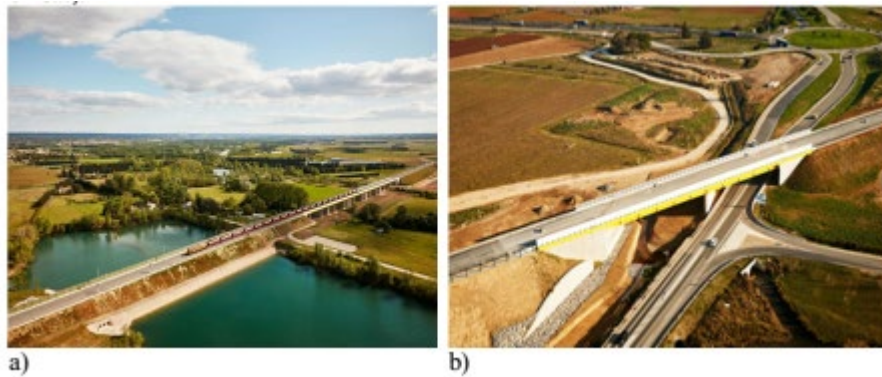


Figure I.10: Types de Remblai (ferroviaire, routier)

I.7.2.1. Sortie de forage

Le sol utilisé pour le remblayage dans différents types d'ouvrages est le résultat d'opérations d'excavation, mais à condition qu'il soit exempt de sels, de matières organiques ou d'autres substances nocives. Il n'est pas recommandé d'utiliser des produits d'excavation de sols cassants et pelucheux. Tous les blocs de remblai de plus de 50 mm doivent être brisés ou enlevés [5].

I.7.2.2. Casser des pierres

Le broyage de pierre est obtenu à partir de sablières et carrières agréées à partir de roches décomposées contenant du silicium et un mélange naturel d'argiles d'origine calcaire. La taille standard du matériau de pierre concassée doit commencer et aller de la qualité poussiéreuse (terreuse) à 40 mm

I.7.2.3. Le sable

Le sable utilisé pour l'enfouissement (remblai) doit être propre et exempt de saleté, de poussière, de matières organiques et d'autres matières étrangères. Il ne doit pas contenir plus de 5% d'argile ou de limon.

I.7.2.4. Le gravier

Le gravier ou le gravier doit être propre et exempt de matières étrangères et obtenu à partir de diverses sources telles que des lits de rivières ou des canaux et de la pierre concassée. Les gros grains de granulats de 40 mm à 4,75 mm doivent contenir suffisamment de matériaux fins pour remplir tous les joints et assurer la stabilité et la cohésion lors du compactage.

I.8. Applications de remblayage

Il existe de nombreuses applications sur le remblai, dont le remblai de remplacement, qui sert à modifier les propriétés du sol supportant le poids d'origine. Ce processus se fait en suivant les instructions du rapport d'examen du sol, qui comprend l'épaisseur de la couche, la qualité des matériaux de remplacement et d'autres conditions. Le remblai ou enfouissement, comme on l'appelle dans certains pays, est également utilisé pour remplir les espaces entre et au-dessus des bases jusqu'au niveau du rez-de-chaussée et des cours.

Le remblai est généralement utilisé dans les opérations de couverture et de comblement de fosses dans tous les domaines du génie civil dans la construction de routes, d'égouts, d'eau, d'électricité, de gaz et de toutes extensions d'infrastructures pour protéger ces éléments des dégradations et des facteurs climatiques extérieurs. [5].

I.8.1. La bonne façon de remblayer

Une fois les travaux de fondation terminés, l'espace autour de la fondation doit être nettoyé de tous les résidus, résidus de bois, briques brisées, béton, etc. Les espaces entre les fondations sont remplis de couches n'excédant pas 250 mm, et chaque couche est pulvérisée avec de l'eau, tassée et compactée avant d'appliquer la couche suivante.

Le terrain est compacté à l'aide de l'équipement approprié pour s'assurer que les vides entre les grains de sol de remblai sont éliminés jusqu'à ce que le niveau approprié soit atteint, qui se situe principalement sous monticules supérieurs. Il n'est pas préférable d'utiliser des produits de forage pour combler cette zone à moins qu'elle ne soit propre et valide avec les connaissances d'un ingénieur.

Après cela, le tassage se fait entre les lits jusqu'au niveau du bas de la finition, et un bon tassage est pris en compte pour ne pas conduire à un affaissement des dalles par la suite. [5]. Il est préférable de poncer aux endroits bien contrôlés de toutes parts. Quant aux zones exposées aux opérations de terrassement à proximité, il faut utiliser Sablez ou Base Corre de A1B, A24, qui maintiennent mieux leur cohésion. [6].

I.8.2. Les étapes du processus de remblayage et comment le calculer

I.8.3. Quand commence le processus de remblayage

Le processus d'enfouissement doit commencer au-dessus des bases et à côté des murs en béton après avoir terminé 28 jours après le durcissement et le traitement de l'eau afin que le béton acquière la plus grande partie de sa résistance, et cela peut être après une semaine dans le cas d'un remblayage avec une faible épaisseur au mètre près. [6]

I.8.4. Comment calculer le montant du remblai

Tout d'abord, calculez la quantité de remblai nécessaire entre et au-dessus des bases séparées jusqu'au niveau du fond du lit, en :

En calculant la superficie, longueur par largeur, puis en la multipliant par l'épaisseur de l'enterrement, et le résultat, nous en soustrayons les mètres cubes qui ont été coulés pour les bases séparées et les cols des colonnes. Vous devrez peut-être augmenter la quantité car les flans sont éliminés lors du bourrage.

Dans le cas des vêtements, seuls les mètres du cou sont déduits.

Deuxièmement, la quantité de remblai entre les monticules est calculée de la même manière, avec la soustraction des mètres des monticules coulés. [6]

I.9. Le remblaiement

Remblayer un terrain avant des travaux de construction : c'est même une technique d'aménagement de terrain.

Il est indispensable dans les cas suivants :

La profondeur du décapage est supérieure à l'épaisseur du dallage futur et de sa fondation le terrain doit être mis à l'abri des inondations ; le dallage doit être placé au niveau de la plateforme des camions ou des wagons.

I.10. Les remblais de grande hauteur

Un gros remplissage n'est pas qu'un tas de couches compactées. Leurs déformations peuvent être importantes et évoluer dans le temps. Ils sont souvent hétérogènes et parfois composés de matériaux en constante évolution. Ils comprennent des ouvrages horizontaux et verticaux (réseaux de traitement des eaux).

Les remblais élevés peuvent également être construits à partir de matériaux aux propriétés de sécurité médiocres (en particulier l'argile fine). Dans ce cas, leur conception et leur construction ne reposent plus uniquement sur les règles empiriques susmentionnées, mais comme une œuvre d'art, utilisant des études spécifiques de la mécanique des sols et des roches.

Le sol utilisé pour le remblai ne peut pas être déplacé sur de longues distances, il est donc nécessaire d'utiliser les matériaux disponibles. Cela devrait inciter les concepteurs à ajuster l'aménagement en amont pour ne pas prendre trop de risques sur la qualité des matériaux utilisés [5].



Figure I.11. Remblai de grande hauteur

I.11. La Géométrie du remblai

Il faut choisir la géométrie 2D qui convient parfaitement pour le type de calculs qu'on souhaite mettre en place. Le schéma suivant modélise le profil transversal d'un remblai. h représente la hauteur du remblai et (i) la pente.

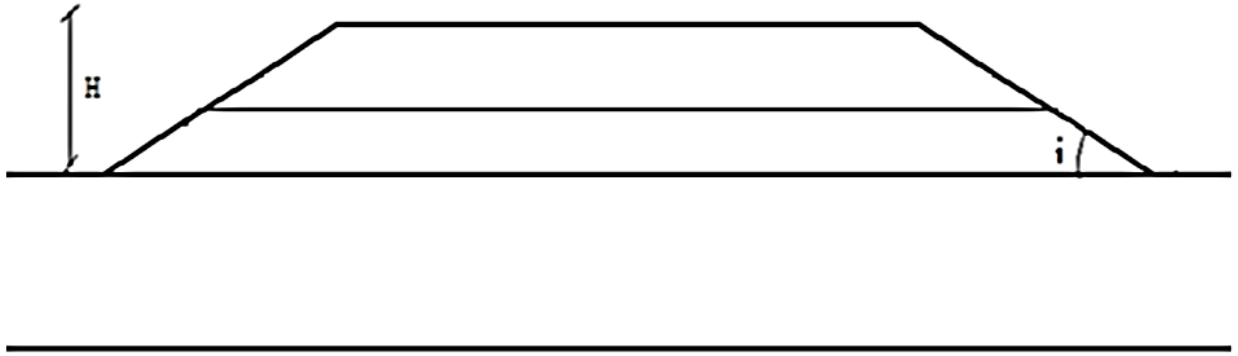


Figure I.12 : Caractéristiques géométrique d'un remblai [5]

I.12. Problèmes posés par la construction des remblais sur sols compressibles

La construction de remblais peut poser des problèmes de type divers sols tels que : tourbe, terre, argile molle, limon Collant ou lâche. Ces sols sont généralement très déformables, Faible perméabilité et faible résistance. nous les appelons Généralement "sol compressible" ou "sol mou". De plus, le Profondeur et épaisseur du sol compressible Influence sur la nature et l'étendue du problème causé Construction de remblais et solutions envisageables résolvez-les :

- En surface, d'abord la banalité du sol problèmes de stabilité, mais des solutions claires peuvent être envisagées ;

- Plus la couche compressible est épaisse, plus le tassement est important et lent à se développer [21].

Exemple :

Terrain de 10 x 10 et il est destiné à être remblayé sur 1 mètre, et 20 m³ de béton ont été coulés pour les soubassements et 10 m³ pour les cols.

La quantité de remblai entre les bases et au-dessus d'elles est égale à 10 x 10 x 1 = 100 m³ et soustraire 30 équivaut à 70 m³ de remblai et est divisée par la charge du véhicule pour obtenir la valeur de déplacements.

I.13. Conclusion

Pour la plupart des projets routiers, une procédure de remblayage peut être utilisée comme étape principale de la construction de la route. Le processus de remblayage de la route permet de remplir la route et d'observer si la route est plate ou non. C'est pourquoi nous avons présenté dans ce chapitre GENERALITES SUR LES ROUTES ET LES REMBLAIS divisé en deux parties ; la première parle de généralités sur les routes, historique, types et classification des routes et en fin l'entretien de routes.

Et la 2^{ème} partie donne des généralités sur les remblais et types de matériaux utilisés pour la réalisation de ces derniers.

Chapitre II

COMPORTEMENT DES SOLS COMPRESSIBLES (MOUS)

II.1. Introduction

Le sol est la source de vie de tous les organismes vivants, y compris les humains, qui dépendent pour leur nourriture, leur habillement et leur logement des plantes et des animaux qui y poussent. Il fonctionne également pour analyser la matière organique et la ramener à son cycle naturel et filtre polluants vers le fond, réduisant ainsi la pollution des eaux souterraines. Les propriétés chimiques du sol diffèrent clairement à la surface de la terre, car le sol diffère d'un endroit à l'autre dans le même champ, et lorsque la fertilité et la perméabilité diffèrent, la structure et les matériaux organiques diffèrent, et donc le sol diffère dans sa composition chimique. et les propriétés physiques d'un endroit à l'autre, et les différentes influences sont des facteurs qui contrôlent sa formation, tels que les matières premières, la matière organique, la topographie, le temps et les humains. Il existe plusieurs types de sol, y compris le sol compacté humide.

C'est la couche fragile et mince qui recouvre la majeure partie de la surface sèche de la terre, qui se trouve avec une épaisseur variante entre quelques centimètres et plusieurs mètres, et se compose d'éléments minéraux appartenant aux roches qui ont été affectées par divers facteurs d'érosion, comme ainsi que des éléments organiques résultant de la décomposition des restes végétaux et animaux, en plus de l'air et de l'eau, qui entrent dans la composition du sol en tant qu'éléments de base.

II.2. Définition des sols compressibles

Les sols compressibles, sont des sols qui tassent lorsqu'on les soumet à une charge. La notion de compressibilité n'est donc significative que si l'on fait référence aux déformations admissibles induites par l'ouvrage projeté, ces déformations amplitude et vitesse dépendent de la nature du sol support et de l'importance des charges appliquées.

Tous les sols sont compressibles, c'est-à-dire qu'ils tassent lorsqu'on leur applique une charge verticale. L'amplitude et la vitesse de ce tassement varient dans de grandes proportions suivant le type de sol considéré. Les sols compressibles sont généralement de formation récente, inaptes à supporter un ouvrage, mais pouvant, moyennant certaines précautions, servir de sol fondation à un remblai par exemple. Ceux sont des matériaux récents (âgés de 10000 à 15000 ans au plus) [22], classés sommairement en deux grandes catégories : les argiles molles (peu ou pas organiques) et les tourbes (sols très organiques). Tous ces matériaux se sont déposés dans l'eau d'une manière qui varie donc beaucoup selon les conditions hydrauliques rencontrées : côte marine, estuaire, lagune,

lac, etc., en sorte que l'étendue et la nature des sols mous sont directement liées aux évolutions hydrauliques. Les sols compressibles sont :

- Une teneur en eau très forte, et un faible poids spécifique apparent (ces sols sont généralement saturés) ;
- Une résistance au cisaillement très faible ;
- Une forte compressibilité se traduisant, même sous faible charge, par des amplitudes de tassement notables, la vitesse de tassement décroissant avec le temps, mais ne s'annulant pas en quelques années.

II.3. Compressibilité du sol

Cette caractéristique se résume à la capacité du sol (dans une large mesure parfois) à modifier sa structure sous l'influence d'influences extérieures vers une structure plus compacte ou compacte au détriment de la réduction de la porosité du sol. La compressibilité du sol est l'une des caractéristiques les plus importantes de la nature du sol et elle distingue fondamentalement le sol des roches solides et des autres corps solides. [11]

A cette propriété est associée une loi importante, la loi de fusion ou d'empilement

Perméabilité du sol à l'eau : La deuxième caractéristique du sol est la caractéristique de perméabilité à l'eau, c'est-à-dire que la capacité de filtrer l'eau et la filtration dans le sol dépend du degré de compactage ou de compactage du sol.

La loi liée à cette propriété est la loi de nomination de classe.

Résistance du sol au cisaillement ou au déplacement : sous l'influence de la charge externe, les contraintes des effluents à certains points peuvent dépasser les liaisons internes entre les particules de sol, et des glissements (déplacements) surviennent pendant quelques minutes, et ici le contact avec le sol peut être perturbé en un des zones, c'est-à-dire que la résistance du sol dans ces zones est surmontée.

La résistance interne, s'opposant ou empêchant le déplacement ou le déplacement de particules solides dans des corps en vrac idéaux réside uniquement dans le frottement survenant aux points de contact ou de contact des particules, mais dans des sols cohésifs idéaux tels que les argiles visqueuses, la résistance au mouvement de les particules auront les liaisons structurelles internes

et la viscosité de la gaine hydrocolloïde des particules uniquement Et non dans les frottements survenant aux points de contact ou de contact des minutes [11]

II.4. Les types de sols compressibles

II.4.1. Les argiles

L'argile est une matière rocheuse naturelle à base de silicates ou d'aluminosilicates hydratés de structure lamellaire, provenant en général de l'altération de silicates à charpente tridimensionnelle, tels que les feldspaths. Elle peut être une matière localement abondante, très diverse, traitée ou raffinée avant emploi, à la fois meuble ou plastique (souvent après addition d'eau) ou à pouvoir desséchant, absorbant ou dégraissant, voire à propriétés collantes ou encore réfractaires, pour servir par exemple autrefois selon des usages spécifiques, souvent anciens, au potier et au briquetier, au maçon et au peintre, au teinturier et au drapier, au verrier et à l'ouvrier céramiste. [11]

En réalité, le terme issu du latin argile peut s'appliquer au choix à un minéral argileux et à un ensemble de minéraux argileux, ainsi qu'à diverses roches composées pour l'essentiel de ces minéraux 1. Les roches de la classe des lutites peuvent être l'argilite, l'argilolithe ou argilolithe, les shales à l'exclusion des schistes métamorphisés. Les argiles sont des roches sédimentaires clastiques. Lorsqu'elles renferment du calcaire, trois sous-classes sont définies entre le pôle argile et le pôle calcaire en fonction de l'augmentation de la teneur en calcaire : argile calcaire puis marne et enfin calcaire argileux. Les argiles riches en silice gélatineuse, soluble dans les alcalis, se nomment gaizes. Le limon ou le lehm désignent des argiles renfermant des particules siliceuses et accessoirement des pigments minéraux comme la limonite ou la goethite. Le lœss est un dépôt de couleur jaunâtre d'origine paléo glaciaire composé principalement d'argiles et de fines particules calcaires et siliceuses.

II.4.1.1. Nature des argiles

Il existe plusieurs définitions des argiles. Le terme « argile » n'aura pas le même sens en mécanique des roches, en physique du sol, ou en poterie ; il désigne, selon les cas, un ensemble d'espèces minérales, une famille de roches, une catégorie de sols ou encore une classe granulométrique. Sous cette appellation générique se cache donc une grande variété de matériaux, dont le point commun est de posséder des minéraux argileux, qui sont eux de nature bien précise

(à base de silicates) et dont la structure confère à ces matériaux - comparativement à d'autres types de sols ou de roches - des propriétés bien spécifiques quant à leur interaction avec l'eau.

On distingue suivant leur origine :

- **Les argiles d'altération** : formées principalement par l'altération des calcaires en climat tempérés ou l'altération des latérites en climat chaud et humide ;
- **Les argiles fluviales** : elles se déposent surtout dans le lit majeur des fleuves, lors des décrues ;
- **Les argiles lacustres** : déposées dans les lacs et étangs ;
- **Les argiles marines** : Ce sont des argiles d'origine continentale déposées en milieu marin, et généralement modifiées par la diagénèse. [13]

II.4.1.2. Reconnaissance des sols compressibles

Le constat visuel d'un sol compressible ne suffit pas pour proposer une méthode de construction routière sur cette dernière. Pour cela il faut effectuer une reconnaissance plus approfondie de la zone à étudier. La reconnaissance des sites et des sols vise à fournir des informations détaillées sur la constitution du sous-sol (géométrie et nature des couches de sol), ainsi qu'une première évaluation des propriétés des matériaux. Pour les études de tracés de remblais routiers, cette reconnaissance fournit les éléments de décision quant au choix du meilleur fuseau, puis du tracé proprement dit, puis permet de préparer le projet d'exécution. Le principe généralement admis est qu'il faut réaliser la reconnaissance du site et des sols de manière progressive, en densifiant les sondages au fur et à mesure de l'avancement du projet. Toutes les natures de sondages et essais coexistent dès le démarrage de l'étude : prélèvements pour identification des sols et essais en laboratoire, essais mécaniques en place, application éventuelle des méthodes géophysiques. Seule la densité des essais et sondages augmente avec le détail des informations recherchées. Cette reconnaissance approfondie demande beaucoup de moyens tant humain, matériel que financier. Pour ce faire, on peut procéder comme indiqué dans le tableau 1 suivant. [12]



Figure II.1 : Argile du Quaternaire, Estonie.

II.4.2. Les tourbes

La tourbe se définit comme produit de la fossilisation de débris végétaux (dits « truffigènes », comme diverses espèces de sphaignes par exemple) par des microorganismes (bactéries, arthropodes, champignons, microfaune) dans des milieux humides et pauvres en oxygène - que l'on appelle tourbières - sur un intervalle de temps variant de 1 000 à 7 000 ans. Si, à cause de son enfouissement, la tourbe est soumise à des conditions particulières de pression et de température, elle se transforme, au bout d'une période de l'ordre du million d'années, en charbon. La tourbe peut ainsi être considérée comme une étape intermédiaire à la formation de charbon. Habituellement, on classe la tourbe en trois grandes catégories selon le type de végétaux supérieurs.

[12]



Figure II.2 : Tranches de tourbe noire mises à sécher pour utilisation comme combustible.

II.4.3. Les limons

Le **limon** est un sédiment classique incohérent transporté en suspension par les rivières et le vent, qui se dépose sur le lit des cours d'eau ou sur un terrain inondé. Les limons forment des sols fins avec des sédiments clastiques non consolidés dont les constituants sont principalement minéraux.

Le limon est un matériau inerte de granulométrie fine, compris entre celui des sables, plus épais, et celui des argiles, plus minces, qui est transporté en suspension par les rivières et se dépose sur le lit des cours d'eau ou sur le sol qui ont subi des inondations. Il est également présent dans les étangs et les marais. Elle peut provenir des usines de traitement des granulats et, plus précisément, de la sédimentation des eaux de lavage des granulats eux-mêmes [12].



Figure II.3: Limon séché

II.4.4. Les marnes

La marne est une roche sédimentaire, mélange de calcite (CaCO_3) et d'argile dans des proportions à peu près équivalentes variant de 35 % à 65 % (autre notation : $(50 \pm 15) \%$). Au-delà de 65 % de calcaire, il s'agit d'un calcaire argileux, tandis qu'en deçà de 35 % de calcaire, on parle d'argile calcaire (parfois « argile calcareuse » ou « argile calcarifère.

Les alternances marne -calcaire sont très fréquentes dans les séries sédimentaires et portent le nom de formation marno-calcaire.

Sa sensibilité à l'eau favorise les instabilités de pente. Le fluage des marnes ou des formations marno-calcaires, le glissement de terrain et le ravinement sont à l'origine de catastrophes régulières [12].



Figure II.4: Les marnes bleues contiennent souvent des fossiles.

II.5. Propriétés caractéristiques des sols compressibles

Les propriétés caractéristiques des différents types de sols compressibles sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II. 1 : Propriétés caractéristiques des sols compressibles [14].

Propriétés	Tourbes	Sols Organiques	Vases	Argiles Molles
Teneur en eau w (%)	200-1000	100-200	60-150	30-100
INDICE DES VIDES e	3 à 10	2 à 3	1.5 à 3	1.2 à 2
POROSITÉ n	0.75 à 0.9	0.7 à 0.8	0.6 à 0.75	0.55 à 0.7
COMPRESSIBILITÉ $C_c / (1 + e_0)$	0.4 à 0.8	0.2 à 0.35	0.25 à 0.4	0.15 à 0.3
Indice de fluage c_{oe}	0.02cc	0.03 à 0.05cc		
Coefficient de perméabilité K (m/s)	10^{-10} à 10^{-9}	10^{-6} à 10^{-9}	10^{-7} à 10^{-9}	10^{-9} à 10^{-11}
Coefficient de Consolidation c_v (m^2/s)	10^{-6} à 10^{-8}	10^{-6} à 10^{-8}	10^{-7} à 10^{-8}	10^{-8} à 10^{-9}
Cohésion non drainée c_u (kpa)	10-50	10-50	10-50	10-50
Taux de variation de $C_u : \lambda_{cu} = \Delta C_u / \Delta \sigma'$	0,5	0,2 à 0,3	0,2 à 0,3	0,2 à 0,3
Masse volumique sèche P_d (t/m^3)	0,1 à 0,5	0,5 à 1	0,7 à 1,5	L à 1,6
Masse volumique des Particules p_s (t/m^3)	1,4 à 2	2 à 2,6	2,4 à 2,7	2,6 à 2,7

II.6. Comportements et caractéristiques des remblais sur sols compressibles

La mise en œuvre de remblai sur sols compressibles comporte quatre types de difficultés :

- une déformabilité élevée, fonction de la charge appliquée et du temps,
- une faible perméabilité, qui varie avec les déformations du sol,
- une résistance limitée, qui croît en général avec la profondeur.
- Leur stabilité n'est pas automatiquement assurée.
- Ils subissent des tassements importants et de longue durée, qui rendent parfois problématique leur maintien à niveau avec les points durs.
- Leur construction perturbe les ouvrages avoisinants (frottement négatif et efforts horizontaux sur les fondations profondes, tassements différentiels des remblais et fondations superficielles, efforts supplémentaires sur les soutènements).
- Perturbation de l'écoulement des eaux [14]

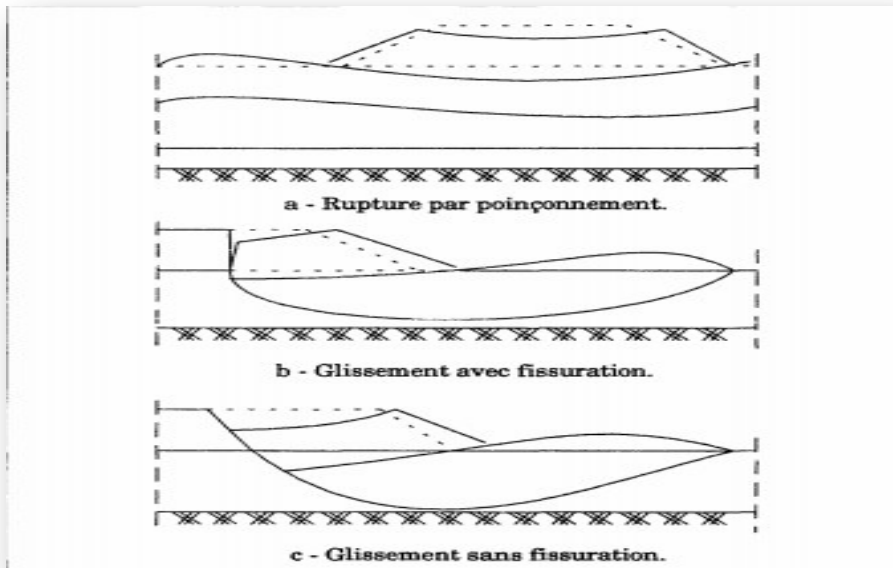


Figure II. 5 : Schémas types de rupture de remblai sur sols mous

II.6.1. Stabilité du remblai

Les principaux types d'instabilité des remblais sur sols compressibles sont :

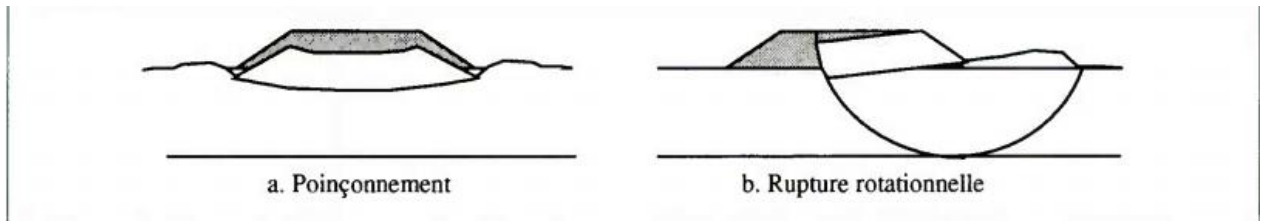


Figure II. 6 : Mécanismes de rupture des remblais sur sols compressibles [14]

- des instabilités de Capacité par poinçonnement de la couche de sol mou (l'ensemble du remblai s'enfonce en repoussant le sol de part et d'autre). Ce type d'instabilité se produit dans les couches de sol très molles depuis la surface (vases d'estuaires, tourbières, etc.) ;
- des instabilités par rotation d'une partie du remblai et des sols compressibles sur une surface de rupture de forme cylindrique, avec formation d'un escarpement dans le remblai et d'un bourrelet de pied. La plupart des ruptures sont de type « rotationnel ». Toutes les instabilités se produisent « à court terme », pendant les travaux de construction du remblai (ou d'excavation en pied de remblai...). Pour évaluer la stabilité d'un remblai sur sols compressibles, il faut déterminer la résistance du sol à court terme (cohésion non drainée). La construction par étapes, qui joue sur l'augmentation de la résistance du sol au cours du temps sous le remblai déjà construit, et la mise en place de banquettes latérales pour s'opposer au poinçonnement ou à la rupture rotationnelle sont deux des méthodes les plus courantes. [14]

II.6.2. Tassements

Les règles de dimensionnement des remblais sur sols compressibles (coefficient global de sécurité de $F = 1,5$ dans la pratique courante) permettent de limiter les charges supportées par le sol à des valeurs pour lesquelles ses déformations (tassements et mouvements horizontaux) sont finies, même si elles sont importantes et peuvent durer pendant de très longues périodes. Dans les conditions usuelles, le tassement se produit pour une faible part pendant la construction du remblai, pour l'essentiel pendant la phase dite de consolidation primaire et pour le reste pendant la période dite de compression secondaire ou de fluage. Le tassement immédiat (pendant la mise en place des couches successives du remblai) se développe en général à volume de sol constant, de sorte qu'il s'accompagne de déplacements horizontaux d'amplitude équivalente. Le tassement de consolidation primaire tend vers sa valeur finale en suivant une loi exponentielle. Le tassement de compression secondaire augmente comme le logarithme du temps. Des surpressions interstitielles

subsistent pendant tout le processus de déformation du sol, y compris pendant la phase de fluage finale. Il faut garder à l'esprit que ce processus en trois phases se réinitialise chaque fois que l'on applique une nouvelle charge au sol, c'est à dire en particulier quand on vient « recharger » le remblai pour le ramener à son niveau théorique. [14]

II.6.3. Mouvements horizontaux

L'amplitude maximale des déplacements horizontaux des sols compressibles sous les remblais représente en général 15% de l'amplitude du tassement. Ces déplacements conservent la même forme pendant la consolidation, ce qui facilite leur prévision et leur contrôle par des mesures inclinométriques. Les mouvements horizontaux peuvent être plus importants pendant la construction du remblai (conditions non drainées). On peut les limiter en améliorant les conditions de drainage du sol. Les mouvements horizontaux des sols compressibles sous les remblais sont l'une des causes principales des efforts parasites sur les ouvrages avoisinants [14]

II.6.4. Efforts parasites sur les ouvrages avoisinant

Les tassements sous les remblais créent des efforts de frottement négatif sur les pieux qui se trouvent dans leur zone d'influence (y compris à l'extérieur du remblai dans certains cas). D'autre part, les mouvements horizontaux du sol exercent aussi des efforts « parasites » horizontaux sur ces pieux. Ces efforts supplémentaires doivent être pris en compte dans le calcul des fondations profondes. Ils peuvent être limités, voire pratiquement supprimés, si le remblai est construit suffisamment à l'avance. Les mouvements verticaux et horizontaux du sol peuvent également produire des efforts supplémentaires sur les ouvrages de soutènement situés en contrebas. Enfin, la construction d'un remblai sur sol compressible provoque un tassement de la surface du sol sur une certaine distance (fonction de l'épaisseur des sols compressibles) au-delà du pied des talus du remblai. Ce tassement peut provoquer la fissuration d'ouvrages fondés superficiellement dans la zone d'influence du remblai. En particulier, l'élargissement des remblais sur sols compressibles est une opération complexe qui doit être étudiée avec soin. [14]

II.6.5. Les minéraux argileux

Les minéraux argileux, ou simplement les argiles, sont des aluminosilicates hydratés de la famille des phyllosilicates. Ces minéraux sont les constituants principaux des roches argileuses et du matériau obtenu à partir de ces roches après un éventuel raffinage (ces roches et ce matériau sont également appelées *argiles*).

II.6.6. Les argiles en tant que roches.

Caractères généraux

On parle, dans le langage courant, d'argiles, pour désigner des roches sans cristaux visibles, donc constituées de particules très fines, et aux propriétés mécaniques particulières, notamment en présence d'eau : elles ont un contact collant, absorbent l'humidité, et sont alors plastiques (malléables).

La petitesse de leurs cristaux impose des méthodes d'études spécifiques, en laboratoire.

Cette particularité sert aussi de première base pour une définition plus rigoureuse.

II.6.7. Définition granulométrique

Les échelles granulométriques, qui définissent les particules constitutives des roches sédimentaires selon un critère de taille, sont nombreuses, mais identifient généralement les argiles comme les particules les plus fines : la classification de Wentworth appelle argiles (*clays*) les particules inférieures à 3,9 micromètres (cf. figure ci-dessous).

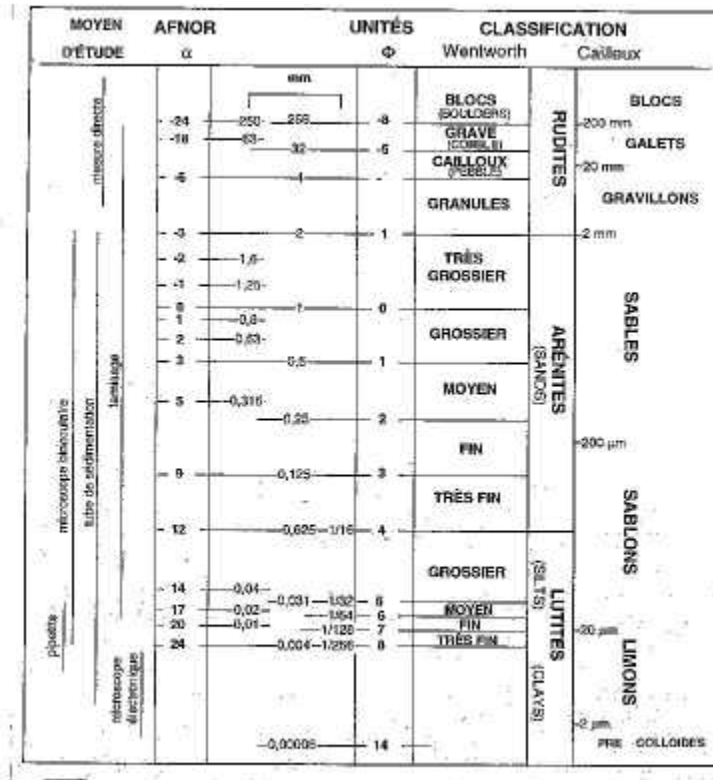


Figure II.7 : Les argiles en tant que roches.

II.6.8. Caractéristiques chimiques et variétés

En tant que roches sédimentaires, les argiles sont des mélanges de minéraux, dominés par un type, dit minéraux argileux (cf. plus loin), auxquels elles doivent leurs propriétés. Néanmoins, en fonction des autres minéraux présents, de la texture de la roche, de son aspect ou de ses propriétés, de son contenu en matière organique, ou de l'utilisation qu'en fait l'homme, de nombreuses catégories sont distinguées :

D'après la texture : **argilites** (roches argileuses sédimentaires non litées), **shales** (roches litées), argiles schisteuses ou schistes argileux, etc...

- D'après les minéraux associés : argilites calcaires (ou marnes), marnes dolomitiques, argilites sableuses, marnes sableuses, shales sableux, marnes à gypse, etc....
- D'après le faciès : argilites bigarrées, marnes rubanées, argiles à varves, argiles plastiques, argiles à silex, etc...

- D'après la matière organique contenue : marnes à Foraminifères, shales à poissons, argilites à plantes, shales bitumineux, etc...
- D'après son usage par l'homme : argiles réfractaires, marnes à ciment, argiles smectiques (*terre à foulon, bentonites, argiles à dégraisser*), etc....

Enfin, une analyse chimique globale des roches argileuses peut se reporter sur un diagramme triangulaire, mais cela ne permet pas de séparer différentes classes d'argiles.

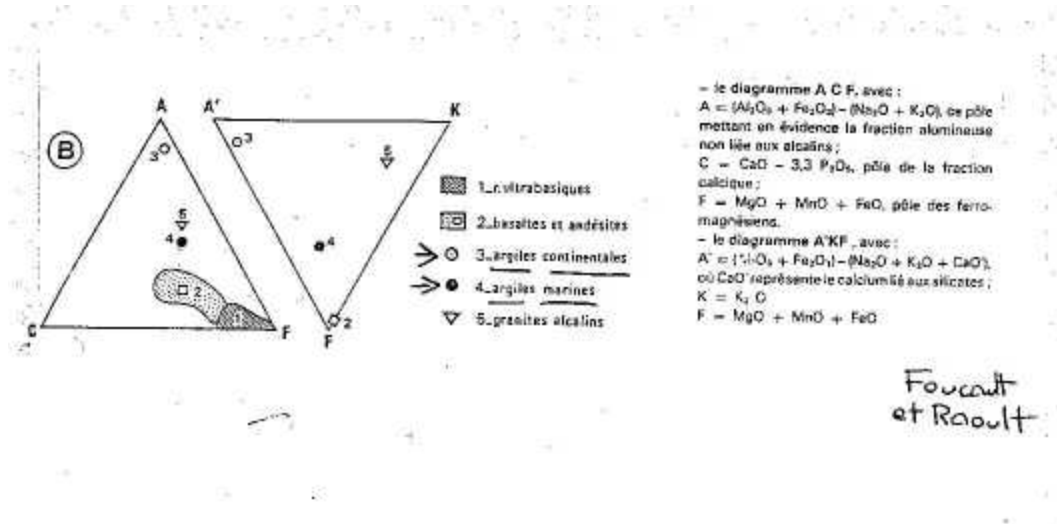


Figure II.8: Les argiles en tant que roches.

II.6.9. Les argiles en tant que minéraux

Aspect et définition microscopique

L'examen de roches argileuses au microscope montre que la plupart des minéraux sont des paillettes silicatées, en général plus petites que les micas, mais apparentés à ceux-ci, physiquement et optiquement. On définit donc cette fois les argiles en tant que famille minérale appartenant aux phyllosilicates. Pour éviter les confusions, il est donc préférable de parler de "minéraux argileux", ou phyllites.

Au microscope optique toujours, certains de ces minéraux peuvent être distingués

II.7. Conclusion

Un remblai est un volume de matériaux de terrassement mis en œuvre par compactage et destinés à surélever le profil d'un terrain ou combler une fouille. Dans ce chapitre, on a rappelé à définition au sol compressibles et leurs différents types dans la première partie, et on a parlé au Comportements et caractéristiques des remblais sur sols compressibles dans la partie suivante.

On a conclu que le sol compressible subissant des remblais doit être traité pour améliorer son comportement.

Chapitre III

METHODES DE RENFORCEMENT DES SOLS

III.1. Introduction

Les méthodes d'amélioration des sols constituent les outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de l'inadaptation de certains terrains à accommoder les ouvrages projetés.

De récentes méthodes d'amélioration des caractéristiques des sols, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation, sont connues et sont perfectionnées sans cesse, elles sont utilisées aujourd'hui comme un élément à part entière des projets.

Après l'amélioration des terrains par ces techniques, il est possible de bâtir dans des sols qui étaient considérés inconstructibles voire médiocres, des ouvrages de plus en plus importants (aérodromes, hangars, silos de stockage, complexes industriels...)

Les techniques d'amélioration des sols sont nombreuses, on peut les classer en trois catégories :

- Dans la première catégorie, on trouve les techniques classiques connues et pratiquées depuis des décennies, leur efficacité a fait sa preuve dans le terrain, on ne citera que quelques-unes, celles qui sont le plus utilisées (le pré chargement et les drains verticaux.)
- Dans la deuxième catégorie on trouve les techniques qui se basent sur le compactage de sol sans apport de matériaux. Elles conduisent à réduire l'indice des vides et à densifier le sol. On citera parmi ces méthodes, celles du compactage dynamique et du vibro-compactage.
- Dans cette catégorie figurent les méthodes de renforcement de sol par incorporation d'un nouveau matériau de bonne résistance dont les caractéristiques sont connues. On citera alors le jet-grouting, les inclusions souples et les inclusions rigides.

On présente dans ce chapitre un bref aperçu sur le mode d'action de chacune de ces catégories de renforcement de sol. (1. *Amélioration des sols*) [16]

III.2. Le pré chargement

Cette méthode est utilisée sur des terrains dont le tassement évolue durant plusieurs années. Elle consiste à appliquer sur le sol une charge égale à la charge définitive P_f majorée éventuellement d'une surcharge P_s qui a pour objectifs

- Produire un développement rapide des tassements de consolidation primaire et accélérer l'apparition et le développement des tassements de consolidation secondaire ;
- Augmenter la résistance au cisaillement et la capacité portante du massif de sol.

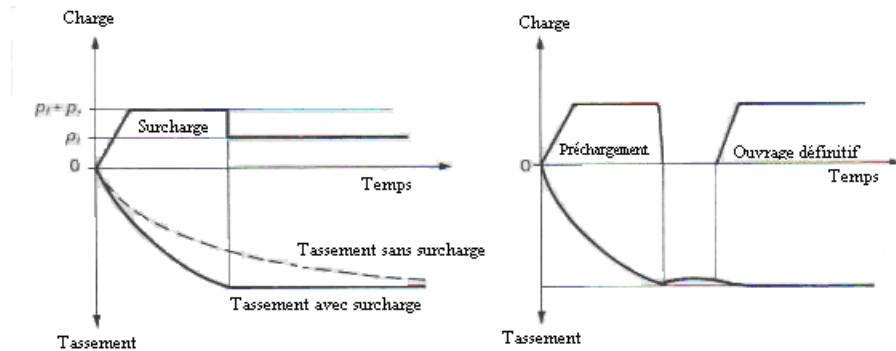


Figure III.1 : Principe de pré chargement pour le contrôle des tassements

Le procédé peut rendre le sol ainsi traité plus rapidement constructible, sans redouter à moyen ou à long terme des tassements absolus ou différentiels importants sous la construction. On applique généralement ces méthodes sur des mauvais terrains composés principalement de sols fins (faible perméabilité). (1. *Amélioration des sols*) [16]

III.3. Les drains verticaux

Cette méthode consiste à la mise en place de réseaux drainants dans le massif du sol (drains verticaux) qui réduisent la distance que l'eau doit parcourir pour atteindre une surface drainante et sortir du sol fin, ce qui a un effet très bénéfique sur les temps de consolidation.



Figure III.2 : Chantier de réalisation des drains verticaux (*Document de Géopac®*)

Les drains de sable sont disposés sous l'ouvrage suivant un réseau triangulaire, hexagonal ou carré (**Fig. III.3**). Ils permettent la réalisation d'un écoulement horizontal de l'eau vers les drains, qui se superpose à l'écoulement vertical, accélérant le temps de consolidation du massif du sol.

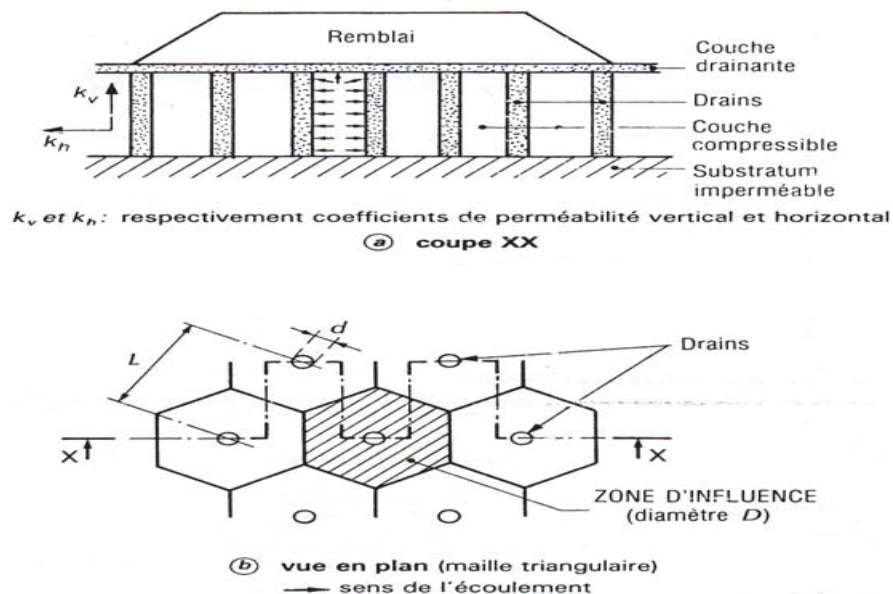


Figure III.3 : Réseaux de drains de sable verticaux (1. *Amélioration des sols*) [16].

III.4. Les techniques d'amélioration par vibrations profondes

III.4.1. Le compactage dynamique (ou pilonnage)

Le compactage dynamique vise l'amélioration des propriétés géotechniques de sols lâches sur de grandes profondeurs par l'application d'impacts de très forte intensité. Le procédé consiste à faire chuter de façon méthodique et répétée de lourds pilons d'acier (Fig. : III.4) sur la surface du sol à traiter. Les impacts qui en résultent provoquent le resserrement des sols traités et l'amélioration de leurs caractéristiques géotechniques.



Figure III.4 : Exemple d'un pilon (à gauche) et l'empreinte laissée après sa chute (à droite)
(Document de Geopac ®)

Le compactage dynamique est notamment utilisé pour :

- support fiable pour fondations superficielles de tous types de structures par l'amélioration des caractéristiques de portance et la satisfaction des critères de tassement total et différentiel sévères;
- assurer la bonne tenue du revêtement dans les aires de stockage ou de manutention de matériaux hautement chargés, telles celles des entrepôts, pistes d'aéroport, terminaux de conteneurs, etc. ;
- réduire le potentiel de liquéfaction des sols dans les zones à haute sensibilité sismique ;
- stabiliser pentes, barrages, digues, ...etc. ;
- réduire les vides dans les dépotoirs (décharges) ;
- défoncer cavernes et mines abandonnées ;
- densifier des sols marins et remblais placés sous l'eau, ...etc.

Par contre, cette technique reste peu courante du fait de l'encombrement qu'occasionnent les appareils et le bruit engendré par les impacts, et s'utilisera surtout sur des surfaces importantes à l'écart d'habitations. (2. *Fondations profondes pour le bâtiment*) [17].

Phase 1 : Fonçage

On réalise le compactage en masse des sols grenus à l'aide de vibreurs spécifiques à basses fréquences. L'outil, dont la puissance et les caractéristiques sont variables en fonction du terrain, est foncé jusqu'à la profondeur finale à atteindre. Sa descente s'opère grâce à l'effet conjugué de son poids, de la vibration et de l'eau de lancement. Le débit d'eau est alors diminué. Les outils sont suspendus à des grues, mais peuvent aussi, pour de faibles profondeurs, être montés sur porteurs.

Phase 2 : Compactage

Le compactage est alors réalisé par passes successives de bas en haut en remontant l'outil, selon des critères déterminés par des essais préalables. Le volume compacté est un cylindre de diamètre pouvant atteindre 5 m. L'augmentation progressive de l'intensité consommée par le vibreur permet de mesurer la croissance de la compacité du sol.

Phase 3 : Apport de matériaux

Autour du vibreur apparaît un cône d'affaissement, que l'on comble au fur et à mesure soit par des matériaux d'apport (A), soit en décapant progressivement les matériaux du site (B). En fonction de l'état initial, on peut atteindre une quantité de 10 % de matériaux ajoutés par rapport au volume traité.

Phase 4 : Finition

Après traitement, la plate-forme est réglée et recompactée à l'aide d'un rouleau vibrant.



Figure III.5 : Exemple d'un pilon (à gauche) et l'empreinte laissée après sa chute (à droite)
(Document de Geopac ®)

Les vibrations émises par l'outil permettent un réarrangement optimal des grains de sable, ou autres matériaux en place, de manière à ce qu'ils occupent le plus petit volume possible. Ce procédé agit donc par augmentation de la densité en place, ou réduction de la porosité. Il consiste non à créer des éléments porteurs, mais à augmenter la capacité portante du terrain (Fig. : III.6), qui pourra alors être sollicité par des fondations superficielles.



Figure III.6 : Etat de compacité du sol avant et après traitement.

III.5. Les techniques d'amélioration par inclusion (renforcement)

III.5.1. Jet Grouting

Le terme "Soilcrete" est la contraction des mots anglais "soil" et "concrete"; ce qui signifie en français "Béton de sol". Ce procédé se définit comme une stabilisation de sol à l'aide de ciment. Le sol est découpé grâce à des jets sous haute pression d'eau ou de coulis de ciment (éventuellement enrobés d'air), présentant des vitesses supérieures ou égales à 100m/sec en sortie de buse.

Le sol découpé autour du forage est mélangé au coulis de ciment. Ce mélange sol/coulis est en partie refoulé jusqu'en haut du forage par l'espace annulaire entre les tiges et la paroi du forage (**Figure : III.7**). Différentes configurations géométriques d'éléments de Soilcrete peuvent être réalisées. Or le rayon de découpage du jet, qui peut atteindre 2,50 m, varie en fonction du type de sol traité, du type de procédé Soilcrete et de la nature du fluide à haute énergie.

Les principales applications qui font appel à ce procédé sont :

- Reprise en sous-œuvre sous fondations existantes ;
- Murs de soutènement et cuvelages étanches ;
- Confortement d'excavations (tunnels) et étanchement de barrage



Figure III.7 : Différentes étapes de la réalisation d'une colonne de *Jet Grouting*

III.5.2. Les inclusions rigides

Le renforcement par inclusions rigides verticales est envisagé pour des ouvrages de types remblais, dallages, silos... lorsque le sol est trop compressible pour supporter l'ouvrage. On caractérise le renforcement par inclusions rigides verticales par la combinaison entre les inclusions qui assurent le renforcement et une plateforme de transfert de charge disposée entre le réseau d'inclusions et l'ouvrage. Cette plateforme assure la répartition de la charge entre les inclusions et le sol compressible (Fig : III.8). Les inclusions peuvent être de différentes natures et construites par différentes méthodes. Ce type de renforcement peut être défini par le fait que la charge s'applique simultanément aux têtes d'inclusions et au sol compressible, ce qui la différencie des méthodes de fondations traditionnelles. Le dimensionnement du réseau d'inclusions et de la plateforme de transfert de charge doit être tel que la part transmise aux inclusions soit beaucoup plus grande que celle transmise au sol.



Figure III.8 : Réseau d'inclusions rigides (*Document de Soletanche Bachy®*)

Le rôle des inclusions est de transmettre la charge due au poids de l'ouvrage et les charges de service vers le substratum afin de réduire ou même annuler les tassements. Pour cela, les inclusions

sont posées sur la couche dure ou légèrement ancrées dans celle-ci. Les inclusions peuvent aussi être coiffées par une tête plus large afin d'augmenter le taux de couverture et optimiser l'efficacité du dispositif. Ces inclusions sont mobilisées d'une part par la charge directement appliquée sur leur tête ; mais aussi par l'effet d'accrochage du sol encaissant lorsque celui-ci tasse sous le chargement appliqué par le poids de l'ouvrage. (Fig. III.9)

La plateforme de transfert de charge a un rôle tout aussi important, puisque les mécanismes assurant la répartition de la charge s'y développent. Cette plateforme peut être composée de matériaux granulaires traités ou non traités ; elle peut être renforcée ou non par une ou plusieurs nappes géosynthétiques ; sa hauteur et ses caractéristiques mécaniques sont des paramètres importants vis à vis du développement des mécanismes de transfert de charge.

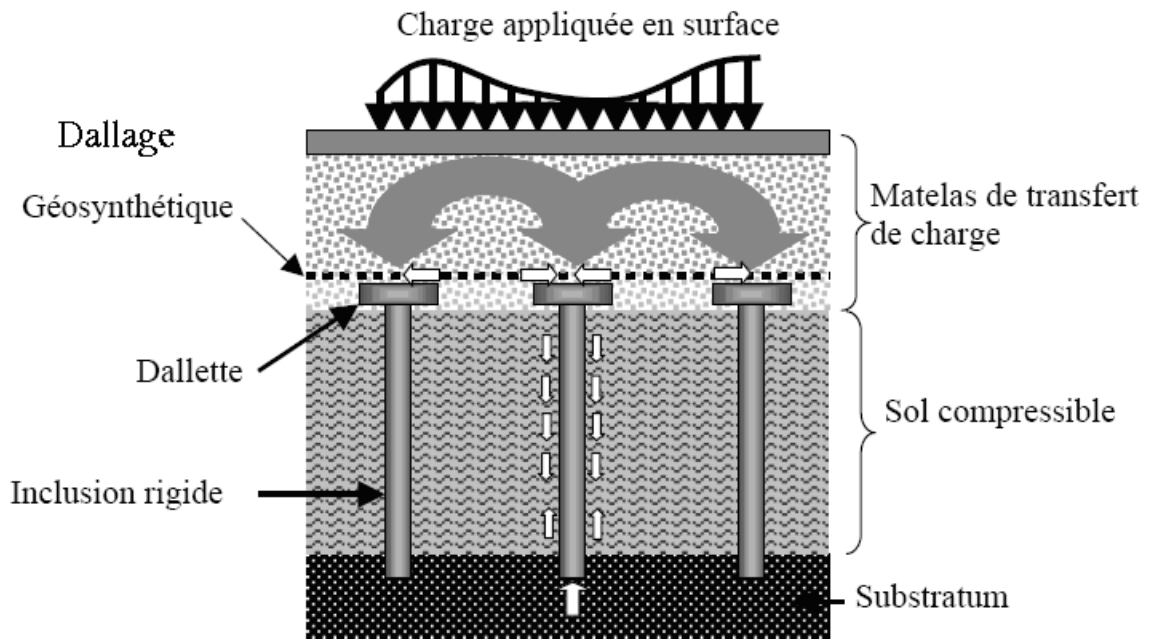


Figure III.9 : Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides verticales

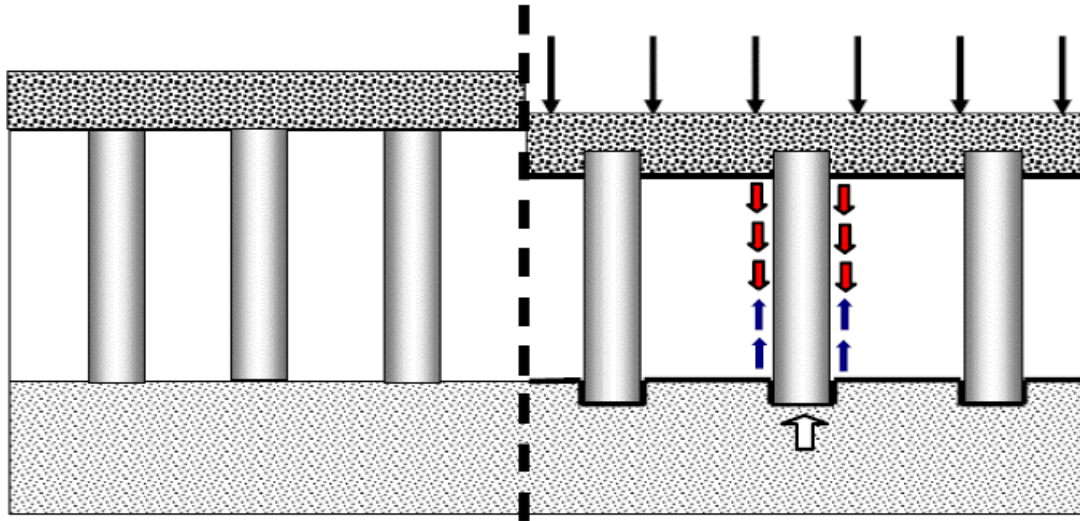


Figure III.10 : Réseau d'inclusions soumis à un chargement d'après Berthelot *et al.* (2003)

III.5.3. Les plots ballastés

Le principe de cette technique est le renforcement du sol par la création de colonnes de 2 à 3m de diamètre (Fig. III.11), en matériaux granulaires très compactés. Les colonnes ainsi formées sont appelées *plots ballastés pilonnés*

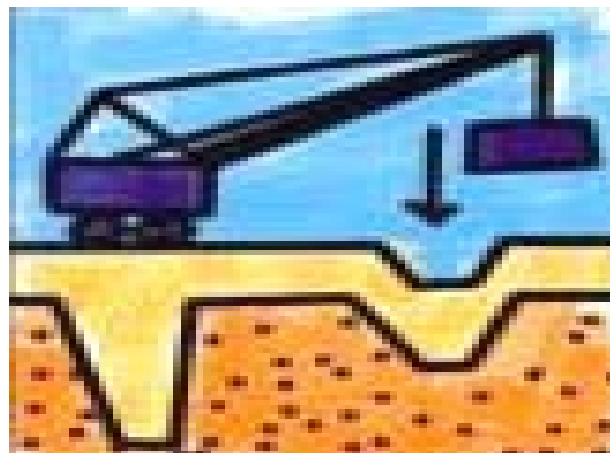


Figure III.11 : Principe de réalisation des plots ballastés (*Document de Ménard Soltraitement®*)

La mise en œuvre s'effectue à l'aide d'engins spécialisés (Fig : II.14), proches de ceux utilisés pour le compactage dynamique. Les deux techniques sont fréquemment employées de manière complémentaire sur les mêmes chantiers.



Figure III.12 : Engin utilisé pour la réalisation des plots ballastés (*Document de Ménard Soltraitement®*)

Les plots ballastés vont pénétrer dans le sol par pilonnage, à l'aide d'une masse de 15 à 30 tonnes, en chute libre de 10 à 30 mètres. L'emplacement du plot est préparé par une pré-excavation qui va être partiellement remplie d'un bouchon de matériaux que le pilonnage fera descendre à la profondeur voulue. Le plot est ensuite rechargé puis compacté par phases successives.

Les phases de réalisation d'un puits (ou plots) ballastés sont les suivantes : (Fig. III.14)

- 1- création d'une plate-forme de travail en ballast ;
- 2- poinçonnement de la plate-forme avec un pilon descendu d'une hauteur de chute variable (15 à 30 m) et compatible avec le matériel employé ;
- 3- après plusieurs impacts, remplissage du cratère (cavité) par du ballast ;
- 4- reprise du pilonnage jusqu'au refus fixé au préalable.

PLATE FORME DE TRAVAIL

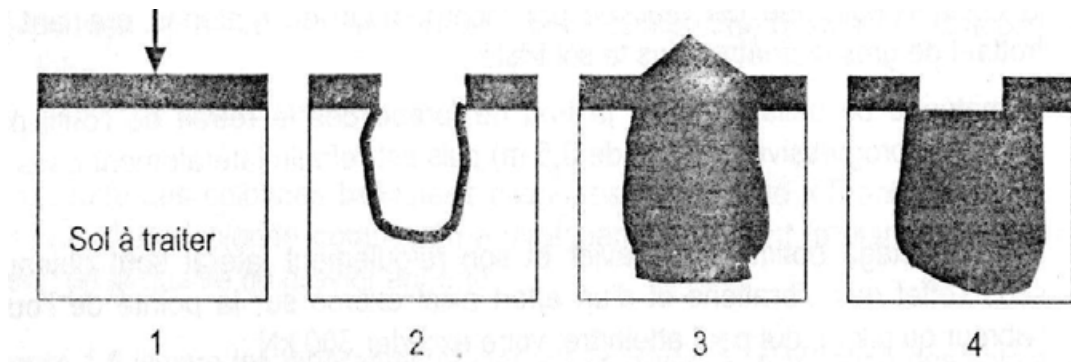


Figure III.13 : Mise en œuvre des plots ballastés

Les plots ballastés présentent l'avantage d'être réalisés en gros diamètre, de 1,5 m (Gambin, 1984) à 4m (Liausou, 1984), ce qui permet d'y asseoir, des structures transmettant des charges importantes.



Figure III.14 : Plot ballasté avant remblaiement type (*Document de G.T.S®*)

III.5.4. Les colonnes ballastées

Les colonnes ballastées constituent une méthode de renforcement des sols par l'incorporation de colonnes de gravier compactées dans le sol. Ce procédé convient à des sols argileux ou limoneux contenant plus de 10% à 15% de limons et d'argiles. Les colonnes ballastées ne constituent en rien des éléments de fondation. Leur but est de conférer au sol de nouvelles caractéristiques, générales et/ou locales sous l'ouvrage à construire, afin que les différents éléments d'infrastructures de celui-ci (semelles isolées ou filantes, radiers, dallages, ouvrages en terre, ...) aient un comportement prévisible, justifiable et compatible avec les règlements et tolérances s'appliquant à la structure de

l'ouvrage et a son exploitation. Elles permettent la maîtrise du comportement des fondations superficielles du futur ouvrage. Le matériau de la colonne ballastée est un matériau pulvérulent de forte portance, la colonne constitue donc un drain et permet donc en plus de l'augmentation de la capacité portante du sol existante d'augmenter la vitesse de consolidation du sol [19]

III.5.5. Objectif de traitement

L'amélioration de sol par colonnes ballastées consiste à mettre en œuvre un « maillage » de colonnes constituées de matériaux ou graveleux, amenant une densification des couches compressibles et les rendant aptes à reprendre des charges issues de fondations. [16]

Le traitement d'un sol par colonnes ballastées conjugue les actions suivantes :

- Augmenter la capacité portante du sol ;
- Diminuer les tassements totaux et différentiels ;
- Diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant ;
- Diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des Séismes.

III.5.6. Domaines d'applications

❖ Ouvrages

Les domaines d'application des colonnes ballastées sont variés et ont évolué au cours des années en fonction des évolutions technologiques inhérentes à ces méthodes ainsi que des améliorations souhaitées. La liste suivante, bien que non exhaustive, rend compte de la variabilité des applications :

- remblais routiers, ferroviaires ;
- bâtiments tels que des habitations individuelles ou collectives de quelques étages,
- des bâtiments industriels comme des bureaux, hangars, zones de production, silos,
- réservoirs, stations de traitement des eaux usées (bacs de décantation, installations annexes) ;
- pistes d'aéroport ;
- stabilisation de talus. [17]

❖ *Sols concernés*

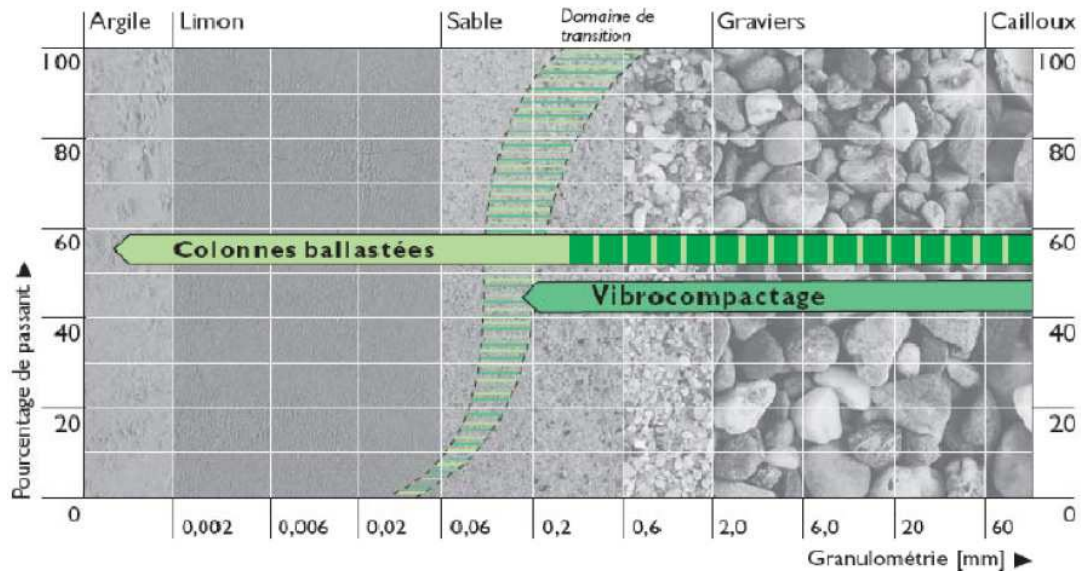


Figure III.15 : Les sols concernés par la technique des colonnes ballastées

(Document Keller).

III.5.7. Mode opératoire

Les colonnes ballastées sont mises en œuvre :

- **Par voie sèche** : On utilise le lançage à l'air.
- **Par voie humide** : On utilise le lançage à l'eau.
- **Par pilonnage.**

Le choix de l'outil, de ses caractéristiques et de la méthode de réalisation dépend étroitement :

- De la nature et de l'état de saturation du sol ;
- Du but recherché ;
- Des caractéristiques des matériaux d'apport. [17]

Les matériaux d'apport doivent être de qualité et de granulométrie contrôlées et les Plus homogènes possibles (gaves naturelles, roulées ou concassées).

La traversée des couches compactes ou d'obstacles peut être facilitée par un forage préalable, avec ou sans extraction de terrain. Tout volume excavé est rempli et compacté par le matériau d'apport.

III.5.8. Colonnes exécutées par voie humide

La mise en œuvre des colonnes ballastées par voie humide, dite aussi par vibro-substitution (vibro-replacement en anglais) consiste à :

- réaliser un forage par auto-fonçage et lançage à l'eau jusqu'à la profondeur désignée ;
- remonter le vibreur, avec parfois des ramonages successifs, et laisser tomber gravitairement le ballast dans le forage préalable ;
- compacter le ballast par passes successives jusqu'à la finition de la colonne. [18]

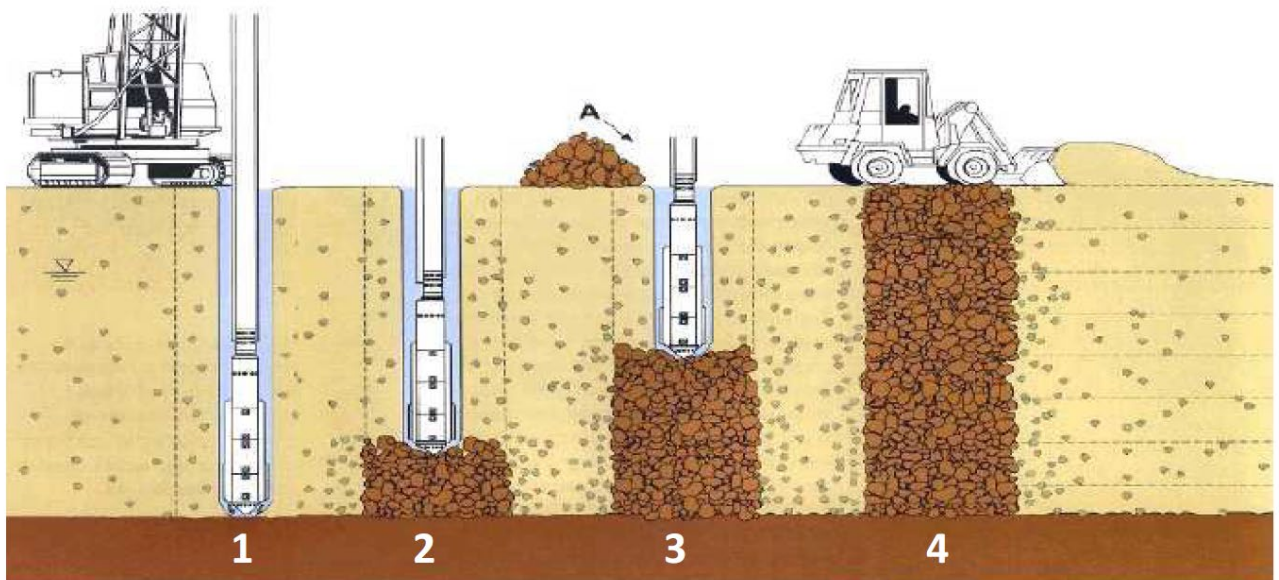


Figure III.16 : Mise en œuvre des colonnes ballastées par voie humide

(Document de Keller)

III.5.9. Colonnes exécutées par voie sèche

La réalisation des colonnes ballastées par voie sèche, dite encore par vibrorefoulement (vibro-displacement en anglais) consiste à :

- auto-foncer le vibreur directement dans le sol par refoulement à l'aide de l'air jusque à la profondeur désignée ;

- remonter progressivement le vibreur tout en laissant descendre par gravité et par pression d'air, le ballast approvisionné par chargeur dans une benne coulissant le long du mât ;
 - compacter le ballast par passes successives de l'ordre de 0.5 m jusqu'à la finition de la colonne.
- [18]



Figure III.17 : Mise en œuvre des colonnes ballastées par voie sèche (Documentt de Keller)



Figure III.18 : Colonnes ballastées réalisées par voie sèche [doc. KELLER].

III.5.10. Colonnes ballastées pilonnées (« pieux de gravier Frankie »)

La réalisation des colonnes ballastées pilonnées gravier ») du procédé « Franki » nécessite les étapes suivantes :

- 1- confection du bouchon de battage « Franki » à l'aide du gravier ;
- 2- battage au fond du tube avec dameur intérieur ;
- 3- expulsion du bouchon de gravier ;
- 4- réalisation de la colonne par damage de charges de gravier et extraction de tube ;
- 5- finition de la colonne.

La technique des colonnes ballastées pilonnées du procédé « Franki » garantie la réalisation d'une colonne compactée énergiquement et dont le diamètre varie en fonction de la qualité du gravier apporté. [18]

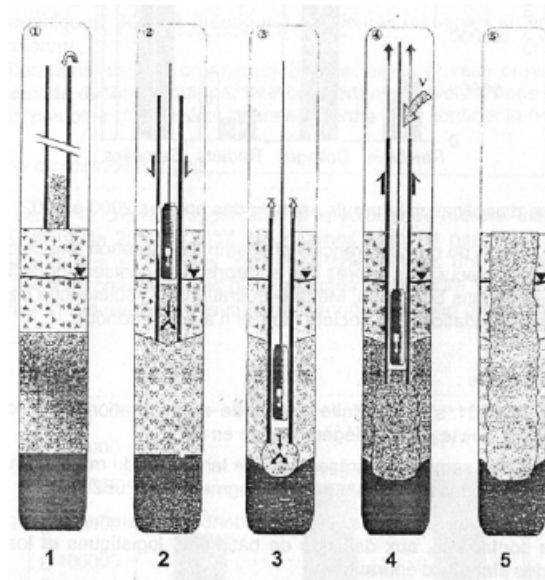


Figure III.19 : Mise en œuvre des colonnes pilonnées.

III.5.11. Les avantages

Les Colonnes Ballastées sont réalisées pour traiter les problèmes de tassement des couches compressibles et permettent de conserver des systèmes de fondations superficielles et des dallages sur terre-plein ;

- Leur caractère drainant permet, le cas échéant, d'accélérer la consolidation des sols en place ;
- Pas de recépage ni de temps de séchage avant l'intervention du gros œuvre,
- Terrassement directement dans les colonnes pour la réalisation des semelles de fondation ;
- Traitements anti-liquéfaction des sols en apportant des effets combinés de drainage et d'amélioration de la résistance au cisaillement du sol renforcé. [19]

II.6. Conclusion

Un sol compressible a des faibles caractéristiques physique-mécaniques qu'on doit les améliorer. Il y a plusieurs méthodes et techniques de renforcement dont les colonnes ballastées utilisées dans ce mémoire.

Chapitre IV

Modélisation numérique

IV.1. Introduction

Les évolutions technologiques ont amené les ingénieurs à réaliser des travaux d'ingénierie géotechnique de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus fortes. Pour mener à bien ces projets et compte tenu de la complexité des méthodes analytiques, l'ingénieur utilise des méthodes lui permettant de simuler le comportement de systèmes physiques complexes. Sous réserve de progrès en informatique et de réussite en mathématiques. En raison de son large champ d'application, la méthode des éléments finis (FEM) est devenue la méthode numérique la plus efficace à l'heure actuelle et est largement utilisée dans le domaine de l'ingénierie géotechnique.

IV.2. Code de calcul en éléments finis Plaxis 2D

Le développement des méthodes numériques de calcul, notamment les méthodes des éléments finis, a permis de trouver des solutions à de nombreux problèmes, et ces modèles permettent de décrire très précisément le comportement des sols. Quant aux algorithmes de résolution, leur fiabilité et leurs performances dépendent avant tout de la méthode de calcul utilisée et des critères de convergence fixés. Cette étude a utilisé le logiciel de calcul PLAXIS 2D qui repose sur ces principes et est connu pour donner des résultats satisfaisants. La motivation pour choisir ce logiciel était sa facilité d'utilisation et sa flexibilité, et le fait qu'il était bien adapté aux objectifs fixés pour l'analyse de la stabilité des remblai routier.

Le programme contient les étapes suivantes :

- Programme d'entrée de données (input)
- Programme de calculs (Calculations)
- Programme des résultats (Output)
- Programme courbe (Curves)

IV.2.1. PLAXIS-Input

Les sous-programmes d'entrée, également appelés préprocesseurs, contiennent tous les outils nécessaires pour créer et modifier des modèles géométriques, générer des maillages d'éléments finis et définir des conditions initiales.

IV.2.2. PLAXIS - calculation

Le gestionnaire ou la sous-routine de calcul contient les outils nécessaires pour définir les phases et lancer la routine de calcul par éléments finis.

IV.2.3. PLAXIS - Output

Soit le post-processeur contient des outils permettant de visualiser les résultats des différentes étapes de calcul, tels que les déplacements aux nœuds, les contraintes et les efforts dans les éléments de structure, etc.

IV.2.4. PLAXIS - Curves

Les sous-programmes de courbe sont utilisés pour construire des courbes charge-déplacement, des chemins de contrainte et divers autres graphiques.

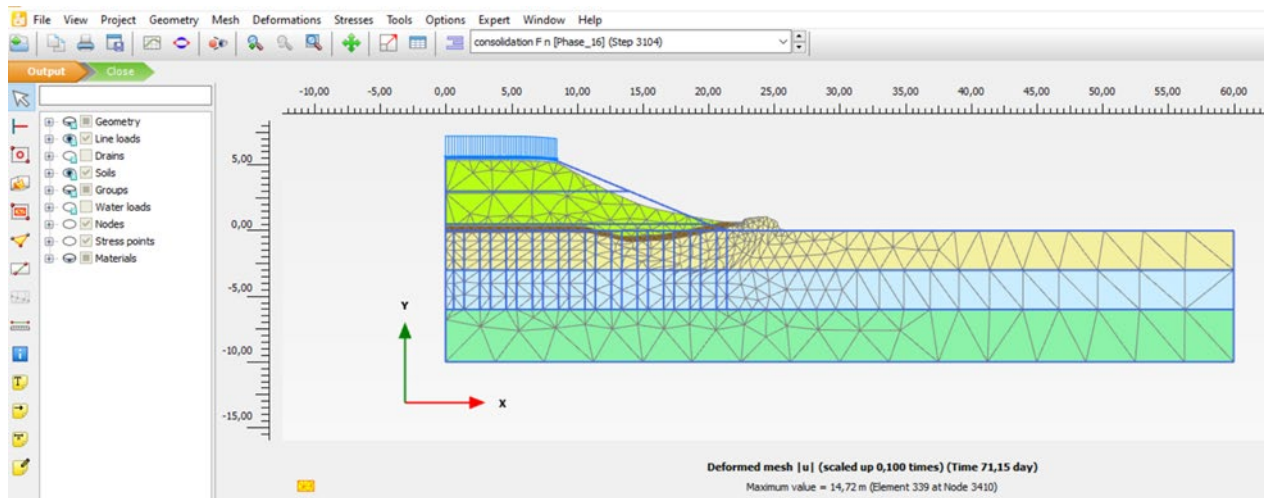


Figure IV.1 : Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Output.

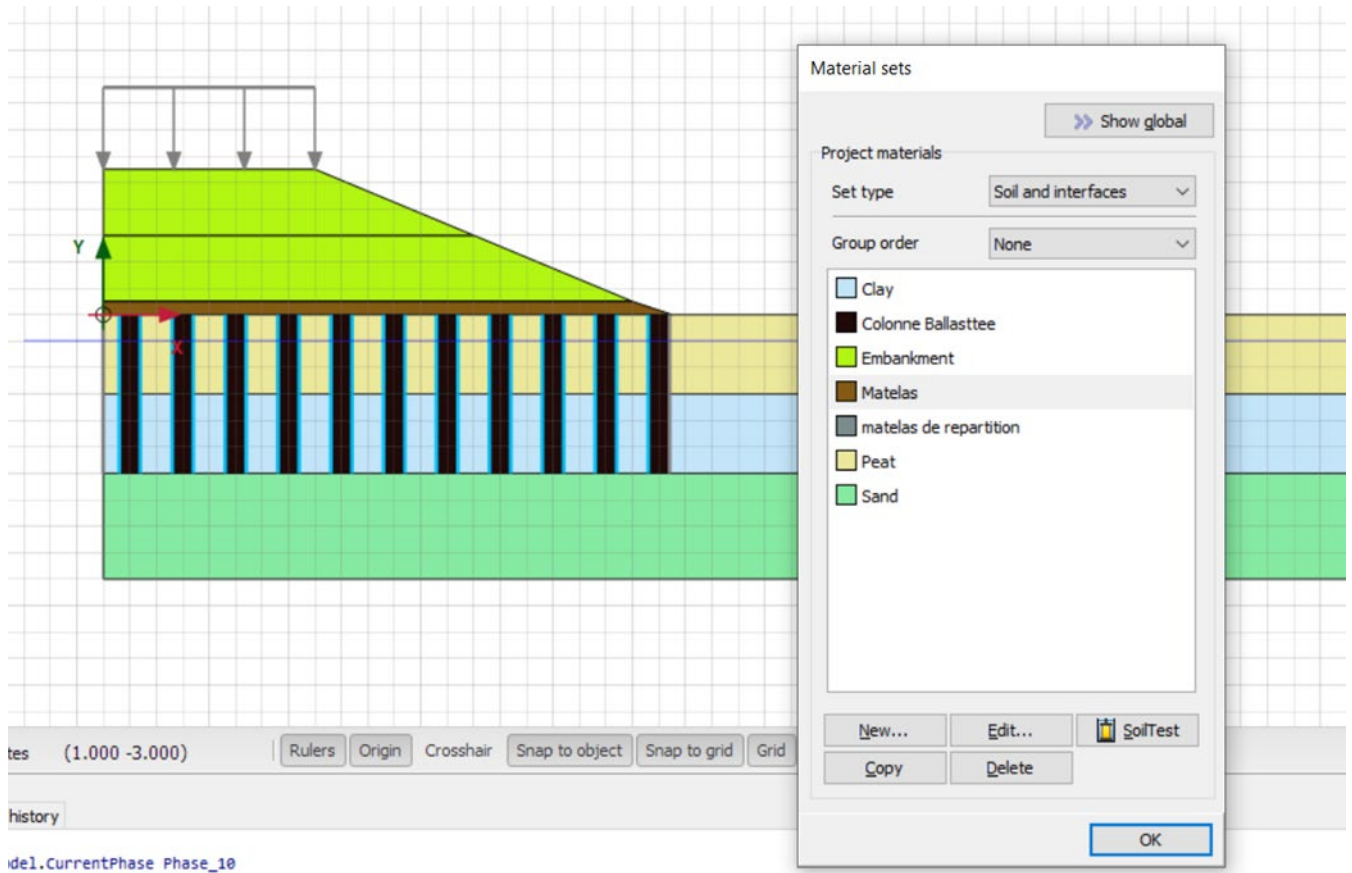


Figure IV.2 : Définition des paramètres des matériaux.

- La courbe de résultat PLAXIS2D sera calculée à ces points. Après avoir appuyé sur <<calculer>>, le calcul démarre. Une fois cela fait, les résultats peuvent être visualisés à l'aide de la touche <<output>>.

IV.3. Visualisation des Résultats

Le code PLAXIS2D contient plusieurs outils de visualisation et d'analyse des déformations liées au sol (maillage déformé, déplacement total et déformation) ou des contraintes (contrainte effective, contrainte totale, point plastique, pression interstitielle)

Comme indiqué ci-dessous :

IV.4. Présentation du modèle étudié

Le modèle étudié dans ce présent travail est un remblai routier reposant sur un sol compressible renforcé par colonnes.

Le remblai est de 5 mètres de hauteur réalisé en deux couches de 2.50 m chacune avec une pente de 1V/2H.

Le sol est formé de trois couches : deux couches compressibles (argile et tourbe) de 6 mètres de hauteur surmontant une couche résistante de sable dense.

Les colonnes ballastées sont de 80 cm de diamètre avec un entraxe de 2 m, insérées dans la totalité des deux couches molles et coiffées par un matelas de répartition de contraintes de 50 cm d'épaisseur.

Un chargement de 30 KN/m² est appliqué au dessus du remblai (charge de trafic).

Pour simuler le comportement du remblai et de la couche de sable dense, le critère de Hardning Soil est adopté (pour prendre en compte l'écrouissage du sol). Tandis que, pour les colonnes ballastées et le matelas de répartition le critère de Mohr – Coulomb est choisi.

Les couches molles sont régies par le modèle Soft Soil pour prendre en compte la compressibilité du sol.

Le profil du modèle est représenté dans la figure suivante :

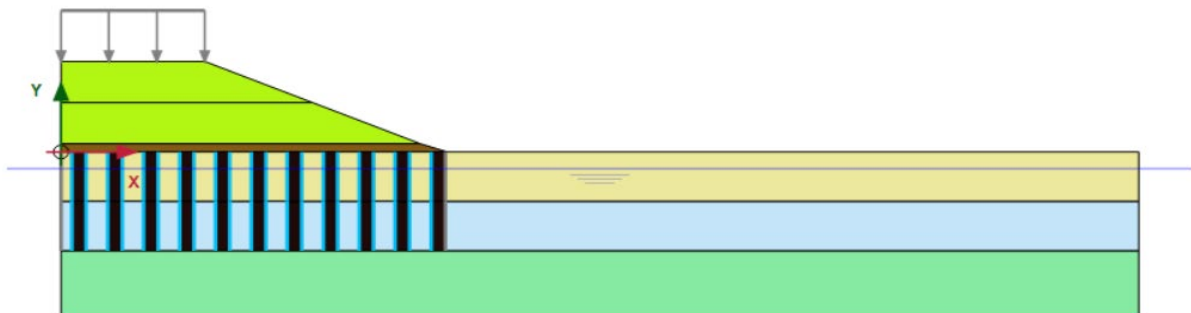


Figure IV.3 : Géométrie du modèle de remblai.

Maillage

Le maillage générés par logiciel est représenté dan la figure suivante :

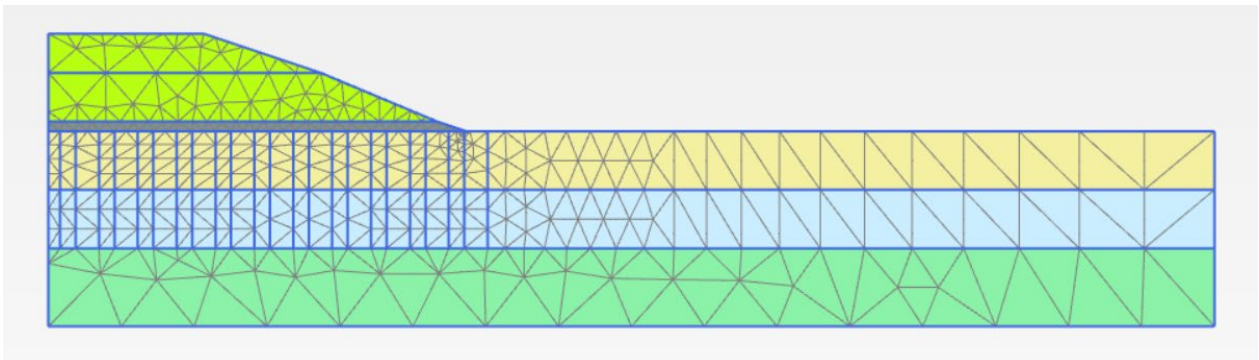


Figure IV.4 : Maillage du modèle.

IV.5. Caractéristiques des matériaux utilisés

Les différent parametres nécessaires pour introduire les matériaux du remblai et des couches de sol sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Propriétés des matériaux de remblai et des couches de sol

Parametres	Nom	Remblai (Embankment)	Sable (Sand)	Tourbe (Peat)	Argile (Clay)	Unité
Modèle du matériau	Modèle	Hardning Soil	Hardning Soil	Soft Soil	Soft Soil	-
Type de comportement	Type	Drainé	Drainé	Non drainé	Non drainé	-
Poids volumique γ_h	γ_{sat}	19	20	12	18	KN/m ³
Poids volumique γ_d	γ_{unsat}	16	17	8	15	KN/m ³

Chapitre IV : Modélisation numérique

Coefficient de compressibilité	λ^*	-	-	0.15	0.5	
Coefficient de gonflement	K^*	-	-	0.30	0.01	
Module secant triaxial	E_{50}^{ref}	$2.5 * 10^4$	$3.5 * 10^4$	-	-	[KN/m ²]
Module oedométrique	E_{oed}^{ref}	$2.5 * 10^4$	$3.5 * 10^4$	-	-	[KN/m ²]
Module charg/recharg	E_{ur}^{ref}	$7.5 * 10^4$	$1.05 * 10^5$	-	-	[KN/m ²]
Power (m)	m	0.5	0.5	-	-	-
Cohésion	C'_{ref}	1	0	2	1.0	[KN/m ²]
Angle de frottement	φ	30	33	23	25	°
Angle de dilatance	ψ	0	3	0	0	°
Perméabilité horizontale	k_x	3.499	7.128	0.100	0.047	[m/j]
Perméabilité verticale	k_y	3.499	7.128	0.050	0.047	[m/j]

Les paramètres des matériaux utilisés pour les colonnes et le matelas sont présenté dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 : Propriétés des matériaux des Colonnes ballastées et du Matelas de répartition

Parametre	Nom	Colonne ballastée	Matelas de répartition	Unité
Modèle du matériau	Modèle	Mohr- Culomb	Mohr- Culomb	-
Type de comportement	Type	Drainé	Drainé	-
Poids volumique γ_h	γ_{sat}	20	22	[KN/m ³]
Poids volumique γ_d	γ_{insat}	18	20	[KN/m ³]
Module oedométrique	E	$60 * 10^3$	$20 * 10^3$	[KN/m ²]
Cohésion	C'	1	5	[KN/m ²]
Angle de frottement	φ	38	30	°
Angle de dilatance	ψ	8	0	°
Coefficient de Poisson	ν (nu)	0.30	0.30	-
Perméabilité horizontale	k_x	1.70	1.00	[m/j]
Perméabilité verticale	k_y	1.70	1.00	[m/j]

IV.6. Phases de calcul

Les propriétés du matériau constituant le matelas de répartition sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 : Les phases de calcul à suivre

Pour le sol non renforcé	Pour le sol renforcé
Phase 0 : phase initiale	Phase 0 : phase initiale
Phase 1 : remblai 1	Phase 1 : matelas de répartition
Phase 2 : consolidation	Phase 2 : colonnes ballastes
Phase 3 : remblai 2	Phase 3 : remblai 1
Phase 4 : chargement	Phase 4 : consolidation
Phase 5 : consolidation finale	Phase 5 : remblai 2
Phase 6 : facteur de sécurité	Phase 6 : chargement
	Phase 7 : consolidation finale
	Phase 8 : facteur de sécurité

IV.7. Analyse des résultats

Pour bien étudier l'efficacité du renforcement de sol mou par colonnes, on présente les résultats suivant : l'évolution de tassement de consolidation, la variation de la surpression interstitielle ainsi que la stabilité du remblai (facteur de sécurité).

La figure suivante montre les points choisis pour visualiser les résultats : le pied du remblai est sélectionné pour le facteur de sécurité ($x=26.0$; $y=0.00$), alors que le point situé entre les colonnes sous le remblai au milieu de la couche molle ($x=0.30$; $y=-3.00$) est sélectionné pour le tassement et la surpression interstitielle.

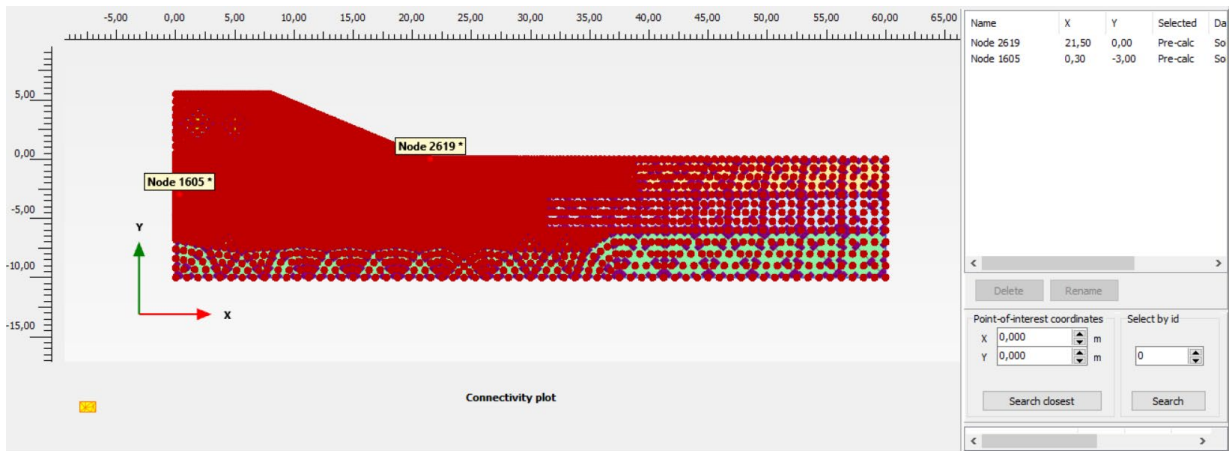


Figure IV.5 : Position des points choisis pour visualiser les résultats

IV.7.1. Analyse du tassement de consolidation

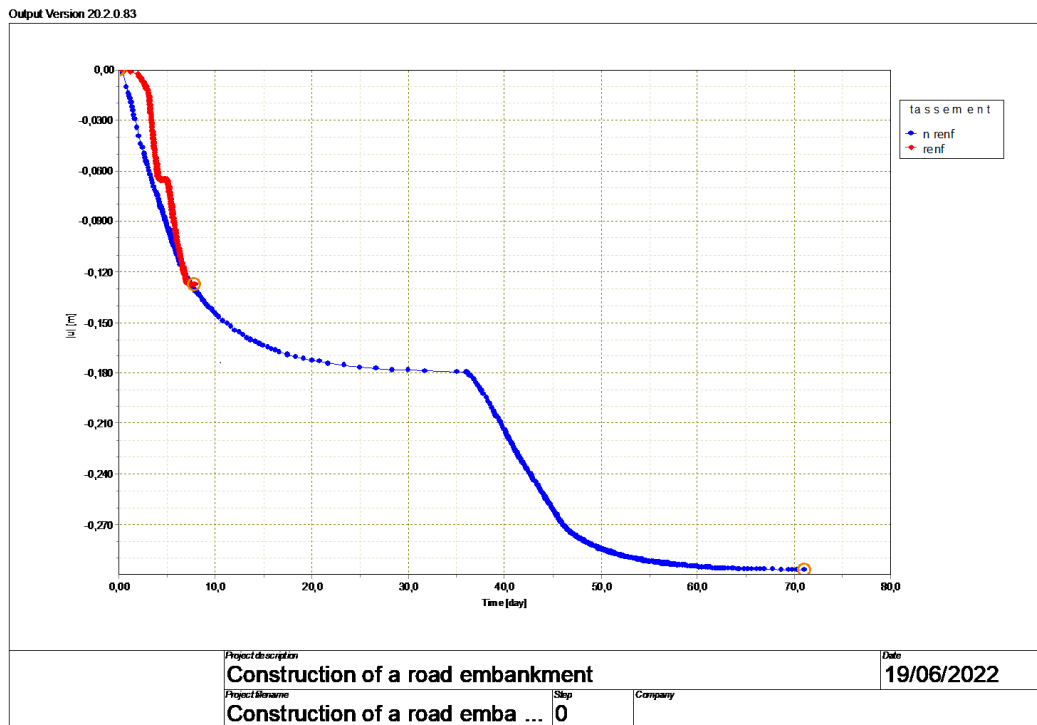


Figure IV.6 : Courbe du tassement de consolidation

D’après ce graphe, on constate un tassement final de 30 cm après un temps de consolidation de 72 jours, pour le sol non renforcé. Tandis que, pour le sol renforcé par colonnes, on obtient un tassement final de 13 cm à la fin de la consolidation après 8 jours uniquement. Donc une diminution de près de 60% du tassement, près de 90 % du temps de consolidation, ce qui est significatif.

IV.7.2 Analyse de la surpression interstitielle

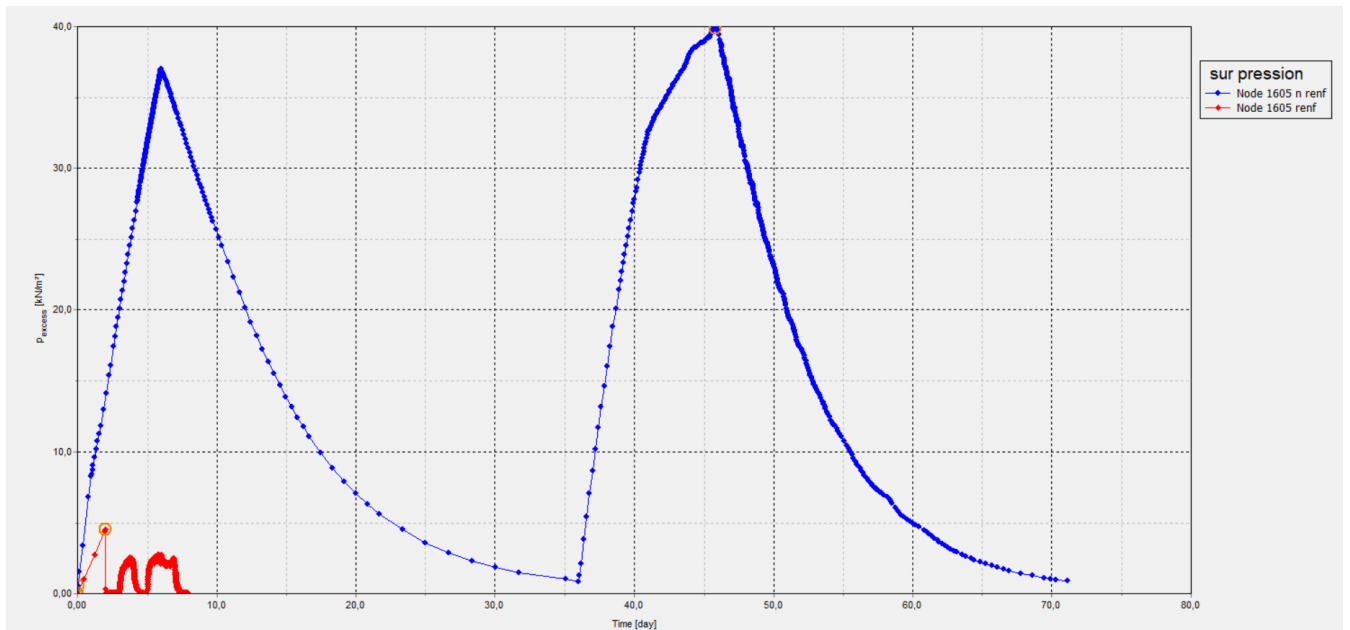


Figure IV.7 : Courbe de Variation de la surpression interstitielle

D'après les courbes de surpression, pour le sol non renforcé, on remarque une augmentation importante de la surpression ($pp = 37$ KPa) après remblaiement (1^{ère} couche de remblai) donc on doit laisser le temps passer pour permettre la dissipation de cette surpression. La 2^{ème} séquence de remblaiement provoque, encore, une surpression plus élevée ($pp=40$ KPa).

Par contre pour le terrain renforcé par colonnes ballastes, on remarque une surpression pratiquement petite ($p = 5$ KPa) après les deux phases de remblai par rapport au terrain précédent. Cela signifie que les colonnes ont joué leur rôle de drainage.

IV.7.3 Analyse du facteur de sécurité

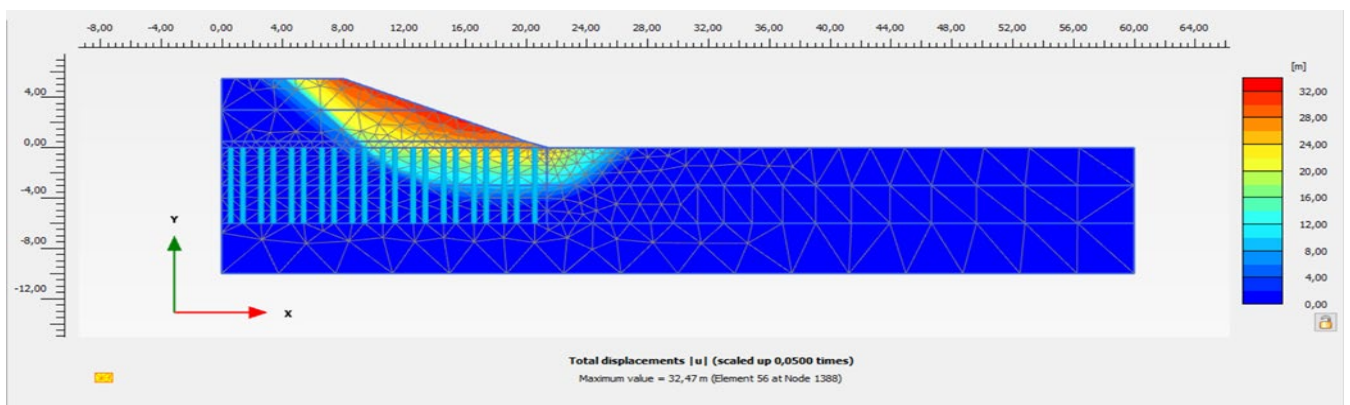


Figure IV.8 : Déplacement total.

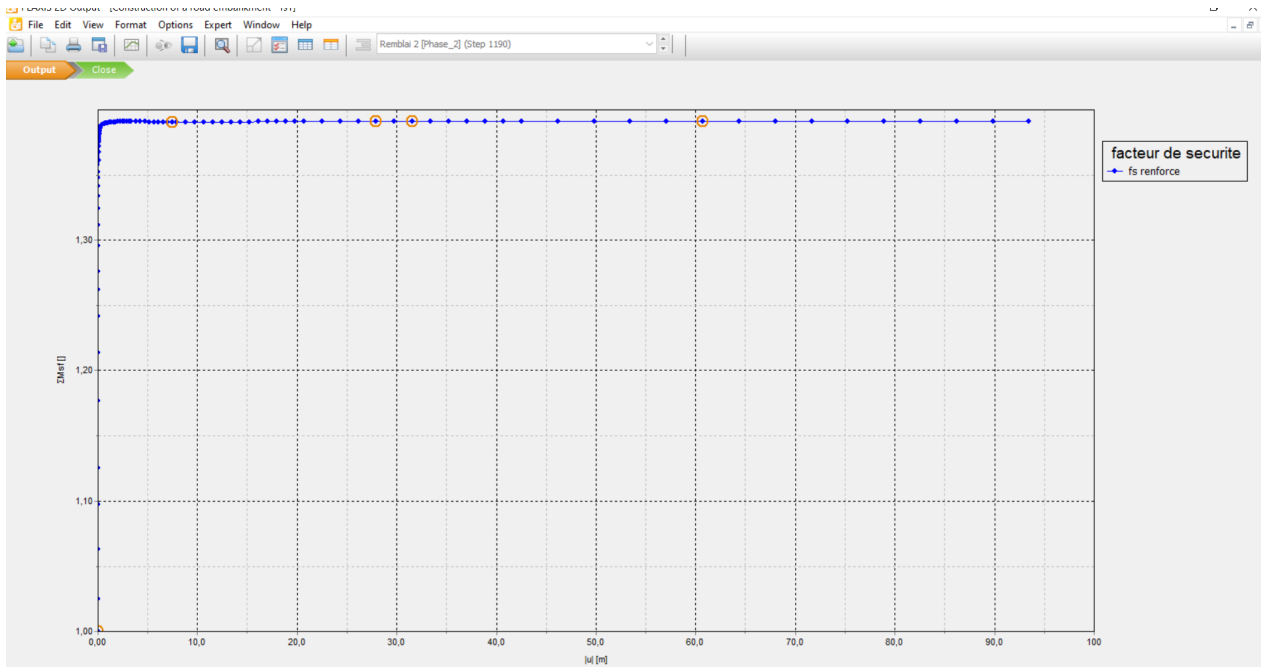


Figure IV.9 : Graphe du facteur de sécurité pour le sol renforcé

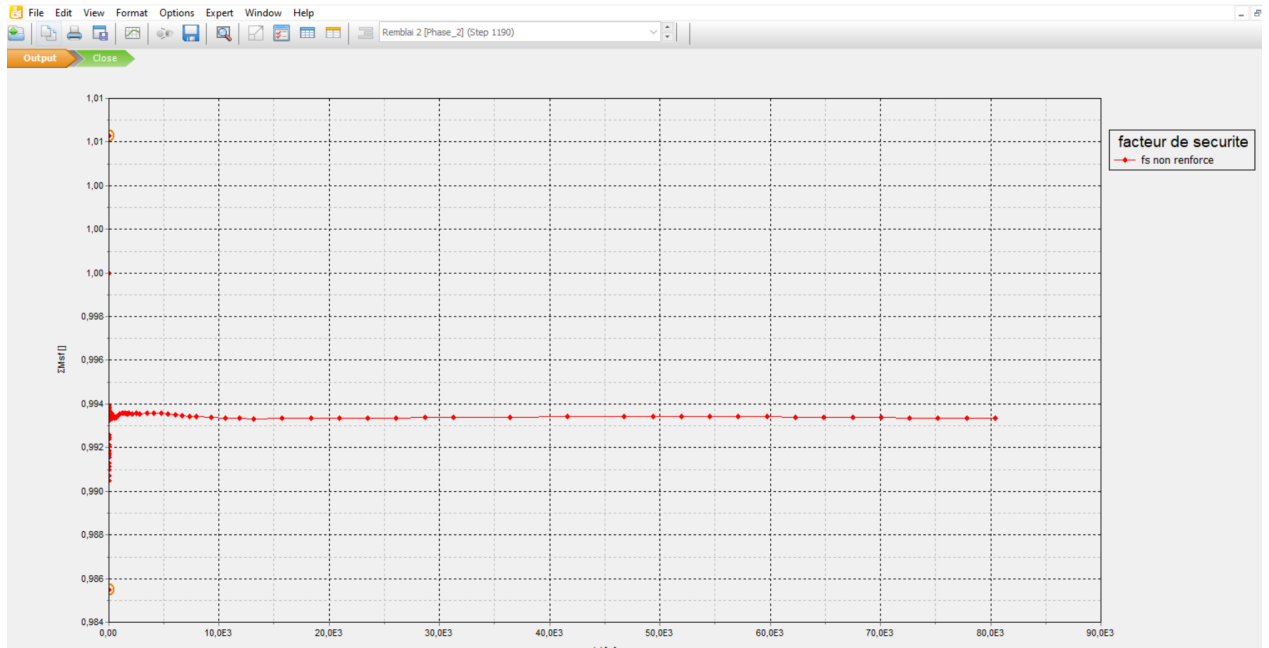


Figure IV.10 : Graphe du facteur de sécurité pour le sol non renforcé

Pour un sol non renforcé on a un facteur de sécurité égal à $F_s = 0.99 < 1.3$ donc c'est instable, et pour un sol renforcé on a un facteur de sécurité égal à $F_s = 1.39 > 1.3$ donc c'est stable.

IV.8. CONCLUSION

D'après les résultats obtenus après l'analyse, on peut conclure que colonnes ballastées ont une influence significative sur le comportement des sols compressibles.

Conclusion Générale

Le but de ce travail est d'examiner l'effet renforcement de sol mou par colonnes ballastées sur le facteur de la sécurité de remblai, l'évolution du tassement de consolidation, la variation de la surpression interstitielle.

Les sols compressibles ont une sensibilité très élevée à l'eau. Ils doivent être traités pour pouvoir subir des projets de route en remblai.

Les techniques de renforcement ou d'amélioration de sol sont très diverses. Entre autres, le traitement du sol par les colonnes ballastées est l'une des techniques les plus faciles préférées par les ingénieurs en raison de ses avantages techniques et économiques.

Le renforcement du sol compressible par colonnes ballastées améliore significativement le comportement de celui-ci (diminution du tassement et accélération du temps de consolidation).

Références bibliographiques :

- [1] GRARI, Khidja. Études des propriétés physico-mécaniques des sols. Université Larbi Tebssi –Tebessa : s.n., 2015-2016.
- [2] Fatima, Melle. Mellal. Etude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte Cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda /Khemis Miliana. Université Hassiba Ben-Bouali -Chlef- : s.n., 2009.
- [3] Fouad, BERRABAH. Évaluation numérique de l'effet du renforcement par nappes de géosynthétique sur la stabilité et le tassement des remblais sur sol compressible. Université Mohamed Khider – Biskra : s.n., 2015.
- [4] Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Etude et réalisation des remblais sur sols compressibles. PARIS : s.n., 2000.
- [5] MOKHTAR AHDOUGA. S « Analyse de la stabilité d'un remblai », 2018.
- [6] ZIGHMI, Imène-Bassma. Etude numérique de l'influence des paramètres géotechniques sur le comportement des sols renforcés par colonnes ballastées. Tizi Ouzou
- [7] Mekaddem Ali ; Gourari Abdessamie : réhabilitation de la route nationale N 97 entre Sidi Bel Abbes et Mascara sur 19 KM.
- [8] Derfouf Yousef ; Berrahou Imad Eddine : étude technique et étude managériale d'un projet routier (évitement de la RN47 -A- du PK50+300 jusqu'à Marsa Ben mhidi sur 5KM.
- [9] 2IE Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement : Etude comparative des différentes techniques de stabilisation en Géotechnique Routière
- [10] Cours de Remadna M S : Route 2 pour Etudiants en 3ème LTP Université de Biskra
- [11] Steve Michaël Sènou AKOFFODJI. Etude des possibilités de constructions de routes en milieux marécageux : difficultés et choix du type de structure. Application au tronçon Possotomè-Bopa. Décembre 2011. p.185.
- [12] Steve Michaël Sènou AKOFFODJI. Etude des possibilités de constructions de routes en milieux marécageux : difficultés et choix du type de structure. Application au tronçon Possotomè-Bopa. Décembre 2011. p.185.

- [13] CALLAUD, M. Cours de mécanique des sols ; tome. Ouagadougou : ECOLE INTER-ETATS DES TECHNICIENS SUPERIEURS DE L'HYDRAULIQUE ET DE L'EQUIPEMENT RURAL, 2003. p. 108. Vol. Tome I.
- [14] cours sans inclusions, ouvrages maritimes, procédés généraux de construction. Paris : s.n., 2003.
- [15]. Romain Auvray, Influence d'une colonne ballastée sur le comportement des sols argileux, université of Strathclyde engineering.
- [16] M. Taoufik Benchelha, "Amélioration des sols de fondation par colonnes ballastées », cas des ouvrages d'art de la rocade méditerranéenne de nador, 2004, pp.1-12.
- [17] NOUI Abdelkader, Conception des fondations sur colonnes ballastées cas d'ouvrages. Mémoire de Magistère, Université de Tizi Ouzou. D'arts, Mémoire de Magistère, Université de Batna, 2012.
- [18] ZIGHMI Imène-Bassma, Etude numérique de l'influence des paramètres géotechniques sur le comportement des sols renforcés par colonnes ballastées,
- [19] <http://fr.scribd.com/doc/55881214/colonnes-ballastees>.
- [20] : Routes à caractéristiques autoroutières Journée Technique « Quelles évolutions dans la méthodologie de conception des projets routiers ? », p 6.
- [21] : <https://construction-maison.ooreka.fr/747819/rubrique/747871/les-etapes-de-second-oeuvre>
- [22] : MAGNAN, Jean-Pierre et PILOT, Georges. *Amélioration des sols*.