

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع.....

Mémoire de Master

Filière : Génie civil

Spécialité : géotechnique

Thème

Analyse De La Stabilité Des Colonnes De Sable Recouvertes De Géotextiles en présence de sols compréssible

L'étudiant :

Melizi samia

Encadreur :

Dr : Debbabi ImeEddine

Promotion Juin 2022



dédicace

C'est avec profonde gratitude et sincères mots que je dédie ce modeste et humble travail de mémoire master finale à :

- A ma très chère mère Maissa : affable, honorable, aimable, l'exemple de l'amour maternel, tu es présente pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse, l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, puisses-tu trouver le modeste témoignage de mon profond amour et ma gratitude pour tous les sacrifices donnés par moi.
- A mon cher père Amar : رحمة الله عليه l'épaule solide, l'œil attentif, compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect, ta passion du travail a été toujours une leçon pour moi. Je te dédie ce modeste travail en témoignage de tous les sacrifices dont tu avais toujours su me combler, que Dieu te préserve et te procure santé et longue vie.
- A mon
- A mes sœurs Dounia et Faten
- A mes tantes Bariza et Hassiba
- A mes camarades d'études : Dounia, Fatima, Samira, Ferial, Shaima, Aicha, Cherifa et Nahla. Pour vos sacrifices, votre soutien moral, votre gentillesse sans égale, votre aide et votre profond attachement m'ont permis de réussir mes études.
- Aux superviseurs du Dr Dabbebi Imed Eddine.
- À tous les membres de ma famille.
- À tous mes enseignants avec mes remerciements.
- A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire



Remerciement

Au terme de ce mémoire, je tiens à exprimer mes remerciements et
ma profonde gratitude avant tout au bon

DIEU de m'avoir donné la force et le courage pour mener à
bien ce modeste travail.

Je saisis de cette occasion pour exprimer mon profond
Remerciement à mon enseignant encadreur Dr. Dabbebi
Imed Eddine pour son soutien et son louable effort,
durant toute la durée de ce travail.

Un grand merci aux membres du jury ont accepté d'évaluer et
d'examiner mon travail.

Mes remerciements y vont aussi à l'endroit de tous les
professeurs du département de Génie Civil et Hydraulique de
L'université **Université Mohamed Khaider – Biskra**

RESUME

La construction des remblais sur sol compressible posent de nombreux problème (sabilité, tassement, déformation) des ouvrages en terre. Le renforcement de ce type de sol par colonnes de sable recouvertes de géotextiles est une technique intéressante et economique, leurs avantages majeurs sont de réduire le tassements, d'augmenter la capacité portante de sol et accélérer la consolidation.

Dans le présent travail une étude numérique de la stabilité des colonnes de sable recouvert de géotextiles en présence de sols compréssible. Ce travail a été effectué à l'aide d'un code des éléments finies PLAXIC 2D 2016.

Il a été démontré que les colonnes de sable ordinaires (OSC) étaient inefficaces. Par contre, les colonnes de sable enveloppées (ESC) ont montré un bon comportement.

Mots-clés: Colonnes de sable ,Géotextile, Sol compressible , plaxis 2D.

ملخص

يطرح بناء السدود على التربة القابلة للانضغاط العديد من المشكلات (الرمل والضغط والتشوه) لأعمال الحفر. إن تقوية هذا النوع من التربة بواسطة أعمدة من الرمال المغطاة بمواد التكسية الأرضية هي تقنية مثيرة للاهتمام واقتصادية ، وتتمثل مزاياها الرئيسية في تقليل الاستقرار وزيادة قدرة تحمل التربة وتسريع التوحيد. في العمل الحالي دراسة عددية لثبات الأعمدة الرملية المغطاة بمواد التكسية الأرضية في وجود تربة قابلة للانضغاط. تم تنفيذ هذا العمل باستخدام برنامج البلانكسيس 2016. ثبت أن أعمدة الرمل العادية غير فعالة من ناحية أخرى، أظهرت أعمدة الرمل المغلفة سلوكًا جيدًا. الكلمات المفتاحية: أعمدة رملية ، تكسية أرضية ، تربة قابلة للضغط ، بلانكسيس 2016.

Sommaire :

RESUME	
ملخص	
SOMMER	
Introduction général :	1
Chapitre I :Généralité sur le sol	3
1. Introduction	3
2. Définition du sol	3
3. éléments constitutifs d'un sol	4
4. Domaine d'application :	4
4.1. Milieux naturels :	4
4.2. ouvrage en sol :	4
4.3. ouvrage mixtes :	4
4.4. fondation d'ouvrage ou de bâtiments	5
5. Les types du sol :	5
6 Classification du sol :	5
6.1. sols grenus, sols fins :	5
6.2. sol organique :	6
7. Sol compressible :	7
7.1. Définition :	7
7.2. Ou se trouve sol compressible?	7
7.3. Mode de rupture des remblais sur sols compressibles :	7
7.3.1. rupture par poinçonnement :	7
7.3.2. rupture de type rotationnelle :	8
8. définition d'un remblai :	9
9. les types de remblai et leur comportement :	9
10. Problèmes posés par la construction des remblais sur sols compressible :	10
11. Différentes techniques utilisées pour l'amélioration des risques de remblais construits sur des sols mous (sol compressible) :	11
Conclusion :	12
Chapitre II : les techniques de renforcement des remblais sur sol compressible	
Partie 01 :renforcement des sols par géotextiles	13
1. Introduction :	13
2. Origine des géosynthétiques :	13
3. Définition :	14
4 La structure des géotextiles :	14
4.1 Géotextiles tissés :	14
4.2 Géotextiles non tissés :	14
4.3 Géotextiles tricoté (GTX-K) :	15
5. Fonction et application :	15
5.1 Séparation :	15
5.2 Filtration :	16

5.3 Drainage :	17
5.4 Barrière :	18
5.5 Renforcement :	18
6. Les propriétés des géotextiles :	19
7. Condition mise en œuvre :	20
8. Géosynthétique adaptés au renforcement :	20
8.1 Géogrilles :	20
8.2 Géotextiles	21
9. Mécanismes de renforcement des sols :	21
9.1 L'objectif de renforcement :	22
9.2 Différents types de renforcement :	22
9.3 Les différentes applications de renforcement par géosynthétique :	23
9.4 Avantages et inconvénients des techniques de renforcement par géosynthétiques:	23
9.5 Choix des éléments de renforcement géosynthétiques :	24
10 Exemple réel (remblai renforcé par géosynthétique sur sol mou):	24
Partie 2 : renforcement des sols par les colonnes de sable	
Introduction :	25
1. Définition :	25
2. L'objectif du traitement :	25
3. Domaine d'application :	26
3.1 Type d'ouvrage :	26
3.2 Type de sol :	26
4. Mode opératoire :	27
4.1 Colonnes ballastées par voie humide :	27
4.2 Colonnes ballastées par voie sèche :	29
5. Comportement des colonnes ballastées :	29
5.1 Principe de la cellule unitaire :	29
5.2 Paramètres caractéristiques :	31
6. Colonne de sable encastrée (exemple réel) :	33
Conclusion :	36
Chapitre 3 : l'outil numérique plaxis	
Introduction	37
1. Présentation du logiciel :	38
2. Les sous-programmes de plaxis :	38
3. La démarche Modélisation avec plaxis :	40
4. modèle de comportement :	43
4.1 Modèle Mohr coulomb :	43
4.1.1 Module de cisaillement :	43
4.1.2 L'angle de frottement :	43
4.1.3 La cohésion :	43
4.1.4 L'angle de dilatance :	43
4.2 Modèle pour les sols mous (soft soil model SSM) :	44
4.2.1 paramètres de compressibilité :	44

4.2.2.1 Cohésion :	44
4.2.2.2 Paramètre de frottement :	45
4.2.2.3 Paramètre de dilatance :	45
4.2.2.4 Paramètre de contrainte K_0 :	45
4.2.2.5 Coefficient de Poisson :	45
Conclusion :	46
Chapitre IV : modélisation numérique d'un sol non renforcé par les colonnes de sable recouvert de géotextiles en présence sols compressible	
Introduction :	48
1. Modélisation numérique :	48
1.1 Présentation du modèle éléments finis et paramètres matériaux :	48
2. Résultats et discussions :	49
2.1 Etat initial (sol sans renforcement)	50
2.2 Tassement vertical et latérale déformation (OSANC) :	50
Conclusion :	52
Conclusion général	54
Les Références	

Liste des figures :

Figure	Page
Figure 1.1: éléments constitutifs d'un sol	4
Figure I.2 : Classification du sol	6
Figure I.3 : la masse volumique de la tourbe et fonction de la densité des matière solide	6
Figure I.4 : Schéma de rupture du remblai par poinçonnement du sol de fondation	8
Figure I.5 : rupture rotationnelle	8
Figure I.6 : représente des exemples réels de rupture d'un remblai sur sol compressible.	8
Figure I.7 : rupture des remblais sur sols compressibles	9
Figure I.8 : rupture par poinçonnement du sol de fondation	10
Figure I.9 : schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation	11
Figure II.1 : géotextiles tissé (monofilament, bandelette, multifilaments) (laurent Briançon, 2017)	14
Figure II.2 : géotextiles non-tissé (aiguilletés, thermocollés) (Laurent Briançon 2017)	14
Figure II.3 : géotextiles tricoté (laurent Briançon 2017)	15
Figure II.4 : schéma de séparation par géotextile	16
Figure II.5: pose des géotextiles de séparation	16
Figure II.6: schéma filtration par géotextile	16
Figure II.7: utilisation pour filtration	18
Figure II.8 : schéma de drainage par géotextile	18
Figure II.9 : utilisation des géotextiles pour drainage	18
Figure II.10 : Exemple d'application de géomebranes comme barrière	19
Figure II.11 : schéma d'un renforcement par géotextile	19
Figure II.12 : l'utilisation du géotextile en jouant un double rôle de drainage et le renforcement du talus.	19
Figure II.13 : fonction anti-érosion	19
Figure II.13: processus de fabrication d'une géogrille biaxiale	21
Figure II.14 : structure de géogrille	21
Figure II.15 : nappe de géotextile (LCPC. 2003)	21
Figure II.16 : renforcement et amélioration des sols d'après la norme NF P 94210	22
Figure II.17: illustration du principe de renforcement des sols d'après (NF P94210)	22
Figure II.18: Champ d'application des colonnes ballastées. (brochure-Keller-France technique vibrocompactage-colonnes- ballastées).	26
Figure II.19 : Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide.	28
Figure II.20 : lancement à eau de vibreur	28
Figure II.21 : l'enfoncement du vibreur	28

Figure II.22: introduction du ballast	29
Figure II.23 : Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie sèche	29
Figure II.24 : Massif de sol traité par un réseau de colonnes ballastées : Notations, colonne isolée et principe de la cellule unitaire.	30
Figure II.25 : Principe de concentration des contraintes et réduction des tassements.	30
Figure II.26: Domaine d'influence pour l'étude des réseaux de colonnes ballastées (d'après Balaam et Poulos, 1983).	32
Figure 27 : Modes de rupture d'une colonne isolée chargée en tête exécuté dans une couche compressible homogène (Datye, 1982)	33
Figure II.28 : schémas de : (a) OSC, (b) VESC, (c) HRSC (Mahmoud Ghazavi et al 2018)	34
Figure II.29 :Installation de sable encacé(Najjar et al. 2010).	34
Figure II.30 : Modèle de calcul de la colonne recouverte de géotextile (Zhang et Zhao 2014)	35
Figure III.1 : Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (mode de création géométrique).	38
Figure III.2 : Fenêtre principale du programme de calcul.	38
Figure III.3 :Fenêtre de calcul	39
Figure III.4 :Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Output.	39
Figure III.5 :Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Curves.	40
Figure III.6 :Représentations de l'essai oedométrique.	45
Figure IV.1 : Simulation axisymétrique par éléments finis de la colonne enrobée de géotextile dans le concept de cellule unitaire, (a) colone de sable ordinaire (OSANC), (b) colonne de sable encasré (ESANC).	49
Figure IV.2 : sol sans renforcement.	50
Figure IV.3 : tassement vertical, (a) colonne de sable ordinaire (OSANC) ;(b) colonne de sable encasée (ESANC).	50
Figure IV.4: Déformation latéral, (a) colonne de sable ordinaire (OSANC) ; (b) colonne de sable encasée (ESANC)	51

Liste des tableaux :

Tableaux	Page
Tableau II.1: propriétés principales des géosynthétique, (TABTI, 2016) (10)	20
Tableaux IV.1 :Paramètres des matériaux utilisés dans l'analyse numérique	49

Liste des symboles

- k^* : Indice du gonflement modifi
- λ^* : Indice de compression modifié
- C' : Cohésion effective
- φ : Angle du frottement
- Ψ : Angle de dilatance
- U_{ur} : Coefficient du Poisson pour décharge-recharge
- γ_d : poids volumique sèche
- γ_{sat} : poids volumique du sol saturé
- β : facteur de réduction des tassement
- C_u : cohésion non drainé
- C : la cohésion
- E : module de young
- C_c : coefficient de compression du sol
- C_s : indice de gonflement
- J : la rigidité à la traction de géotextile
- A_c : rapport entre l'air de la colonne
- A : l'aire totale d'une cellule élémentaire
- S : l'espace entre les colonnes
- Arr : taux de remplacement de surface
- r_e : le rayon de la zone d'influence de la colonne
- r_c : le rayon de la colonne dans la cellule unitaire
- E_c : module d'élasticité de la colonne
- K_0 : coefficient de poussé au repos
- K : coefficient de poussé
- θ : la densité
- ρ_d : masse volumique
- σ_c : contrainte vertical appliqué en tete de la colonne
- σ_0 : contrainte verticale apporté par l'ouvrage sur le sol traité
- n : facteur de concentration des contraintes
- OSANC**: ordinaire sand column
- ESANC**: encased sand column
- SSM**: soft soil model

M-C : Mohr- colomn model

H-C : sol durssant

Hemb : hauteur de remblai

Q : charge d'exploitation

Ec : Module élastique du matériau constituant la colonne.

Es : Module élastique du sol

D : diametre de la colonne

Introduction générale

Introduction générale :

Le sol a toujours été un matériau utilisé dans la construction à cause de sa disponibilité et son coût qui représente ses principaux avantages, Ce pendant ses propriétés mécaniques ne sont pas toujours satisfaisantes et cela peut mener à de nombreux problèmes pendant la construction des grandes structures. Surtout un remblai sur un sol compressible qui soulève plusieurs préoccupations liées à la caractéristique géotechnique du sol compressible (faible résistance au cisaillement...). Pour améliorer le comportement de remblai sur un sol compressible il existe plusieurs techniques de renforcement de sol comme le renforcement avec des géotextiles, inclusions rigides, les colonnes de sable. Les butes de renforcement de sol soit par une action physique (vibration) ou par l'inclusion dans le sol sont :

- Augmenter la capacité portante et/ou la résistance au cisaillement ;
- Diminuer les tassements, tant absolus que différentiels, et le cas échéant les accélérer;
- Diminuer ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre ou des vibrations importantes.

La méthode de colonnes de sable est généralement utilisée pour résoudre les problèmes de stabilité des ouvrages sur sols compressibles. Cette méthode consiste à remplacer une partie du sol par un matériau sableux, possédant un angle de frottement interne élevé et une cohésion négligeable.

Pour analyser la stabilité des colonnes de sable recouvertes de géotextiles on utilise le logiciel Plaxis. La modélisation par éléments finis permet d'étudier l'effet de nombreux phénomènes sur la stabilité des colonnes. L'objectif de cette modélisation est de définir l'influence du sol compressible (faible capacité portante) avec les colonnes de sable renforcées verticalement (le tassement et la déformation latérale).

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Le Premier Chapitre :

Une analyse bibliographique, généralité sur le sol, ses classifications, remblai (les types et les problèmes).

Le Deuxième Chapitre :

Présente les techniques de renforcement, dans sa première partie : renforcement des sols par géotextiles. la deuxième partie : renforcement par les colonnes de sable.

Le troisième chapitre :

Présentation de l'outil numérique de Plaxis

Le quatrième chapitre :

Présente une modélisation numérique d'une colonne de sable encastré avec du géotextile et l'influence de cette modélisation sur le sol compressible (faible capacité portante).



Chapitre I :

Généralité sur le sol

1. Introduction :

Compte tenu de l'augmentation significative de l'importance de l'étude géotechnique du sol dans le domaine de la construction au cours des dernières années. Ce chapitre présente les définitions les plus importantes les plus pertinentes pour le sol, ses types, ses propriétés et son importance pour les ingénieurs. Dans ce chapitre, nous verrons un aperçu des sols, en particulier des sols compressibles, où ils se trouvent, les problèmes qui en découlent et comment y trouver des solutions.

2. Définition du sol :

Le sol est un milieu naturel à propriétés essentiellement dynamiques, différencié en horizons à constituants minéraux et organiques généralement meubles, résultant de la transformation d'une roche mère sous-jacente, sous l'influence de divers processus chimiques, physicochimiques et biologiques. Ces horizons diffèrent de la roche mère par certains caractères morphologiques, physiques, chimiques et biologiques.

Dans les études géotechniques les matériaux existant à la surface de l'écorce terrestre sont classés en deux grandes catégories :

- les roches : agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes, même après immersion prolongée dans l'eau + Mécanique des roches.
- les sols : agrégats de grains minéraux pouvant être séparés sous l'effet d'actions mécaniques relativement faibles → Mécanique des sols.

Les matériaux de transition entre sols et roches sont nommés SIRT (sols indurés et roches tendres).

On notera que le géologue appelle sols tous les matériaux se trouvant à la surface de l'écorce terrestre.

Les sols sont des matériaux meubles, poreux, hétérogènes et souvent anisotropes. Les matériaux, minéraux ou organiques, sont généralement à l'état de grains ou de particules dont les formes et les dimensions sont essentiellement variables. (1) (2)

3. éléments constitutifs d'un sol

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau pouvant circuler ou non entre les particules et d'air ou de gaz. Il est donc, en général, constitué de trois phases:

Sol = phase solide + phase liquide + phase gazeuse

Entre les grains du squelette, les vides peuvent être remplis par de l'eau, par un gaz ou les deux à la fois.

Le gaz contenu dans les vides entre les particules est généralement de l'air lorsque le sol est sec ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide (cas le plus fréquent)

L'eau peut remplir plus ou moins tous les vides entre les grains et être mobile (écoulement plus ou moins rapide). Lorsque l'eau remplit tous les vides, le sol est dit saturé. Dans les régions tempérées, la plupart des sols en place, à quelques mètres de profondeur sont saturés. Lorsqu'il n'y a pas d'eau, le sol est dit sec.

L'étude complète des sols non saturés, qui constituent un milieu à trois phases, est très complexe. (2)

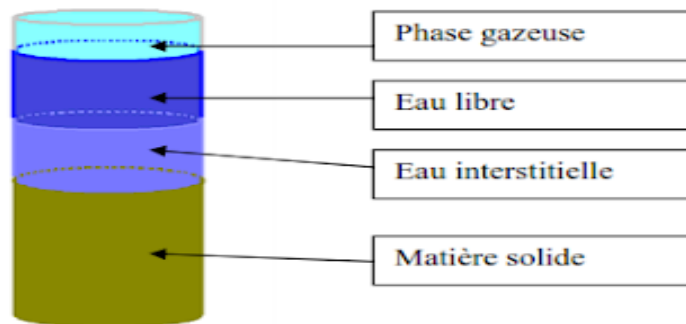


Figure 1.1: éléments constitutifs d'un sol (5)

4 .Domaine d'application : (3)

Les domaines d'application de la mécanique des sols sont nombreux et variés. Ils concernent la profession des travaux publics, ainsi que celle du bâtiment.

4.1 Milieux naturels :

Le domaine d'application de la mécanique des sols ne se limite pas aux constructions ; il comprend également des milieux naturels tels que les versants (problèmes de glissement de terrain) et les berges de cours d'eau ou de retenues.

4.2. Ouvrage en sol :

Les ouvrages où le sol est le matériau de base sont aussi bien :

- les remblais (routes, voies ferrées, barrages, digues de bassins en terre, plates-formes maritimes...) ;
- ou des déblais (talus, canaux, bassins...)

4.3. Ouvrage mixtes :

Dans les ouvrages mixtes, le sol intervient en relation avec un autre matériau, le béton ou l'acier par exemple. Les conditions d'ancrage dans le sol sont souvent primordiales pour des ouvrages tels que :

- les murs de soutènements (béton, terre armée, sol renforcé par géotextile...);
- les palplanches utilisées dans les canaux, les ports, les constructions urbaines...;
- les parois moulées (à fonction étanchéité ou à fonction soutènement)

4.4. Fondation d'ouvrage ou de bâtiments

Dans l'étude des fondations, le sol et l'ouvrage ne constituent pas un ensemble mixte, mais deux ensembles dont il s'agit de connaître les interactions. Les mécaniciens des sols distinguent :

- les fondations superficielles (semelles ou radiers);
- les fondations profondes (pieux, puits, barrettes);

5. Les types du sol :

La construction de remblais peut poser des problèmes sur des types de sols variés tels que :

- les tourbes,
- les vases,
- les argiles molles,
- les limons argileux ou lâches.

Ces sols associent en général une forte déformabilité, une faible perméabilité et une résistance faible. On les appelle habituellement « sols compressibles » ou « sols mous ».

Ce guide s'applique uniquement aux sols fins et sols organiques compressibles, saturés ou quasi-saturés. D'autres sols sont déformables, comme les sables lâches, les lœss ou les remblais récents mal compactés. Les problèmes que posent ces sols (sensibilité à la liquéfaction en cas de séisme, affaissement en cas d'humidification) ne sont pas traités ici. (4)

6. Classification du sol : (5)

6.1. Sols grenus, sols fins :

Première classification: limite adoptée: 20 μ m. Sols grenus $d > 20 \mu\text{m}$ Sols fins $d < 20 \mu\text{m}$
 Cailloux, grave, sable Limon, argile • Blocs, cailloux (fragments de la roche mère) : éboulis de pente, alluvions grossières moraines $20\text{mm} < d < 200\text{mm}$. • Grave (fragment de roche mère) : sédiments détritiques généralement formés de plusieurs minéraux $2\text{mm} < d < 20\text{mm}$. • Sables (fragment de roche mère) : sédiment détritique généralement formés d'un seul minéral : $20\mu\text{m} < d < 2\text{mm}$. • Limons (fragment de roche mère) : mélange de très fins de sable, mêlés en général à des particules argileuses : $2\mu\text{m} < d < 20\mu\text{m}$. • Les argiles (altération physico-chimique de certains minéraux des roches) : particules $< 2\mu\text{m}$.

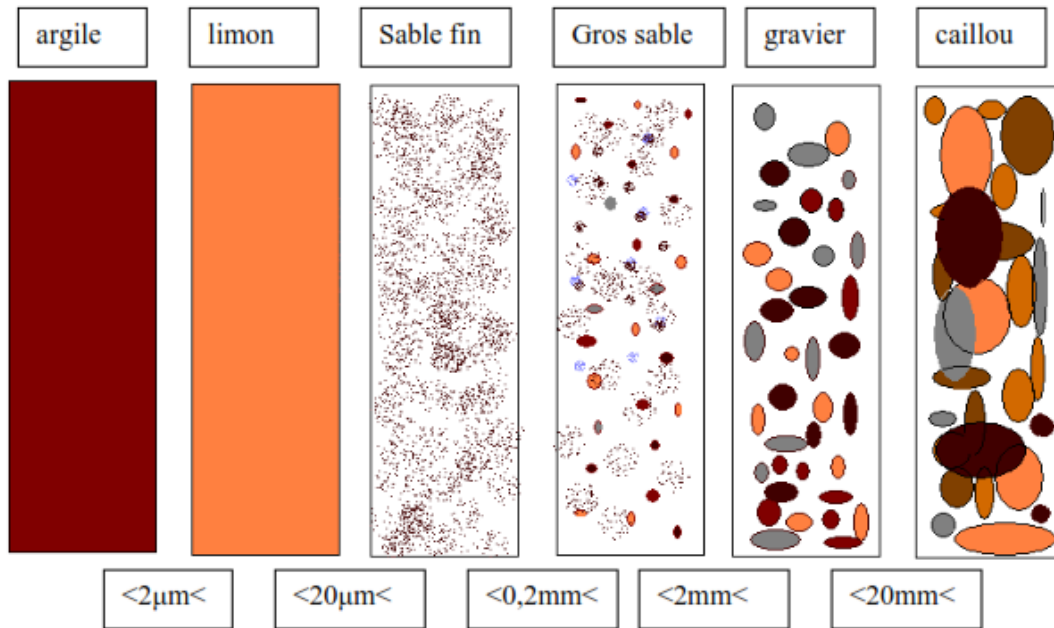


Figure I.2 : Classification du sol (5)

6.2 .Sol organique :

Les vases et les tourbes renferment 2 types de matières organiques :

Matière organique libre : débris végétaux et résidus animaux

Matières organique liées : colloïde humiques fixés à la phase minéral

La transformation de la matière organique fraîche en humus colloïdal est l’humification.

La transformation des tourbes franches en tourbe amorphe est la tourbification ; suivant les degrés de tourbification les propriétés physicochimique seront différents.

Le complexe argilo humique est l’association intime de la phase argileuse et des matières organique à un rôle important dans le comportement des sols. Si la matière organique est un peu évoluée et abondante (tourbe fraîche) sa texture retient beaucoup d’eau très compressible.

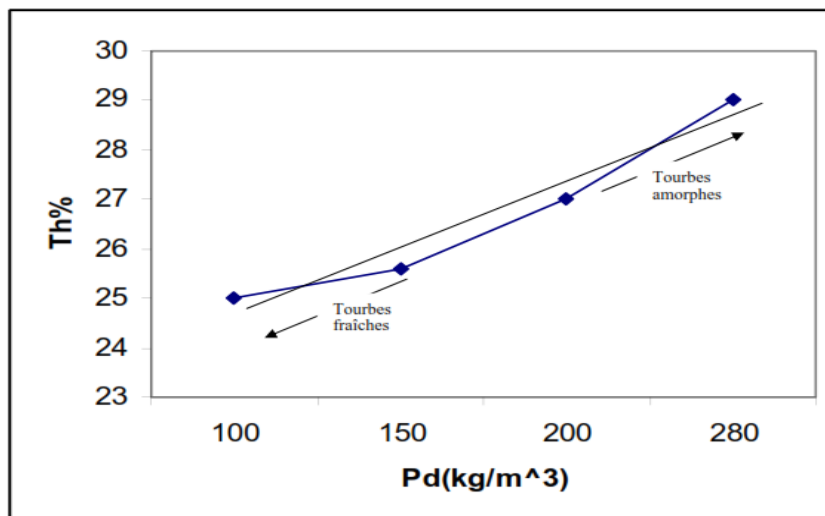


Figure I.3 : la masse volumique de la tourbe et fonction de la densité des matière solide (5)

La masse volumique de la tourbe et fonction de la densité des matières solides la composent. Une tourbe amorphe nécessitera un traitement plus long pour obtenir de cette dernière un comportement mécanique optimal du fait des pressions interstitielles plus importantes. Cependant, après traitement, sa résistance au fluage est plus importante qu'une tourbe dite fraîche après traitement.

7. Sol compressible :

7.1. Définition :

Les sols faibles, tels que l'argile molle et le sable meuble, ont une faible capacité portante, les rendant incapables de supporter la charge des superstructures qui leur est imposée. Par conséquent, les ingénieurs doivent avoir une solution au problème. En raison d'une mauvaise capacité portante dans les sols faibles avant de commencer dans le bâtiment sur eux. En utilisant des colonnes de sable, des radeaux empilés et des géogrilles pour améliorer la capacité portante des sols fragiles. (6)

7.2. Où se trouve un sol compressible ?

Ces types de sol se trouvent souvent près de l'embouchure des rivières, le long des périmètres des baies et sous les marécages ou les lagunes. Les dépôts de sol à haute teneur en matière organique se trouvent dans ces types d'emplacement bas et peuvent être particulièrement gênants. Étant donné que les caractéristiques du terrain dans lesquelles ces sols gênants se trouvent généralement sont basses, elles sont sujettes aux inondations. Par conséquent, avant que des bâtiments ou des routes puissent être construits sur de tels dépôts de sol, le niveau du sol doit être élevé en ajoutant du remblai compacté. Cependant, l'ajout de quantités importantes de remblai compacté impose des charges importantes sur le sol, ce qui peut provoquer des tassements importants. (7)

7.3. Mode de rupture des remblais sur sols compressibles : (23)

D'après Rossi et al. (2007), les ruptures observées dans les remblais fondés sur sols compressibles prennent généralement deux formes :

- La rupture par poinçonnement ;
- La rupture de type rotationnelle.

7.3.1. Rupture par poinçonnement :

L'ensemble du remblai s'affaisse en pénétrant le sol support tandis que des bourrelets de terre se forment de part et d'autre des talus en raison de la réaction par soulèvement du terrain naturel.

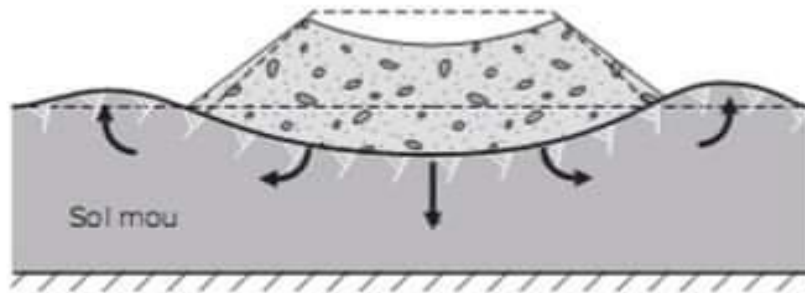


Figure I.4 : Schéma de rupture du remblai par poinçonnement du sol de fondation

7.3.2 rupture de type rotationnelle :

Il s'agit du type de rupture le plus couramment rencontré (figure I.6) dans le domaine routier. Il se manifeste par un enfoncement localisé du remblai, par opposition à l'affaissement généralisé d'une rupture par poinçonnement.

Cet enfoncement est la conséquence d'un déplacement d'une partie du remblai et du sol support le long d'une surface de rupture dont la forme est assimilable à une courbe circulaire et la cinétique à celle d'un mouvement rotationnel. Les désordres provoquent, en tête du remblai, une ou plusieurs dénivelées abruptes ou « escarpements », dont l'amplitude peut atteindre plusieurs mètres.

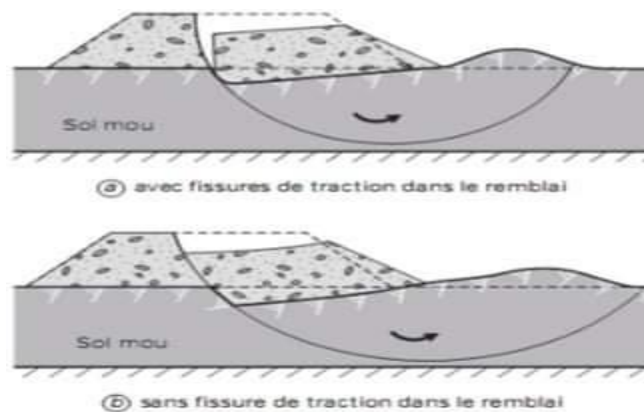


Figure I.5 : rupture rotationnelle



Figure I.6 : représente des exemples réels de rupture d'un remblai sur sol compressible.



Figure I.7 : rupture des remblais sur sols compressibles. (12)

8. Définition d'un remblai :

1. Juridiquement qualifié d'exhaussement du sol ; c'est l'action de rehausser la terre. Il consiste en l'apport de toutes matières pour élever un terrain, combler un creux ou combler les vides d'une exploitation manière.
2. Le terme remblais est employé ici pour des sols qui ont été mis en place afin de créer des terrains gagné sur le milieu aquatique ou afin de combler des zones terrestres. Ces sols sont constitués de remblai hydraulique, remblai argileux, remblai divers de démolition. Les zones remblayées sont donc particulièrement difficiles à traiter compte tenu de la nature et de l'hétérogénéité spatiale de ces sols. (12)

9. Types de remblai et leur comportement :

Il existe plusieurs types de remblai. En effet, le remblai peut être constitué de divers éléments adaptés aux conditions climatiques et mécaniques. Ainsi, nous avons :

- **La craie** : elle se désagrège en sol humide et constitue une pâte qui pourrait occasionner des pressions, empêchant la stabilité de la structure finale. Par ailleurs, en sol très sec, la craie est résistante.
- **Les roches argileuses** : elles ne sont pas recommandées pour les travaux de remblayage. En effet, ces roches peuvent être réduites en poudre laissant des éléments sablonneux qui gonflent le sol, déstabilisant ainsi la future structure.
- **Les roches siliceuses** : ces roches sont fragmentables mais sont résistantes.
- **Les roches salines** : la composition en sel de ces roches leur procure un caractère soluble qui ne permet pas de les utiliser comme matériaux de remblai.
- **Les terres de remblai** : appelé remblai provenant des fouilles, ce sont des terres capables d'être utilisées comme terre de remblai. Cependant, après excavation il est conseillé d'éviter l'utilisation des terres argileuses, sableuse ou trop humides pour servir de remblai.

- **Matériaux de démolition** : les débris et matériaux issues d'une démolition peuvent être réutilisés dans le remblai. Nous pouvons citer entre autre, les briques, les parpaings, les blocs de ciment, les mortiers... cependant certains éléments doivent être enlevés à savoir, les éléments putrescibles, les ferrailles etc... (12)

10. Problèmes posés par la construction des remblais sur sols compressible : (12)

La construction des remblais sur sols compressibles pose souvent des problèmes difficiles. Il faut d'abord éviter de provoquer la rupture du sol porteur qui peut compromettre la suite de la construction et créer des dommages importants sur les structures avoisinantes. Il se pose ensuite le problème de tassements, aux effets plus lents mais tout aussi néfastes. Lorsque ces tassements sont importants et qu'ils n'ont pas été pris en considération dès le début de la construction, ils peuvent :

- ✓ Entraîner une déformation du remblai le rendant inapte à son usage initial ;
- ✓ Provoquer des poussées parasites sur des structures enterrées proches (pieux, palplanches, etc.) jusqu'à leur rupture.

➤ **Problème de stabilité :**

La mise en place d'un remblai sur sol mou entraîne une augmentation des contraintes au sein de ce sol. Si cet accroissement des contraintes dépasse un seuil critique qui dépend des caractéristiques mécaniques du sol, ce dernier se rompt en cours de construction en provoquant un affaissement important et brutal du remblai. Parallèlement à cet affaissement, il se produit des déformations du sol porteur qui se traduisent par des soulèvements importants du terrain naturel autour du remblai.

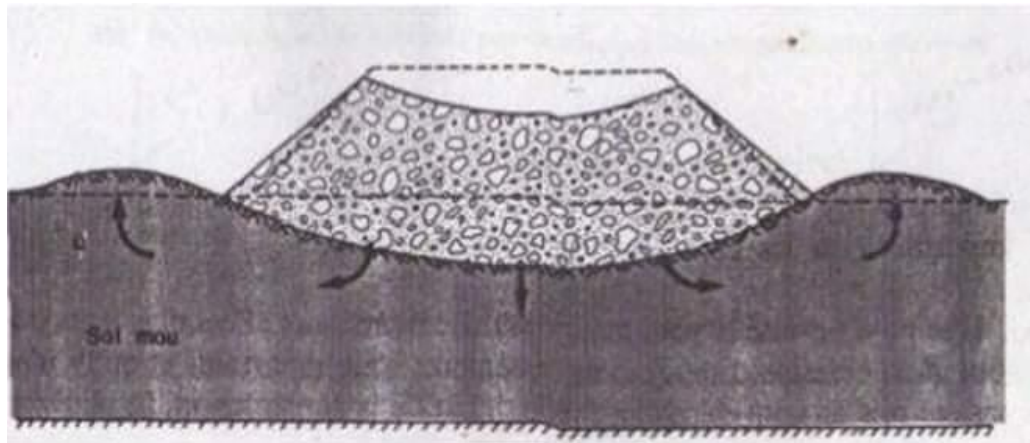


Figure I.8 : rupture par poinçonnement du sol de fondation (12)

➤ **Problèmes de tassement :**

À l'inverse de la rupture par défaut de stabilité, le tassement est une déformation lente du sol sous le poids du remblai qui se traduit (Figure I.8) :

- Au centre du remblai par un enfoncement vertical ;
- Sous l'emprise du remblai, par un enfoncement vertical combiné à un déplacement latéral de sol de fondation ;

- hors de l'emprise du remblai, par un déplacement latéral de sol de fondation.
- Jusqu'à une distance fonction de l'épaisseur de sol compressible.

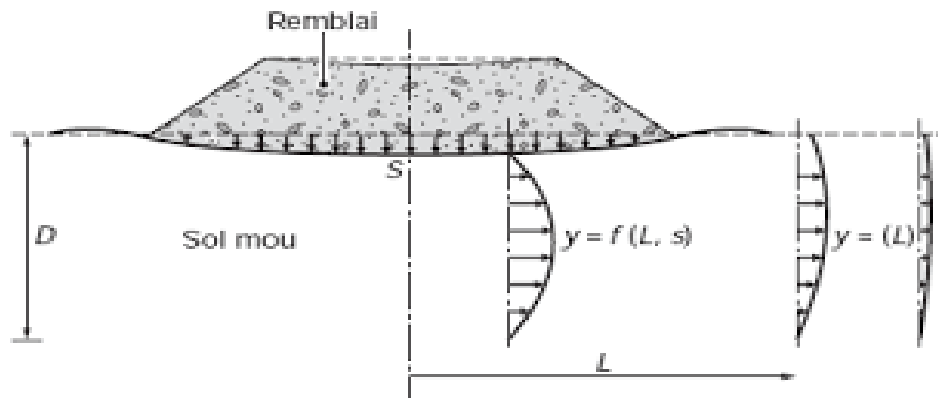


Figure I.9 : schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation (12)

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

11. Différentes techniques utilisées pour l'amélioration des risques de remblais construits sur des sols mous (sol compressible) :

- ✓ Renforcé par géosynthétique :
 - Géotextile.
 - Géogrid.
- ✓ Renforcé par inclusion rigide :
 - Les colonnes de sable.
 - Les colonnes ballastées.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons défini le sol et l'un de ses types : sol compressible. Nous venons de présenter brièvement quelques problèmes posés par la construction des remblais sur sol compressible. Nous avons également mentionné certaines des solutions ou techniques utilisées pour renforcement des sols, qui représentent une alternative intéressante, économiquement et techniquement.



Chapitre II :

les techniques de renforcement
des remblais sur sol
compressible

Partie 01 :renforcement des sols par géotextiles**1. Introduction :**

Dans ce chapitre nous allons présenter l'utilisation des géotextiles s'est largement étendue à tous types d'ouvrages de génie civil. Parce qu'ils sont faciles à mettre en œuvre et assez peu coûteux, ils ont supplanté des matériaux traditionnels, y compris dans la construction d'ouvrages audacieux.

2. Origine des géosynthétiques :

De manière à asseoir les ouvrages sur des fondations ayant une meilleure capacité portante, et ainsi permettre une meilleure durabilité de ceux-ci, tout en maîtrisant la qualité des produits d'ajout, le renforcement des sols est à l'origine de la fabrication des géosynthétiques.

La littérature parle d'une première date en 1926, en Caroline du Sud, où les premières parcelles de route utilisent des tissus de coton. Le résultat est probant, puisque la route reste en bon état jusqu'à ce que le matériel se dégrade. Ainsi s'est ouvert un marché pour des matériaux synthétiques, de même que la viabilité de deux fonctions des produits géosynthétiques, soit la séparation et le renforcement des sols.

La deuxième innovation dans ce domaine fut l'utilisation de textile technique comme drain et comme filtre. Le fait que le liquide puisse traverser un matériel poreux tout en retenant le sol (ou une partie sélectionnée du sol) adjacent a permis le développement d'un matériau synthétique plus performant. Ainsi, le géotextile permet de remplacer la couche de sable, drainante et filtrante, jusqu'alors incontournable.

Enfin, une troisième application importante des géosynthétiques fut la réalisation de barrière imperméable permettant d'empêcher le mouvement des liquides.

Historiquement, l'argile a tous jours été largement utilisée, et l'est encore dans denombreux cas. Son installation et le contrôle de sa qualité sont par contre relativement exigeants. Dans un premier temps fabriquées de caoutchoucsynthétique vers 1940, les premières géomembranes polymériques telles que le Polyéthylène de Haute Densité (PEHD) voient le jour au début des années 80 et n'ont cessé de se développer depuis. Enfin, plus récemment, à la fin des années 80, le mélange d'un support synthétique avec un matériau naturel comme l'argile est utilisé sous le nom de géocomposite bentonitique (GCB).

Au Québec, l'utilisation de géotextiles de renforcement apparaît dans le courant des années 60 dans des applications routières (chemin de terre) sur fondation à très faible portance. Ce sont les grands projets hydro-électriques, dès le début des années 70, qui permettent aux géosynthétiques de prendre tout leur essor dans le domaine du génie routier (renforcement de sol à faible portance, séparation, filtration, drainage) et de permettre à des manufacturiers de se développer. (9)

3. Définition :

Les géotextiles sont définis comme des produits textiles à base de fibres polymères se présentant sous forme de nappes perméables, souples, résistantes et filtrantes, utilisés dans le domaine de la géotechnique et du génie civil. Ce sont en fait des textiles, au sens commun du terme, utilisés au contact du sol. On recense plusieurs dizaines de domaines d'utilisation des géotextiles, de la géotechnique routière aux ouvrages hydrauliques en passant par la stabilisation des sols. Dans tous ces ouvrages les géotextiles remplissent l'une au moins des six fonctions élémentaires : la séparation, la filtration, le drainage, le renforcement, la protection, la lutte contre l'érosion. (9)

4. La structure des géotextiles : (10)

4.1. Géotextiles tissés :

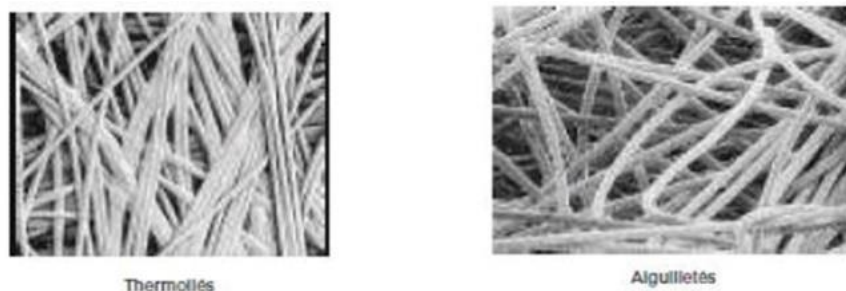
Les géotextiles tissés sont des produits confectionnés par Entrelacement, habituellement à angle droit. Ils sont constitués de deux ou de plusieurs faisceaux de fils, de filaments, de bandelettes ou d'autres éléments, comme illustrés dans (la Figure II.1)



**Figure II.1 : géotextiles tissés (monofilament, bandelette, multifilaments)
(laurent Briançon, 2017)**

4.2. Géotextiles non tissés :

Les géotextiles non tissés sont faits de fibres, de filaments ou d'autres éléments orientés directionnellement ou de façon aléatoire. Ils sont liés de façon mécanique, thermique ou chimique. Ils existent sous deux formes : thermocollé et aiguilleté, comme le montre (la Figure II.2).



**Figure II.2 : géotextiles non-tissés (aiguilletés, thermocollés)
(Laurent Briançon 2017)**

4.3.Géotextiles tricoté (GTX-K) :

Les géotextiles tricotés sont des produits par entre lacement d'un ou de plusieurs fils, de filaments ou d'autres éléments, voir(la Figure II.3)

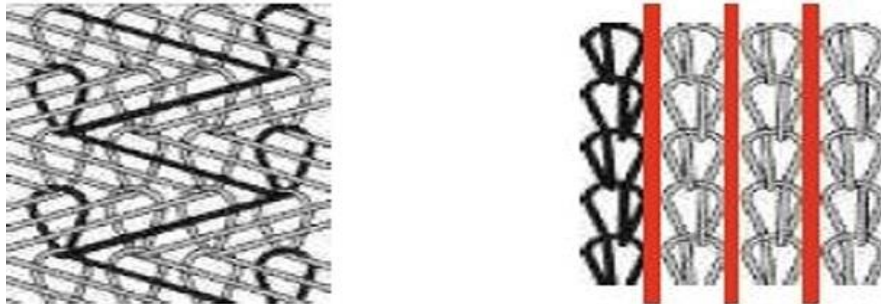


Figure II.3 : géotextiles tricoté (laurent Briançon 2017)

5.Fonction et application : (11)

Les géosynthétiques comprennent une variété de matériaux en polymères synthétiques spécialement fabriqués pour une utilisation dans les domaines du génie civil, la protection de l'environnement, les ouvrages hydrauliques et de transport.

Pour un géosynthétique, on distingue six fonctions principales suivantes : Drainage, Filtration, Séparation, Renforcement, Protection, Contrôle de l'érosion, Etanchéité.

5.1.Séparation :

Séparer signifie empêcher le mélange de matériaux entre deux couches de sols de composition granulométrique différente. Le géotextile est placé à l'interface entre les deux couches de sols (figure II.4).La séparation des couches de sols par le géotextile permet de garder l'intégrité et les propriétés de chacun des sols, surtout lorsque leur mélange n'est pas souhaitable ou est à empêcher. Les exigences fondamentales concernant les géotextiles appliqués pour séparer sont, du point de vue mécanique, d'empêcher la pénétration de matériaux grossiers dans le matériau fin et vice versa, même sous sollicitation dynamique. Du point de vue hydraulique, il s'agit de limiter les lessivages du matériau fin et, par-là, le transport des fines dans le matériau grossier, et d'éviter une retenue unilatérale de l'eau sur le géotextile (effet de géomembrane). Dans la plupart des cas, le géotextile doit aussi remplir le rôle de filtre et même de drains. Un rôle de renforcement limité est aussi possible pour parer aux zones localisées de faible portance et compressibles.

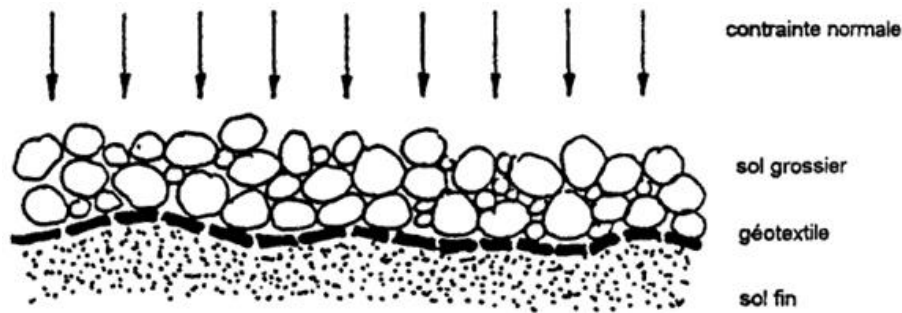


Figure II.4 : schéma de séparation par géotextile



Figure II.5: pose des géotextiles de séparation (12)

5.2.Filtration :

Filtrer signifie prendre une mesure pour qu'un débit d'eau si possible à pression nulle puisse s'établir entre deux couches de composition granulométrique différente (figure II.6). Le lessivage des particules de la couche de sol fin à travers le géotextile doit être évité. Les exigences fondamentales concernant les géotextiles appliqués pour filtrer sont, du point de vue mécanique, d'empêcher l'entraînement de particules fines (lessivage), c'est-à-dire le transport du matériau fin dans celui à gros grains. Du point de vue hydraulique, il s'agit d'assurer l'efficacité hydraulique, c'est à dire d'assurer un débit pratiquement sans pression à travers le géotextile. Par rapport au comportement à long terme, les performances énumérées ci-dessus doivent se maintenir pour toute la durée de service (empêcher le colmatage).

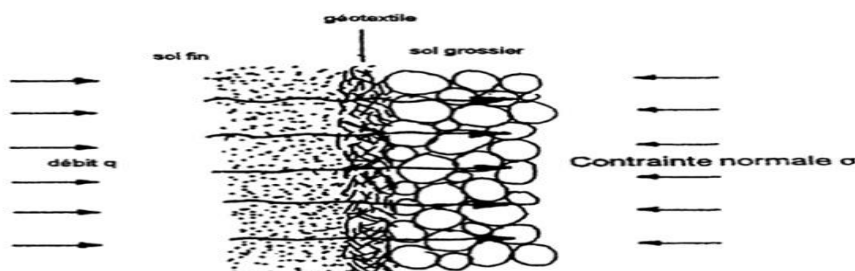


Figure II.6: schéma filtration par géotextile



Figure II.7: utilisation pour filtration (12)

5.3. Drainage :

Drainer signifie collecter et évacuer au moyen d'un géotextile une partie de l'eau d'un sol, en général un sol fin, soit en surface soit en profondeur (figure II.8). Les exigences fondamentales sont, du point de vue hydraulique, d'assurer l'évacuation de l'eau avec une perte de charge minimale dans le géotextile, c'est à dire dans son plan (transmissivité élevée). Du point de vue mécanique, il s'agit d'empêcher le lessivage des fines (extraction de sol) et leur transport à l'intérieur du géotextile, ce qui réduirait la perméabilité dans le plan du géotextile.

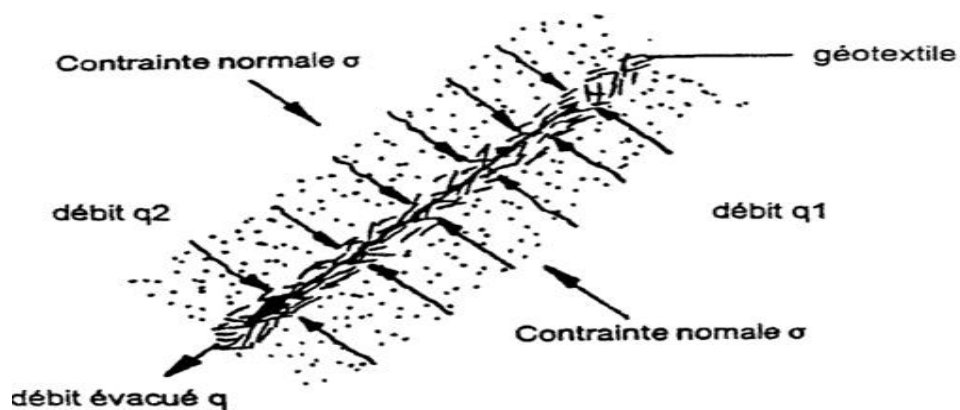


Figure II.8 : schéma de drainage par géotextile



Figure II.9 : utilisation des géotextiles pour drainage (12)

Ces performances doivent se maintenir pour toute la durée de service et le colmatage du géotextile doit être évité. Au vu de l'exigence hydraulique fondamentale, les tissés ne sont pratiquement pas utilisés. Des matériaux composites et de formes particulières ont été développés spécialement pour remplir ce rôle.

5.4. Barrière :

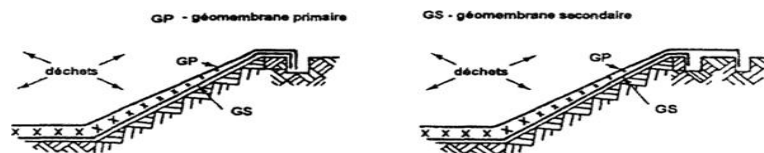
Le rôle de barrière est en fait une séparation qui assure une transition plus ou moins hermétique entre deux milieux, par exemple entre deux couches de sol ou entre une couche de sol et un liquide. En règle générale, un géotextile imperméable est utilisé. Les géomembranes ont été spécialement développées pour remplir ce rôle.

Les applications de géotextiles, surtout de géomembranes comme barrières sont réalisées dans les systèmes d'étanchéité de stockage de liquide, les couvertures des bassins, les centres d'enfouissement technique, les bassins de stockage de déchets la figure 4.4

a) Schémas d'étanchéité de réservoirs d'eau



b) Schémas parois de centres d'enfouissement



c) Schémas de couverture flottante de réservoirs d'eau

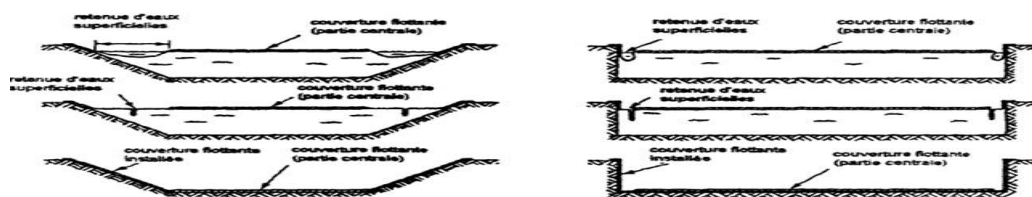


Figure II.10 : Exemple d'application de géomembranes comme barrière

5.5. Renforcement :

Renforcer signifie créer une structure de sol ayant des propriétés améliorées, composée d'un sol qui a généralement une résistance à la traction quasiment nulle, mais qui résiste à la compression, et d'un géotextile qui a une bonne résistance à la traction (figure II.11)

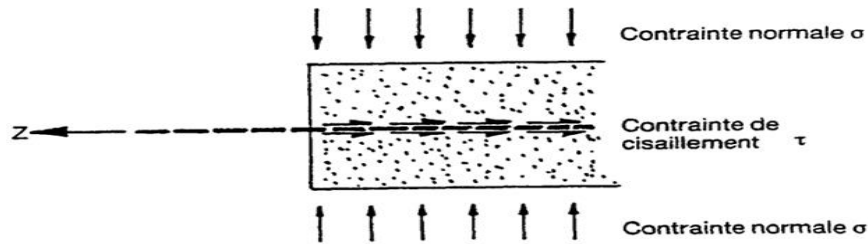


Figure II.11 : schéma d'un renforcement par géotextile



Figure II.12 : l'utilisation du géotextile en jouant un double rôle de drainage et le renforcement du talus. (12)

La lutte contre l'érosion :

La lutte contre l'érosion se définit comme suit : « l'utilisation d'un géotextile ou d'un produit de nature similaire pour empêcher les mouvements du sol ou les autres particules à la surface, par exemple, d'une pente ».



Figure II.13 : fonction anti-érosion (9)

6. Les propriétés des géotextiles : (12)

La connaissance des propriétés des géotextiles permet à l'ingénieur de suivre sa philosophie rationnelle de dimensionnement et de sélectionner le type de géotextile à prescrire. Du fait du développement rapide des produits géotextiles et de leurs modes d'application, il n'a pas été possible d'unifier les méthodes d'analyse du comportement des géotextiles. Les propriétés des géotextiles sont généralement regroupées dans les cinq catégories suivantes :

1. propriétés physiques,
2. propriétés mécaniques,
3. propriétés hydrauliques,
4. comportement à long terme,
5. durabilité,

Caractéristiques physiques	Caractéristiques mécaniques	Caractéristiques hydrauliques
L'épaisseur	Résistance à la rupture	Perméabilité normale au plan.
La masse surfacique	L'allongement à la rupture	Capacité de débit dans leur plan.
Le type de fabrication : tissé, non tissé, tricoté, aiguilleté...	Le poinçonnement statique	L'ouverture de filtration.
Le type de polymère polypropylène, polyéthylène, polyester...	Le fluage	Résistance à la pénétration de l'eau
La densité	Résistance à la déchirure	La souplesse
	Résistance à la fissuration	
	L'allongement au seuil d'écoulement	

Tableau II.1: propriétés principales des géosynthétique, (TABTI, 2016) (10)

7. Condition mise en œuvre :

La mise en œuvre du géosynthétiques se fait classiquement sur une couche de sol compacté. L'interface sol / géosynthétique est plane, ce qui peut en faire une surface de glissement préférentielle ($f\phi < 1$).

Lorsqu'on utilise des sols grossiers (particulièrement pour les matériaux provenant d'éboulements), il peut subsister des branches, des blocs anguleux qui poinçonnent le géotextile. Il est difficile de prévoir si ce phénomène contribue à l'ancrage de la nappe dans le sol ou si au contraire cela nuit à la résistance du produit.

Rq : Ces dernières années, l'utilisation des géosynthétiques en Génie Civil a connu un développement considérable, grâce surtout à un coût de fabrication bas et une méthode d'emploi relativement facile, permettant un domaine d'utilisation large et varié. A la multichiffre des produits géotextiles qui sont proposés par les producteurs correspond une multichiffre d techniques d'utilisation où le géotextile remplit plusieurs rôles à la fois. (12)

8. Géosynthétique adaptés au renforcement :

Les géosynthétiques les plus répandus dans les massifs de renforcements sont :

8.1. Géogrilles : (11)

Une géogrille est une structure plane constituée par un réseau ouvert d'éléments résistant à la traction, reliés entre eux selon un motif régulier. Elle est fabriquée à partir de bandes de polymères de haut module, selon le processus présenté sur (la figure II.13).

La bande de polymère est généralement portée à haute température et ensuite étirée. L'étirage peut être réalisé dans une seule direction (géogrille uniaxiale) ou dans deux

directions (géogridde biaxiale). Au cours de l'étirage, une orientation des macromolécules se produit, ce qui entraîne une grande résistance à la traction dans le sens de l'étirage. Les géogriddes sont aussi fabriquées par soudure de lanières de polymères ou par liaison thermique de fibre sext radées.

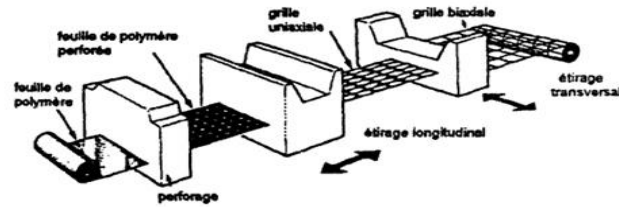


Figure II.13: processus de fabrication d'une géogridde biaxiale (11)

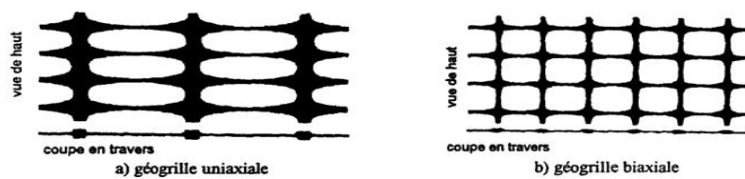


Figure II.14 : structure de géogridde (11)

8.2 Géotextiles : (10)

Matière textile plane, perméable, et à base de polymère pouvant être tissé, non tissé ou tricoté, utilisée en contact avec le sol



Figure II.15 : nappe de géotextile (LCPC. 2003)

9. Mécanismes de renforcement des sols : (10)

L'amélioration des sols ou leur renforcement s'effectue soit sur le sol en place, soit sur le sol rapporté, cas des remblais renforcés. Dans chacun des cas, on distingue l'utilisation ou non, d'inclusions sur (la Figure II.16) d'après NF P94210.

- Le renforcement par géosynthétique correspond à un renforcement par inclusion de sols rapportés.
- les géosynthétiques de renfort sont placés horizontalement entre deux couches de remblai.

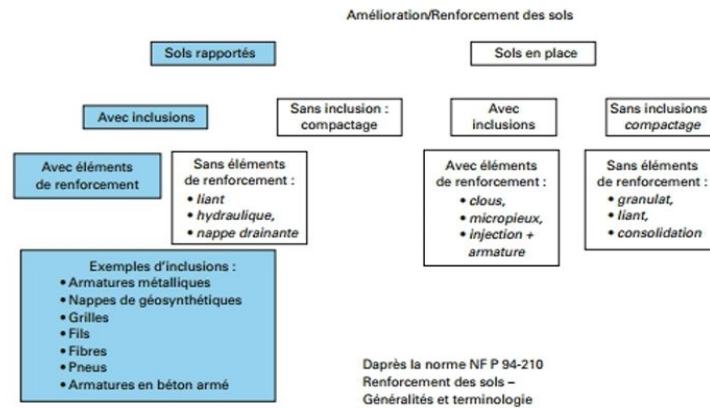


Figure II.16 : renforcement et amélioration des sols d’après la norme NF P 94210

A titre d'exemple, lorsqu'un élément de remblai renforcé horizontalement est soumis à une charge verticale (Figure II.17) la reprise des efforts horizontaux du sol par le géosynthétique est équivalente à une pression latérale sur cet élément de sol qui peut être assimilé à un accroissement de cohésion du sol.

La reprise des efforts horizontaux du sol par le géosynthétique est équivalente à une pression latérale sur cet élément de sol. (Laurent BRIANÇON, 2017).

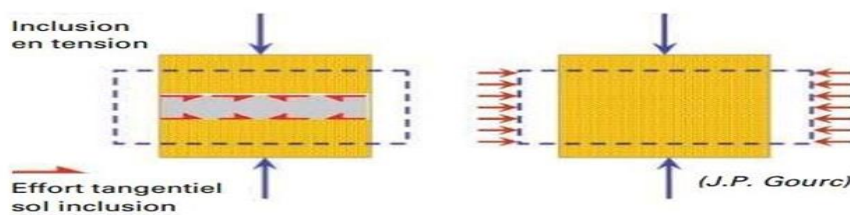


Figure II.17: illustration du principe de renforcement des sols d’après (NF P94210)

9.1 L’objectif de renforcement :

L’objectif de toutes ces techniques est de permettre la construction d’un ouvrage sans qu’il n’y ait de déformations excessives en surface ou des défauts de stabilité ainsi un gain économique onéreux. Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que :

- Les considérations économiques ;
- La nature du sol a traité ;
- La durée de l’opération ;
- La disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d’environnement.

9.2 Différents types de renforcement :

Il est possible de renforcer une structure avec différents types de géosynthétiques, par exemple des renforcements de massif de soutènement chargés en tête et renforcés par des non tissés et géocomposites. Ils peuvent être :

- En métal (Ex : nappes de treillis soudé,...).
- Synthétiques (géosynthétiques, nappes géotextiles, géogrilles, ...).

Ils sont disposés par lits horizontaux distants de 0,30 à 1,00 m environ. (Laurent BRIANÇON, 2017)

9.3. Les différentes applications de renforcement par géosynthétique :

Les géosynthétiques présente un large éventail d’application :

- ✓ Constructions des routes et structures.
- ✓ Voies ferrées.
- ✓ Terrassements, fondation.
- ✓ Réservoirs et barrages.
- ✓ Canaux.
- ✓ Enfouissement de déchets solides.
- ✓ Confinement de déchets liquides (fiberetex, 2018).

9.4 Avantages et inconvénients des techniques de renforcement par géosynthétiques:

L’avantage des techniques de renforcement des sols dans un contexte d’ouvrages de protection contre les risques naturels réside essentiellement dans la réduction de l’emprise au sol des ouvrages et la possibilité d’utiliser les matériaux du site. Les inconvénients et les lacunes relatives restent cependant la méconnaissance du comportement des sols (à forte granularité) et la modification et dégradation des caractéristiques d’interface inclusions géosynthétiques/sols grossiers. Le tableau ci-dessous 4Tableau2-1 propose une première analyse de l’adéquation des produits géosynthétiques ou grillage au contexte des sols à forte granularité. (GOTTLELAND, 2000).

Type	Avantages (+)	Inconvénients (-)
non-tissés aiguilletés	Souplesse, adaptation à une granulométrie grossière	peu adaptés au contexte de renforcement des sols (sensibilité au poinçonnement, fort allongement) durabilité ?
Géocomposites (Non-tissés + tissés)	Allongement plus faible Rôle de séparation joué par le géotextile non-tissé support	Endommagement (risque d’arrachement des fibres de renforts) Durabilité ?
tissés	+ ou - ? effet de la perforation sans perte de matière (répartition de part et d’autre des blocs mais réduction de la surface de contact fibres sols) Forte résistance mécanique	Sensibilité à l’endommagement durabilité
géogrilles	Forte résistance mécanique Mobilisation de la pseudo-cohésion (imbrication grains/grille)	Rigidité Mécanismes et caractérisation de la mobilisation du frottement et/ou de la pseudo-cohésion mal connue

Figure II.17 : Adéquation des produits de renforcement à utilisation des sols à forte granularité (GOTTLELAND ,2000)

9.5 Choix des éléments de renforcement géosynthétiques :

L'approche recommandée pour concevoir, choisir et indiquer le géosynthétique n'est pas différente de ce qui est généralement pratiqué dans n'importe quelle conception géotechnique et d'ingénierie.

D'abord, la conception devrait être faite sans géosynthétiques pour voir s'ils sont vraiment nécessaires. Si les solutions conventionnelles sont impraticables ou peu économiques, concevoir alors les calculs employant des évaluations d'ingénierie des propriétés géosynthétiques requise.

Les géosynthétiques qui ont un rôle essentiel dans la stabilité des ouvrages, sont choisis en fonction de plusieurs critères :

- Leur résistance à la traction à long terme tenant compte des effets du fluage, du vieillissement et de l'endommagement.
- Le coefficient d'interaction par frottement à l'interface avec le matériau de remblai ou le sol.
- La nature du polymère dont ils sont constitués, qui doit être compatible en termes de vieillissement avec le matériau de remblai et le cas échéant avec le parement en pente.

10. Exemple réel (remblai renforcé par géosynthétique sur sol mou): (21)

Volman et al, (1977). Dans ce cas historique, deux remblais tests ont été réalisés sur 4,2 m de tourbe et argile. L'un des remblais n'était pas renforcé et l'autre était renforcé par un tissage feuille géotextile. Le renfort a une résistance à la traction de 61 KN/m, la déformation à la rupture égale à 20% et la raideur de traction moyenne égale à 258 KN/m. Les auteurs rapportent que le remblai sans armature s'est rompu sur une hauteur de 3,5 m, tandis que le remblai avec renfort atteint 4,5 m sans rupture.

Gnanendran et al (2015) étudient les comportements d'un remblai d'essai construit sur un alluvion à Moncton, et le remblai d'essai renforcé construit sur un sol mou compressible en Sackville, les sols de ces deux sites ont la même histoire géologique de dépôt, où une forte géotextile tissé en polyester résistant a été utilisé comme renfort de base sont abordés dans ce chapitre. Le suivi des performances comprenait l'instrumentation du sol de fondation avec des inclinomètres, piézomètres pneumatiques, plaques de tassement et vis de tassement.

Partie 2 : renforcement des sols par les colonnes de sable**1. Introduction :**

Les méthodes d'amélioration des sols utilisant des techniques de type colonne sont de plus en plus utilisées pour la construction de remblais routiers et ferroviaires. Le principe de base de ces techniques est desoulager la charge sur les sols très faible sans altérer sensiblement la structure du sol. Ceci est réalisé par installer des structures de type colonne en grille dans une couche portante, au-dessus de laquelle souvent, un tapis de transfert de charge constitué de renforts géotextiles ou géogrilles est construit. Le relâchement des contraintes des sols mous résulte d'une redistribution des charges dans le remblai à traversvoûte, qui (si présente) est stabilisée par le renfort géotextile/géogrille (effet membrane) aditionellement. En conséquence, la compressibilité du sol amélioré ou composite peut être réduite : la capacité portante et la résistance au cisaillement ont augmenté. La consolidation des sols très faible peut aussi être accélérée et ainsi les tassements après la construction peuvent être considérablement minimisés, puisque la plupart des structures de type colonne agissent comme un colonne de sable. Les techniques d'amélioration du sol de type colonne sont également utilisées pour les remblais, la fondation des réservoirs et entrepôts. (15)

2.Définition :

la technique des colonnes de sable consiste, à l'aide d'une aiguille vibrante, à incorporer dans le terrain des matériaux granulaires compactés de manière à constituer des inclusion souple ,présentant des caractéristiques mécaniques élevées et un fort caractère drainant.

Sous les ouvrages à surcharge répartie (remblais, radiers, dallages...) les colonnes de sable sont disposées suivant un maillage régulier et sont coiffées d'un matelas de répartition des contraintes. Elles permettent ainsi d'homogénéiser et de diminuer l'amplitude globale des tassements sous l'ouvrage.

Les colonnes de sable peuvent également être disposées en groupes sous les charges isolées (semelles de fondations) ou en files (semelles filantes, murs de soutènement...). Elles permettent dans ce cas d'accroître la capacité portante du terrain tout en contrôlant les tassements des ouvrages. Le procédé est adapté pour traiter les sols présentant des caractéristiques mécaniques faibles à très faible (sable limoneux, argiles, limons, remblais hétérogènes ...), mais il doit être exclu dans les sols présente un caractère évolutif (matériaux organiques, tourbes...) dans lesquels l'étreinte latérale autour des colonnes n'est pas garantie à long terme (Zagaar Zierag 2013). (20)

3. L'objectif du traitement : (14)

L'amélioration de sol par les colonnes de sable consiste à mettre en œuvre un « maillage » de colonnes constituées de matériaux ou de grainulaire, amenant une densification des couches compressible st les rendant aptes à reprendre des charges issues de fondations.

Le traitement d'un sol par colonnes de sable 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.

4. Domaine d'application :

4.1. Type d'ouvrage :



Bâtiments industriels et commerciaux



Halls de stockage

4.2. Type de sol : (20)

Réalisation des colonnes de sable impose que le sol environnant offre une étreinte latérale suffisante pour assurer le confinement du ballast. Les colonnes ballastées sont utilisées principalement dans les sols fins (argile, limon et sable fin à forte proportion des fines) qui possèdent une certaine cohésion ($C_u > 20$ kPa, Selon CFMS, 2011) et dans les remblais anthropiques inertes.

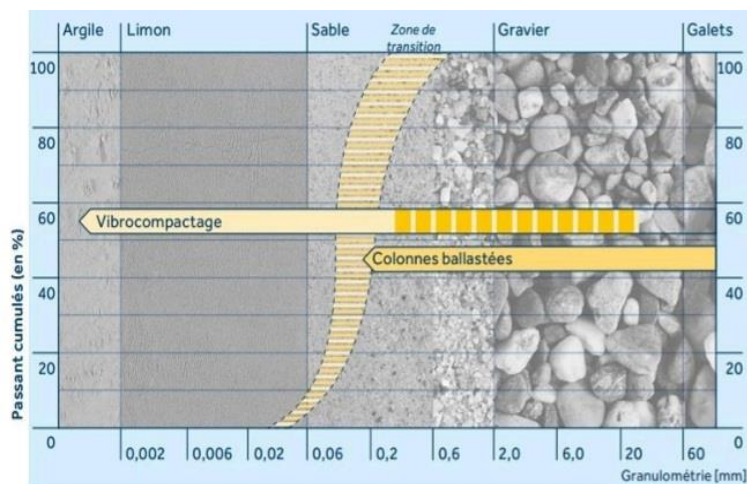


Figure II.18: Champ d'application des colonnes ballastées. (brochure-Keller-France technique vibrocompactage-colonnes- ballastées).

La stabilité de la colonne est assurée par le confinement latéral du sol, qui doit présenter une étreinte latérale suffisante pour éviter l'expansion latérale du ballast. Pour cela, l'utilisation des colonnes ballastées est déconseillée dans les sols organiques, les sols qui contiennent une forte proportion de matériaux organiques (tourbe, argile et vase organique) et les matériaux de décharges en raison de leur comportement évolutif dans le temps et de leurs déformations par fluage qui ne peuvent pas assurer une étreinte latérale pérenne pour confiner le ballast. (Remadna, 2019).

5. Mode opératoire : (14)

La réalisation des colonnes ballastées se fait soit :

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

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

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

Les matériaux d'apport doivent être de qualité et de granulométries 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.

5.1 Colonnes ballastées par voie humide :

- Afin de réaliser la colonne ballastée, le vibreur avec les tubes prolongateurs est placé au-dessus du point projeté.
- Après démarrage du moteur, le vibreur est descendu lentement.
- Dès le début de l'opération, le sol est saturé en eau et les vibrations de l'outil génèrent un phénomène local et temporaire de liquéfaction du sol.
- Le vibreur, avec les tubes de rallonge, descend alors rapidement dans le sol sous l'effet de son propre poids.
- - Lorsque la profondeur de traitement requise est atteinte, le lançage à eau est réduit, de telle façon que l'espace annulaire autour du vibreur et ses extensions reste ouvert grâce à la pression hydrostatique.
- Les matériaux d'apport sont alors introduits dans le trou pendant que l'alimentation permanente en eau assure que les matériaux atteignent bien la base du vibreur et que les particules fines du sol en place soient bien évacuées hors du trou.
- En remontant et redescendant le vibreur de façon contrôlée par passes successives jusqu'à la surface, le matériau d'apport est expansé et compacté dans le sol en place pour former la colonne ballastée.

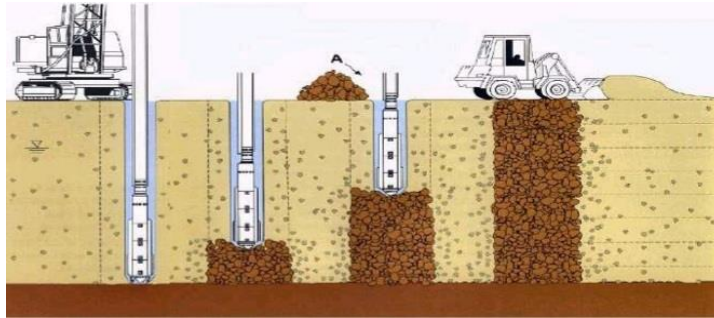


Figure II.19 : Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide. (14)

+ Différentes étapes de réalisation des travaux : (22)

Etape 1 :

- Le vibreur est placé au-dessus du point projeté ;
- Lancement à eau en cours.



Figure II.20 : lancement à eau de vibreur (22)

Etape 2 :

Le vibreur descend sous l'effet de son poids propre et génère un phénomène temporaire de liquéfaction de sol.



Figure II.21 : l'enfoncement du vibreur (22)

Etape 3 :

- Evacuation des particules fines du sol en place ;
- Introduction des matériaux d'apport qui seront compactés par passes successives pour former la colonne ballastée.



Figure II.22: introduction du ballast (22)

5.2.Colonnes ballastées par voie sèche : (14)

La machine est mise en station au-dessus du point de fonçage, et stabilisée sur ses vérins. Un chargeur à godet assure l'approvisionnement en agrégats.

- Le contenu de la benne est vidé dans le sas. Après sa fermeture, l'air comprimé permet de maintenir un flux continu de matériau jusqu'à l'orifice de sortie.
- Le vibreur descend, en refoulant latéralement le sol, jusqu'à la profondeur prévue, grâce à l'insufflation d'air comprimé et à la poussée sur l'outil.

Lorsque la profondeur finale est atteinte, le vibreur est légèrement remonté et, le matériau d'apport se met en place dans l'espace ainsi formé. Puis le vibreur est redescendu pour expanser le matériau latéralement dans le sol et le compacter.

- La colonne est exécutée ainsi, par passes successives, jusqu'au niveau prévu.

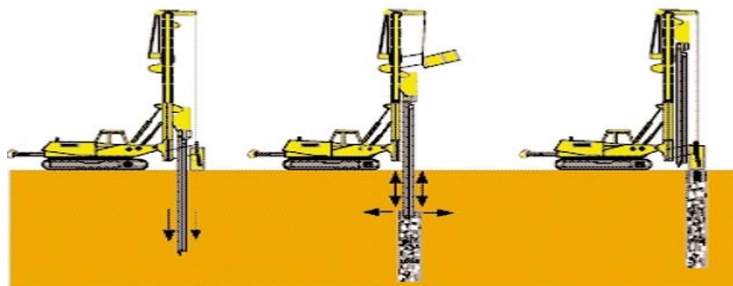


Figure II.23 : Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie sèche (14)

6. Comportement des colonnes ballastées : (16)**6.1 Principe de la cellule unitaire :**

Soit le massif de sol traité par un réseau de colonnes ballastées (figure II.24) supportant un ouvrage de grandes dimensions qui transmettent une charge Q .

Notations

Aire de la colonne $A_c = \pi \frac{D_e^2}{4}$

Aire totale $A = \frac{D_e^2}{4}$

Aire du sol $A_s = A - A_c$

Charge $Q = \sigma_0 * A$

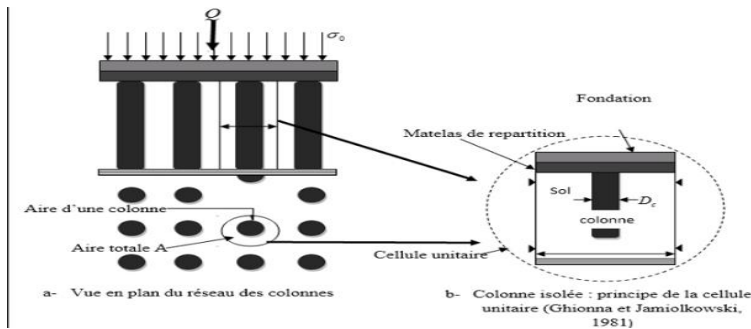


Figure II.24 : Massif de sol traité par un réseau de colonnes ballastées : Notations, colonne isolée et principe de la cellule unitaire. (16)

On suppose que la colonne est confinée en admettant que les déformations radiales s'annulent à mi-chemin entre deux colonnes du centre du réseau, on peut introduire le principe de la cellule unitaire (Ghionna et Jamiolkowski, 1981).

La charge appliquée à la surface du sol (σ_0) se répartit en proportion des aires du sol et des colonnes. Donc on peut écrire :

$$\sigma_0 A = A_c * \sigma_c + A_s * \sigma_s \dots\dots\dots(1.1)$$

σ_c : la contrainte transférée à la colonne d'aire A_c

σ_s : la charge supportée par le sol sur l'aire A_s

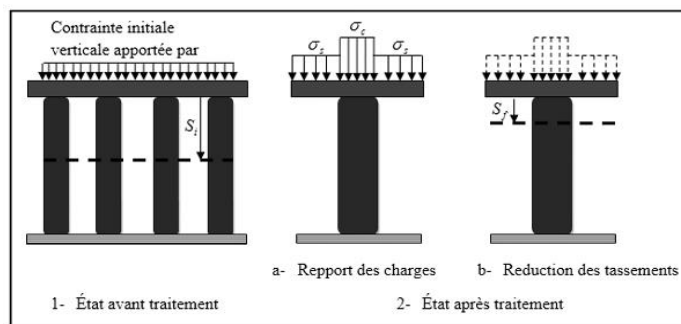


Figure II.25 : Principe de concentration des contraintes et réduction des tassements.(16)

6.2 Paramètres caractéristiques :

Les paramètres caractéristiques du comportement des colonnes ballastées sont :

- Le taux d'incorporation a (ou coefficient de substitution).
- Le rapport de concentration des contraintes n .
- Le facteur de réduction des tassements β .

➤ **Taux d'incorporation**

Le coefficient de substitution (dans le cas des colonnes mises en œuvre par voie humide) ou le taux d'incorporation (dans le cas des colonnes mises en œuvre par voie sèche) est le rapport de l'aire traitée A_c (section de la colonne) à l'aire totale A du domaine d'influence de la colonne (principe de la cellule unitaire, Figure 1.2).

$$a = A_c / A$$

D'après (1.1) : $A_c = a \cdot A$

$$O_0 A = a \cdot A \cdot \sigma_c + (A - A_c) \sigma_s$$

$$O_0 A = a \cdot A \cdot \sigma_c + (A - (aA)) \sigma_s$$

$$O_0 A = A ((a\sigma_c) + \sigma_s (1-a))$$

$$\Rightarrow \sigma_0 = a\sigma_c + (1-a) \sigma_s \dots\dots\dots (1.2)$$

➤ **Rapport de concentration des contraintes verticales**

Comme les colonnes ont de meilleures caractéristiques mécaniques que le sol à traité, il se développe pour cette raison dans le complexe sol-colonne-fondation un mécanisme de transfert de la charge σ_0 appliquée initialement par la fondation. Ce mécanisme consiste à concentrer la contrainte verticale (σ_0) sur les colonnes (σ_c) et réduire la charge sur le sol (σ_s). Donc le rapport de concentration des contraintes (n) est défini par : (Figure 1.3)

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} = \frac{E_c}{E_s} \dots\dots\dots (1.3)$$

Avec :

E_c : Module élastique du matériau constituant la colonne.

E_s : Module élastique du sol.

➤ **Facteur de réduction des tassements :**

Dans l'état avant traitement (sol sans colonne), la charge (σ_0) appliquée par la fondation au sol impliquait un tassement moyen (S_i), dans l'état après traitement (sol avec colonne), les tassements diminuent globalement (S_f). Le facteur de réduction des tassements β désigne le rapport du tassement (S_i) au tassement (S_f).

$$\beta = S_i / S_f$$

Ou :

Si : Tassement initial (sol non amélioré) ;

S f : Tassement final (sol amélioré).

- **Disposition des colonnes ballastées (17)**

Les colonnes ballastées sont disposées en maillage régulier selon les caractéristiques du sol et les charges. Les trois dispositions qui peuvent être utilisées pour l'amélioration des sols soumis à des chargements uniformément répartis sont : Triangulaire ; Carré ou Hexagonal ;

Pour un espacement s entre axes des colonnes, l'équivalence entre la section de maille et le cylindre équivalent de diamètre D_e conduit aux formules présentées dans la figure

Le cylindre constitué par la colonne et par le sol environnant est ainsi appelé cellule unité et est à la base des calculs axisymétriques de dimensionnement d'un réseau de colonnes, uniformément chargé (dallage, remblai, réservoir. etc....).

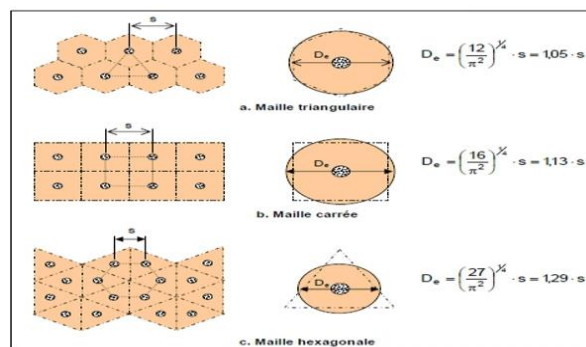


Figure II.26: Domaine d'influence pour l'étude des réseaux de colonnes ballastées (d'après Balaam et Poulos, 1983).

- **Colonne isolée :**

Les colonnes isolées peuvent être soit ancrées soit flottantes. Cependant la plus part des colonnes isolées sont ancrées et permettent de reprendre des charges ponctuelles.

Les modes de ruptures décrits ci-dessous concernent des colonnes mises en place dans une couche homogène de sol compressible.

Le calcul de la contrainte maximale admissible consiste d'abord à déterminer la contrainte d'une colonne isolée à partir des caractéristiques des colonnes et du sol verticale de rupture q_{re} après traitement et selon les schémas de rupture possibles représentés sur les figures (II.27) (a,b,c) :

a- rupture par expansion latérale (critère souvent dimensionnant).

b- rupture par cisaillement généralisé (rupture rare, cas des colonnes courtes).

c- rupture par poinçonnement (colonnes flottantes). (24)

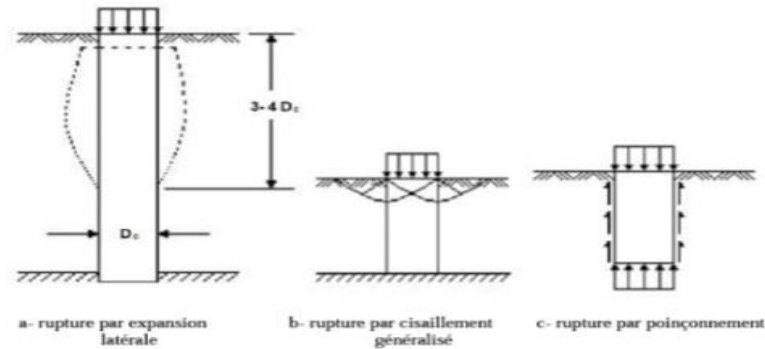


Figure 27 : Modes de rupture d'une colonne isolée chargée en tête exécutée dans une couche compressible homogène (Datye, 1982)

7. Colonnede sable encastrée (exemple réel) : (21)

Mahmoud Ghazavi et al. (2018) ont mis en œuvre des séries de tests en laboratoire et numériques simulation en utilisant un vertical ou des couches horizontales (Figure II.28). Certains gros corps des essais en laboratoire ont été effectués sur des colonnes ballastées renforcées horizontalement avec des diamètres de 60,80 et 100 mm et groupes de colonnes ballastées de 60 mm de diamètre. Les résultats montrent que le roulement la capacité des colonnes ballastés augmente en utilisant des couches de renforcement horizontales. De plus, ils réduisent les déplacements latérauxrenflement des colonnes ballasté par leurs effets de friction et d'emboîtement avec les agrégats de colonne de pierre.Les résultats de l'analyse numérique ont montré que la capacité portante augmente considérablement avec l'augmentation le nombre de couches horizontales et la diminution de l'espace entre les couches.

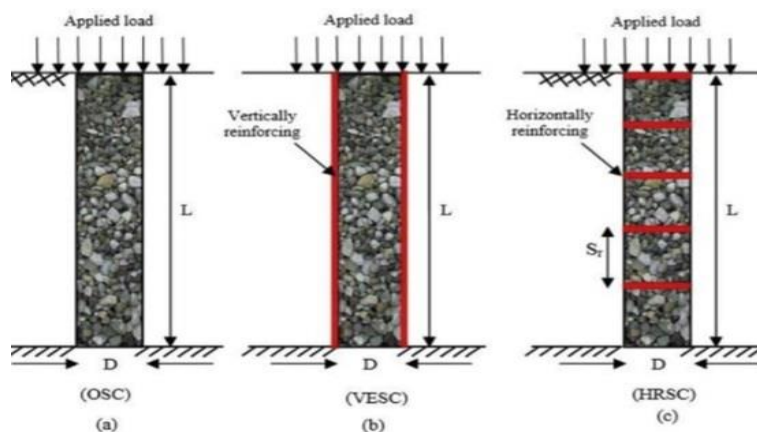


Figure II.28 : schémas de : (a) OSC, (b) VESC, (c) HRSC
(Mahmoud Ghazavi et al 2018)

Najjar et al (2010) évaluent le degré d'amélioration des propriétés mécaniques des argiles dans des applications pratiques impliquant l'utilisation de drains de sable ou de colonnes de sable dans les sols argileux. Pourcet effet, 32 essais triaxiaux isotropiquement consolidés non drainés ont été réalisés sur spécimens de kaolin consolidés. Les paramètres qui

ont été variés étaient le diamètre du colonne de sable (D_c), la hauteur des colonnes (H_c), le type de colonnes géotextile enrobé versus non-enfermé, et la pression de confinement effective. Les résultats des tests ont indiqué que les colonnes de sable amélioraient la résistance non drainée de manière significative, même pour des taux de remplacement de surface inférieurs à 18 %. L'augmentation de la résistance non drainée s'est accompagnée d'une diminution de la génération de pression interstitielle pendant cisaillement et une augmentation du module de Young. Les paramètres de résistance au cisaillement drainé se sont révélés être relativement peu affecté par le renforcement de la colonne de sable, sauf pour les colonnes entièrement pénétrantes avec des taux de remplacement de surface élevés (A_r).



Figure II.29 : Installation de sable encacé (Najjar et al. 2010).

Zhang et Zhao (2014) ont présenté une solution analytique basée sur le concept de cellule unitaire, pour prédire les comportements de déformation des colonnes de pierre recouvertes de géotextile à n'importe quelle profondeur sous le plan supérieur des colonnes (Figure Figure II.30). Sous des charges verticales au sommet des colonnes de pierre, un axial une déformation de compression s'est produite qui s'est accompagnée d'une expansion latérale près du sommet. Cette déformation caractéristique des colonnes de pierre a été incorporée directement dans méthode l'analyse proposée. La contrainte de cisaillement entre la colonne de pierre encastree et le sol environnant à la verticale direction a également été prise en compte. Dans cette méthode, la pression de confinement fournie par le sol était analysé sur la base d'une analogie avec la pression de terre passive. La méthode a été vérifiée par comparaison avec deux autres solutions analytiques. Lorsque des études paramétriques ont été menées pour étudier les effets de l'enrobage géotextile, de la contrainte verticale appliquée, de l'espacement et du diamètre des colonnes sur le comportement de déformation des colonnes.

(21)

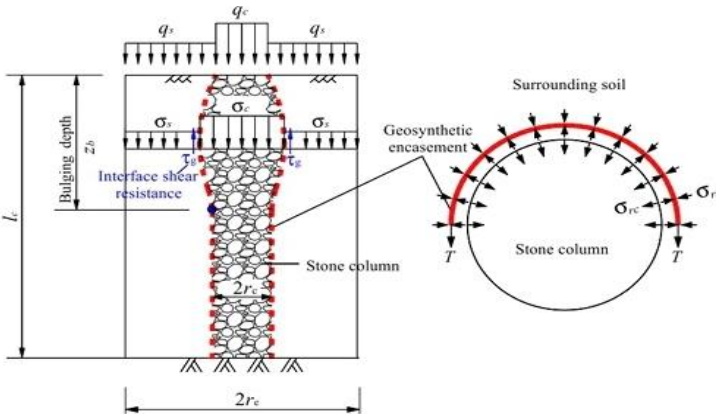
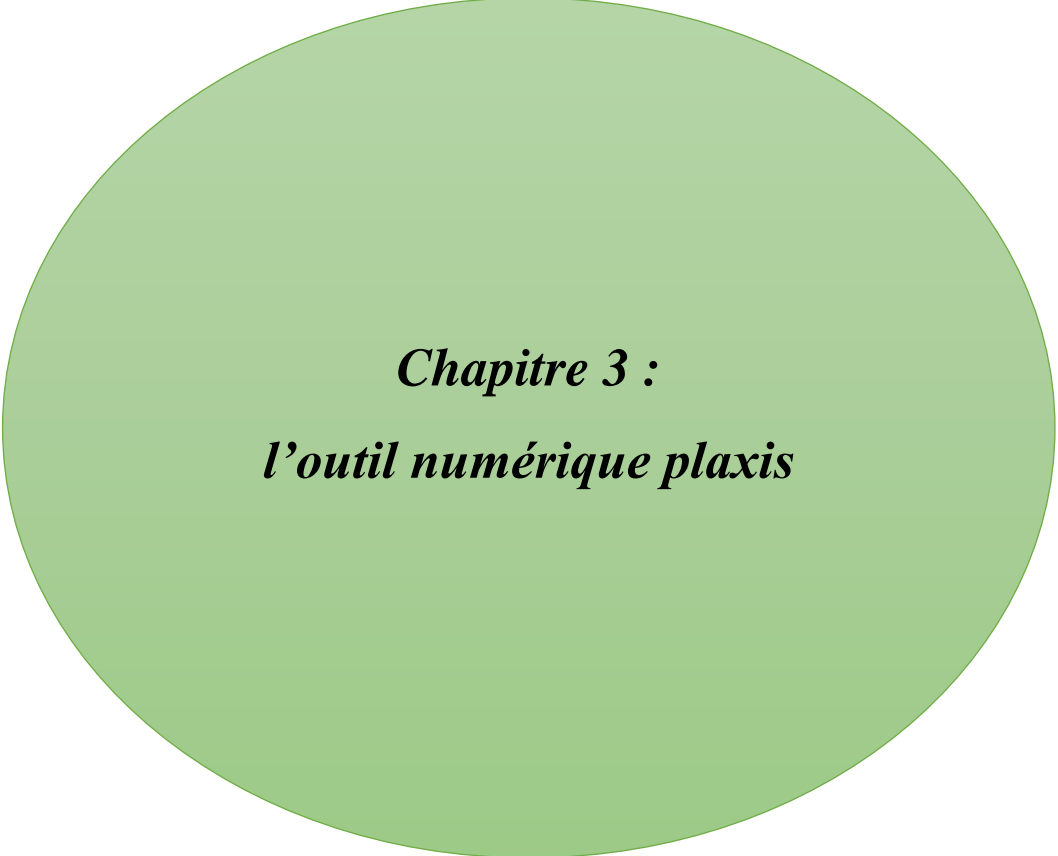


Figure II.30 : Modèle de calcul de la colonne recouverte de géotextile (Zhang et Zhao 2014)

Conclusion :

Nous avons exposé dans ce chapitre les techniques les plus utilisées en pratique pour l'amélioration des sols, le renforcement avec des couches géotextiles représente une solution alternative économiquement et techniquement intéressante. Parmi toutes ces méthodes, l'utilisation d'un géotextiles s'avère être une solution alternative rentable en termes d'économie de ressources naturelles, de temps et d'intégration de la durabilité et de l'environnement protection. Les géotextiles remplissent diverses fonctions, à savoir filtré, séparé, drainé, barrière et renforcement. On peut voir que les géotextiles peuvent considérablement augmenter le facteur de sécurité du remblai. Il y a aussi une augmentation des performances en raison des tassements uniformes après la construction du remblai et de la réduction des déplacements pendant construction qui réduit la quantité de matière. Par (Méthodes expérimentales, numériques, analytiques), les colonnes de sable recouvertes du géotextiles se sont révélées être une solution idéale pour améliorer les remblais sur les sols compressibles. Les colonnes peuvent être recouvertes de géotextiles qui sont les principaux matériaux utilisés pour augmenter la résistance et la stabilité des structures géotechniques.



Chapitre 3 :
l'outil numérique plaxis

1.Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes lois rhéologiques que nous avons adoptées pour la modélisation du comportement d'un remblai renforcé par des géosynthétiques sur sols compressibles. Tout d'abord, on présentera une étude bibliographique des modèles utilisés pour l'étude des remblais sur sols compressibles ; ensuite, nous présenterons en bref quelques modèles avancés utilisés dans le code Plaxis tel que le modèle pour les sols mous SSM (Soft Soil Model).

La simulation numérique d'un remblai renforcé ou non par des géosynthétiques sur sols compressibles est un problème complexe qui présente un comportement non linéaire et La mise en jeu de plusieurs éléments à savoir : sol de fondation, remblai, interfaces, éléments géogridde, etc. Ces conditions complexes nécessitent un outil numérique bien adapté. Nous présentons ici les principes du code de calcul Plaxis qui a été utilisé pour nos simulations bidimensionnelles. (13)

2. Présentation du logiciel : (18)

Le logiciel PLAXIS est le logiciel d'éléments finis de référence géotechnique dont le développement commença en 1987 à l'initiative du ministère des travaux publics et d'hydrologie des Pays-Bas. Son but initial était de créer un code éléments finis facilement utilisable en 2D pour analyser l'effet de l'implantation d'une digue fluviale sur les argiles molles des Pays-Bas. En quelques années, PLAXIS a été étendu à plein d'autre domaine de la géotechnique. En 1998, la première version de PLAXIS pour Windows est développée. Durant la même période une version 3D du logiciel a été développée. Après quelques années de développement le logiciel 3D PLAXIS Tunnel program est sorti en 2001. PLAXIS 2D est donc un programme en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan (déformation plane) ou axisymétrique. L'algorithme général du code PLAXIS consiste à résoudre un système d'équations algébriques non linéaires selon un processus itératif pour déterminer les valeurs de déplacements aux différents nœuds du maillage, le champ de contraintes et les états de rupture du sol.

Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier.

3.Les sous-programmes de plaxis : (18)

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

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



Le programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générerle maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales.

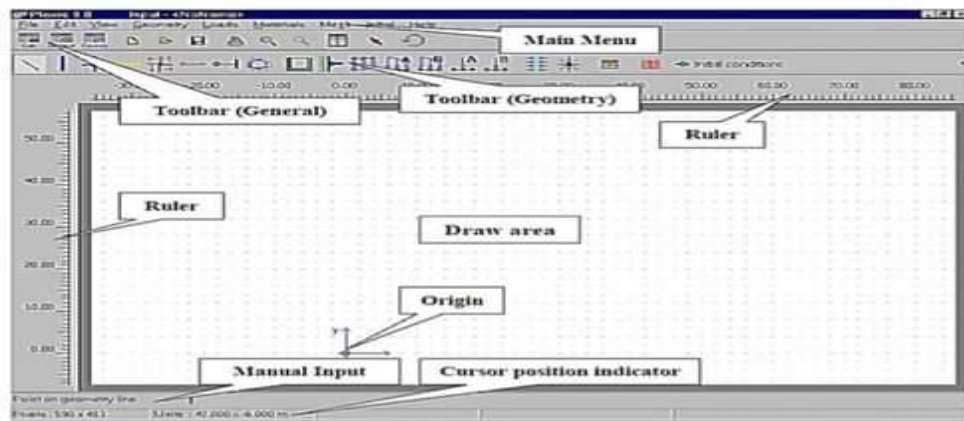


Figure III.1 : Fenêtre principale du programme d’entrée des données (Input) (mode de création géométrique).

b) Le programme de calcul(calculations) :



Ce programme contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis. Au début du programme de calcul, l'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs vont être définis.

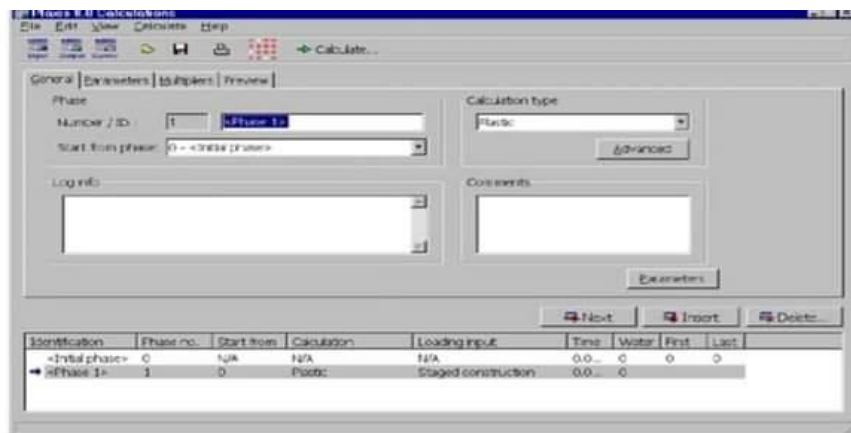


Figure III.2 : Fenêtre principale du programme de calcul.

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

Les valeurs Current step et Iteration indiquent respectivement le pas de calcul en cours et le numéro d'itération. La valeur Maximum steps indique le numéro du dernier pas possible pour la phase de calcul en cours suivant le paramètre Additional steps. La valeur Maximum itérations correspond au paramètre maximum itérations des réglages de la procédure itérative.



Figure III.3 : Fenêtre de calcul.

RÉSULTATS

Les principaux résultats d'un calcul d'éléments finis sont les déplacements aux nœuds et les contraintes aux points de contraintes. De plus, lorsqu'un modèle d'éléments finis inclut des éléments de structures des efforts sont calculés dans ces éléments. Une vaste gamme d'outils est offerte par PLAXIS pour afficher les résultats d'une analyse aux éléments finis.

c) Le programme de résultats (Output) :



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



Figure III.4 : Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Output.

d) Le programme de courbes (Curves) :



Ce programme contient tout le nécessaire pour générer des courbes charges-déplacements, des chemins de contrainte et des courbes contraintes- déformations. La réalisation d'une modélisation avec Plaxis se traduit en général, par l'enchaînement des étapes suivantes :

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

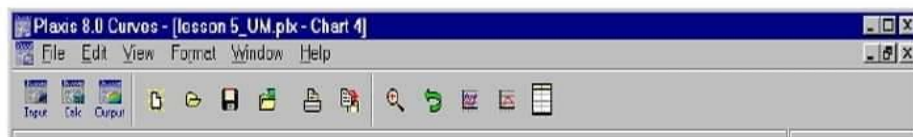


Figure III.5 :Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Curves.

3. La démarche Modélisation avec plaxis :

Nous présenterons ici le cheminement et principales étapes d'un calcul sous PLAXIS.

a) Géométrie :

La première étape sous Plaxis est la définition de la géométrie. Un certain nombre de propriétés sont disponibles :

- Les lignes géométriques qui sont là pour dessiner l'organisation du sol.
- L'outil << plates >> permet de dessiner et de définir des structures élancées qui possèdent une résistance en traction compression et une résistance en flexion, Cet outil est principalement utilisé pour modéliser des murs, des poutres descoquilles, des plaques pour modéliser les murs et les zones rigides.(principalement les éléments ayant une forte extension selon l'axe perpendiculaire au plan de modélisation.
- << Anchor >> qui sert à modéliser les liaisons entre les éléments. Ce sont des ressorts, qu'on utilise pour modéliser les batardeaux ou plus exactement la liaison entre les différents éléments d'un batardeau.
- L'outil <<géogrid>> sert à dessiner des structures élancées avec une résistance en compression ou traction mais qui ne possèdent aucune résistance de flexion. Cet outil

est généralement utilisé pour modéliser les géogrilles et ancrages. Sur Plaxis, il y a également un outil tunnel qui permet de modéliser un tunnel prenant en compte les facteurs qui concernent ce type d'ouvrage.

b) Condition aux limites :

Une fois la géométrie définie, il faut entrer les conditions limites, c'est-à-dire les déplacements et les contraintes imposées aux limites extérieures de la géométrie. Si aucune condition limite n'est fixée sur un tronçon, par défaut le logiciel considère que l'élément n'est soumis à aucune force extérieure et est libre de se déplacer dans toutes les directions.

Les conditions limites pouvant être imposées sont celles qui imposent un déplacement dans une direction donnée ou celle qui impose une force dans une direction donnée. Plusieurs outils permettent de créer une large gamme de condition limites (force répartie, force ponctuelle, encastrement, glissement, etc.).

c) Définition des paramètres des matériaux :

Ensuite, il convient de définir les différentes propriétés des différents matériaux selon son type (sol et interface, plaque, ancrage, géogrille, etc.....), le modèle de comportement et les différents paramètres permettant de le définir. Pour les sols, en plus de la définition des caractéristiques mécaniques, leurs interfaces avec les autres types d'éléments peuvent être paramétrés, il faut également définir le comportement hydraulique du sol (drainer, non-drainer ou non-poreux).

d) Maillage :

Le maillage est géré automatiquement, ce qui est un point fort de Plaxis. L'opérateur peut paramétrer la finesse du maillage entre différentes options (très grossier, grossier, moyen, fin, très fin), l'opérateur peut également décider de mailler plus finement une certaine région du sol ou/et le voisinage d'un élément grâce aux options refine dans le mesh menu. Une fois le maillage effectué, il convient de paramétrer les conditions initiales du sol, cette procédure passe généralement par la définition d'un coefficient des terres au repos.

e) Les conditions initiales :

La définition des conditions initiales se fait en deux étapes distinctes. Tout d'abord, lorsque la fenêtre des conditions initiales s'ouvre, seul le sol est activé. L'opérateur active les éléments constructifs (déplacements et/ou contraintes imposées, ancrage, plaque) qui correspondent à l'instant initial. Il désactive les éléments de sol qui ne correspondent pas à cet instant initial.

Un « Switch bouton » permet d'accéder à deux fenêtres différentes, chacune présentant la géométrie de la modélisation :

- La première qui s'appelle "initiale pore pressure" permet de définir un niveau de nappe phréatique initial (si besoin), et de générer les pressions interstitielles correspondantes ;
- La deuxième fenêtre permet de générer les contraintes initiales à l'intérieur du massif (poids propre et sous pression).

f) Phase de calcul :

Après avoir effectué l'ensemble de ces paramètres on peut accéder aux calculs par le bouton poussoir "calculation". L'interface "input" de << Plaxis >> se ferme et laisse la place à une nouvelle interface "calculation". Une phase 0 est déjà calculée, cette phase correspond à l'état initial de la structure. Cette interface permet de définir le phasage de la modélisation de la construction.

De nouvelles phases de calcul peuvent être créées basées sur une phase existante. Pour chaque phase on peut modifier la géométrie par l'intermédiaire de la même interface qui a servi à définir les conditions initiales. On peut donc effectuer des changements uniquement en activant ou désactivant des éléments. Le niveau de la nappe phréatique peut être modifié, ainsi que certaines propriétés des matériaux, des éléments autres que le sol (modification des paramètres entrés en input, imperméabilité et/ou la non-consolidation de certaines parois). Le niveau d'intensité et la position des conditions limites des chargements en déplacement et en contrainte peuvent également être modifiés.

Cependant, aucun nouvel élément ne peut être créé à ce niveau que ce soit une charge, un déplacement, une condition aux limites ou une plaque un ancrage etc....

D'autres types de phases peuvent être créés autre que la simple activation ou désactivation d'élément (phase de consolidation par exemple). Un certain nombre de types de calcul peut être simulé (consolidation, détermination du facteur de sécurité, déformation plastique, étude dynamique). Une fois le phasage de l'étude terminé, des points caractéristiques peuvent être placés.

Les courbes de résultats de Plaxis seront calculées en ces points. Après avoir appuyé sur <<calculate>> les calculs se lancent. Une fois terminée, les résultats sont visionnables grâce à la touche <<output>>.

g) Visualisation des Résultats :

Le code PLAXIS contient plusieurs outils pour visualiser et analyser les résultats concernant le sol soit en déformations (maillage déformé, déplacements et déformations totaux) soit en contraintes (contraintes effectives, totales, les points plastiques, les pressions interstitielles).

5. modèle de comportement : (19)

5.1. Modèle Mohr coulomb :

Le modèle de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écrouissage. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vu les résultats obtenus dans les calculs.

Le modèle de Mohr-Coulomb nécessite cinq paramètres fondamentaux :

- Deux paramètres élastiques : le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν
- Deux paramètres relatifs aux conditions à la rupture: la cohésion C et l'angle de frottement Φ
- Un paramètre relatif à la règle d'écoulement plastique, l'angle de dilatance Ψ .

5.1.1 .Module de cisaillement :

Le modèle élastique utilisé dans Plaxis est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module d'Young E et le coefficient de poisson ν et par défaut il calcul G .

L'avantage de G est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ($G_u = G'$), si G est utilisé comme paramètre élastique.

5.1.2. L'angle de frottement :

Plaxis ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier. On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à 35° peuvent considérablement allonger les temps de calcul.

On peut déterminer l'angle de frottement à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr- Coulomb.

5.1.3 La cohésion :

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottant, une très faible cohésion (0.2 à 1kPa). Pour les analyses en non drainé avec $\alpha_u = 0$, Plaxis offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur : ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur ou résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée avec le paramètre c -depth. Une valeur nulle donne une cohésion constante. Les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans les problèmes (typiquement en kPa).

5.1.4. L'angle de dilatance :

Le dernier paramètre est l'angle de « dilatance » noté d' ; c'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

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

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

Les cas où $\Psi < 0^\circ$ correspondent à des sables très lâches (liquéfaction statique).

La valeur $\Psi = 0^\circ$ correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faible ou moyenne sous contraintes assez fortes.

6. Modèle pour les sols mous (soft soil model SSM) : (13)

C'est le modèle utilisé dans ce mémoire pour représenter la rupture par cisaillement du sol de fondation qui est caractérisé par une faible résistance au cisaillement qui s'accroît avec la consolidation et une grande compressibilité. Ce modèle (en abrégé SSM) est un modèle dérivé du Cam-Clay. Historiquement le modèle Cam Clay a été développé à Cambridge dans les années 60 par Roscoe, Schofield et al.. L'idée de base de ce modèle est de prendre en compte l'effet d'écrouissage que provoque sur les argiles la pression moyenne. Sous l'effet d'une pression moyenne, la teneur en eau diminue et l'argile devient plus résistante. Il s'agit d'un modèle élasto-plastique avec une surface de charge. Sous la surface de charge, le matériau reste élastique, tandis que si le point représentatif de l'état de contrainte effectif atteint la surface de charge, alors des déformations plastiques apparaissent avec un comportement non réversible. Une surface de plasticité, associée, limite l'espace entre les états admissibles et non admissibles.

6.1. paramètres de compressibilité :

Les deux paramètres C_c et C_s décrivent le comportement oedométrique ou isotrope observé dans des essais de laboratoire : ce seront les deux paramètres de base réglant la position des lignes de consolidation vierge ou des lignes de gonflement. L'axe des contraintes est tracé en logarithme naturel, ce qui conduit à modifier la définition de C_c et C_s en λ et K . Dans ce cas, l'axe des ordonnées est l'indice des vides. Il peut être judicieux de remplacer l'indice des vides par la déformation volumique (identique à la déformation axiale dans l'essai oedométrique). On utilise alors λ^* et K^* . Dans ce cas, l'indice des vides est variable. Il peut dans la majorité des cas être pris constant, et égal à la valeur initiale. (La figure III.6) résume les différentes définitions des paramètres.

6.2. Cohésion :

Une cohésion effective peut être introduite dans le modèle (SSM). Elle peut être nulle.

6.3. Paramètre de frottement :

On rentre directement les valeurs de cohésion et d'angle de frottement

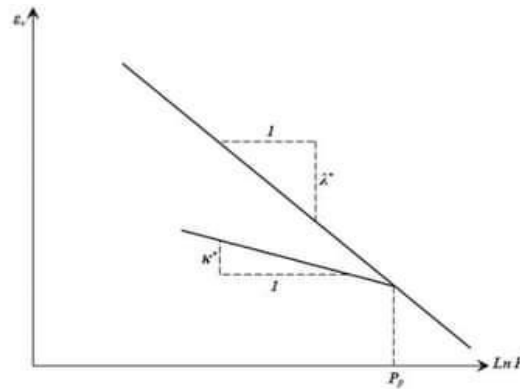


Figure III.6 : Représentations de l'essai oedométrique.

6.4. Paramètre de dilatance :

Il est calculé automatiquement à partir de l'angle de dilatance : normalement, dans les sols mous celui-ci est faible.

6.5. Paramètre de contrainte K0 :

En générale, la valeur de k_0^{NC} calculée par le programme est supérieure à celle calculée par la formule de Jacky ($k_0^{NC} = 1 - \sin \varnothing$)

6.6. Coefficient de Poisson :

Dans les modèles Cam-Clay et dérivés (dont le SSM), le coefficient de Poisson est un paramètre élastique important. Dans une charge-décharge oedométrique, c'est ce paramètre qui fait que les contraintes horizontales diminuent moins vite que les contraintes verticales. Ce n'est donc pas le coefficient de Poisson qui pourrait être relié à une valeur de K0 (i.e. $U/(1-U)$) mais une valeur plus faible, typiquement 0,1 ou 0,2.

$$\frac{U_{ur}}{1 - U_{ur}} = \frac{\Delta U_{xx}}{\Delta U_{yy}}$$

En Résumé :

Les paramètres nécessaires au SSM sont les suivants :

k^* : Indice du gonflement modifié [-]

λ^* : Indice de compression modifié [-]

C: Cohésion effective [KN/m²]

φ : Angle du frottement [°]

Ψ : Angle de dilatance [°]

Par défaut, les paramètres avancés sont :

U_{ur} : Coefficient du Poisson pour décharge-recharge [-]

K_0^{nc} : [-]

Conclusion :

Ce rapide tour d'horizon des certains modèles utilisés dans PLAXIS montre qu'il s'agit de modèles suffisamment simples pour qu'il soit possible d'en déterminer les paramètres. Il n'y a dans ces modèles aucun paramètre de calage ou sans signification physique comme on en rencontre souvent dans des modèles plus sophistiqués. Souvent la détermination des paramètres nécessite des techniques d'optimisation.

L'utilisateur doit se concentrer sur deux choix : l'un est inhérent à la géotechnique en général, l'autre concerne la simulation numérique.

La détermination des paramètres géotechniques à entrer dans PLAXIS n'est pas différente d'un choix de paramètres de calcul "manuel" pour un calcul de tassement ou de stabilité : à partir d'essais parcellaires, il est indispensable d'arriver à ce que l'on pourrait appeler un modèle géotechnique de terrain. Certains des paramètres sont différents dans leurs expressions, mais toujours reliés à des paramètres géotechniques classiques. Le paramètre le moins "courant" est vraisemblablement l'angle de dilatance. Pour ce qui concerne les lois de comportement nous avons retenu :

Le modèle élastique linéaire parfaitement plastique de Mohr Coulomb pour le remblai. Le matériau utilisé pour la construction de remblai est frottant sans cohésion. Le modèle pour les sols mous (SSM) pour le sol de fondation. Le modèle élastique pour l'élément de géogridde en bidimensionnel. L'interaction de cet élément de géogridde, avec le remblai et le sol de fondation, est assurée par des éléments d'interface. (9)

Chapitre IV :

**modélisation numérique d'un
remblai renforcé par les colonnes
de sable recouvert de géotextiles
sur un sol compressible**

1.Introduction :

Pour construire sur sol compressible , il faut les stabiliser pour éviter tous les problèmes de déformation. Les colonnes de sable sont de plus en plus utiliser pour l'amélioration des sols, en particulier pour l'ouvrage souple tel que les remblais routiers...etc.

Dans ce chapitre on va faire une étude de modalisation numérique d'une colonne de sable encasée avec un géotextile approprié. Cet étude est effectués pour déterminer la sensibilité des résultats visés (c'est -à-dire la déformation latérale de la colonnes et tassement verticale).

2.Modélisation numérique :

2.1.Présentation du modèle éléments finis et paramètres matériaux :

Afin de simuler la cellule unitaire, un modèle axisymétrique a été entrepris en utilisant lacode élément PLAXIS 2d 2016 programme disponible dans le commerce pour analyser la déformation et stabilité pour une variété de problèmes géotechniques. Dans cette analyse numérique, un maillage très fin a été utilisé car les contraintes et les déplacements sont très élevés dans ce problème. Le problème de l'utilisation d'une colonne de sable pour soutenir un grand remblai sur une zone localement faible a été étudié.

Des choix appropriés des propriétés des matériaux sont nécessaires pour avoir une simulation précise du système de renforcement en modélisation numérique. Les propriétés du remblai, argile molle, des colonnes de pierre peuvent être trouvées dans la littérature (Alkhorshid et al 2018). Les colonnes ont été installées dans un maillage carré espacé, $s = 2,5$ m supportant un remblai de 10 m de haut (Hemb).

L'épaisseur du sol argileux et la longueur de la colonne de sable sont supposées être de 10 m sous-jacentes par une strate rigide et dure. Le rayon de la colonne à l'intérieur de la cellule unitaire r_c , était égal à 0,4 m, rayon de la zone d'influenc du poteau $r_e = 1,41$ m, taux de remplacement de surface ($A_{rr} = r_c^2/r_e^2$) égal à 8,16%, et une rigidité en traction géosynthétique (J) égale à 4000 kN/m.

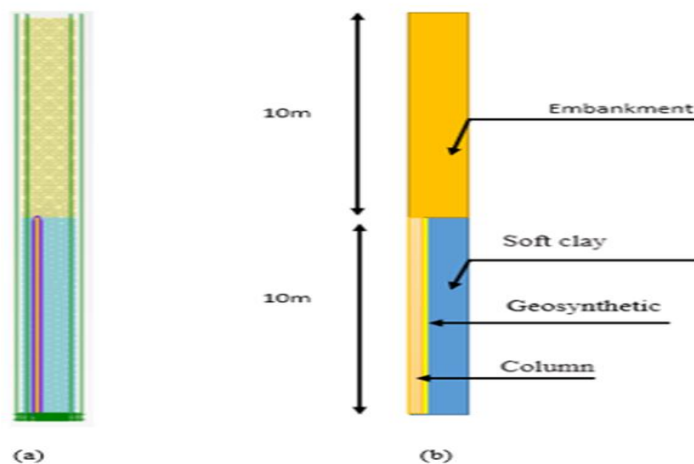


Figure IV.1 : Simulation axisymétrique par éléments finis de la colonne enrobée de géotextile dans le concept de cellule unitaire, (a) Condition aux limites et maillage par éléments finis, , (b) Schéma adopté dans les analyses numériques .

Tableaux IV.1 : Paramètres des matériaux utilisés dans l'analyse numérique

Paramètres	Argile molle	Colonne de sable	Remblai
Modèle de matériau	SSM	M-C	M-C
γ_{sat} (kN/m ³)	16	18	22
E (kPa)	-	28000	30000
ϕ (degré)	23	35	35
ψ (degré)	0	5	0
C' (kPa)	7	1	6
ν'	0.2	0.3	0.33
E_{50}^{ref} (kPa)	2313	-	-
E_{oed}^{ref} (KPa)	1850	-	-
E_{ur}^{ref} (KPa)	6938	-	-
Cc	-	-	-
Cs	-	-	-
e	-	-	-
P_{ref} (KPa)	100	-	-
OCR	1	-	-
K0	0.6	0.37	0.43
m (power)	1	-	-

3. Résultats et discussions :

3.1. Etat initial (sol sans renforcement)

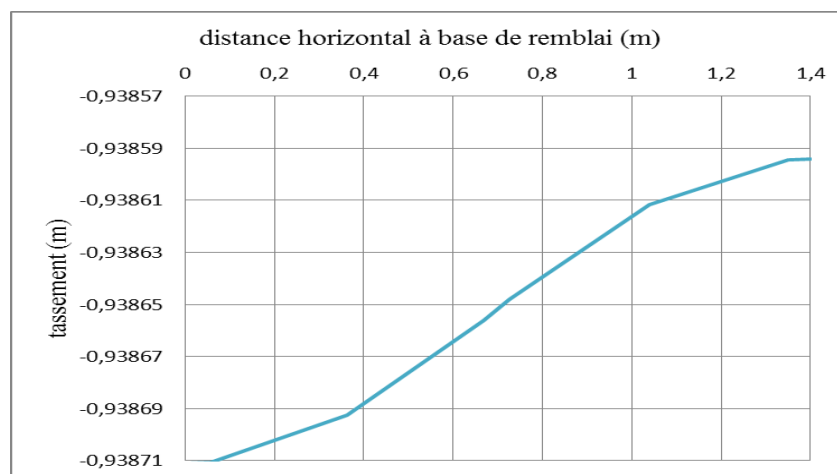


Figure IV.2 : sol sans renforcement.

Chapitre IV : modélisation numérique d'un sol non renforcé par les colonnes de sable recouvert de géotextiles

La figure IV.2 : montre le niveau d'affaissement du sol sans renforcement D'après les résultats obtenus, Où le tassement maximal à la distance de 0 m est estimé à 0.9387 m.

3.2.Tassement vertical et latérale déformation (OSANC) :

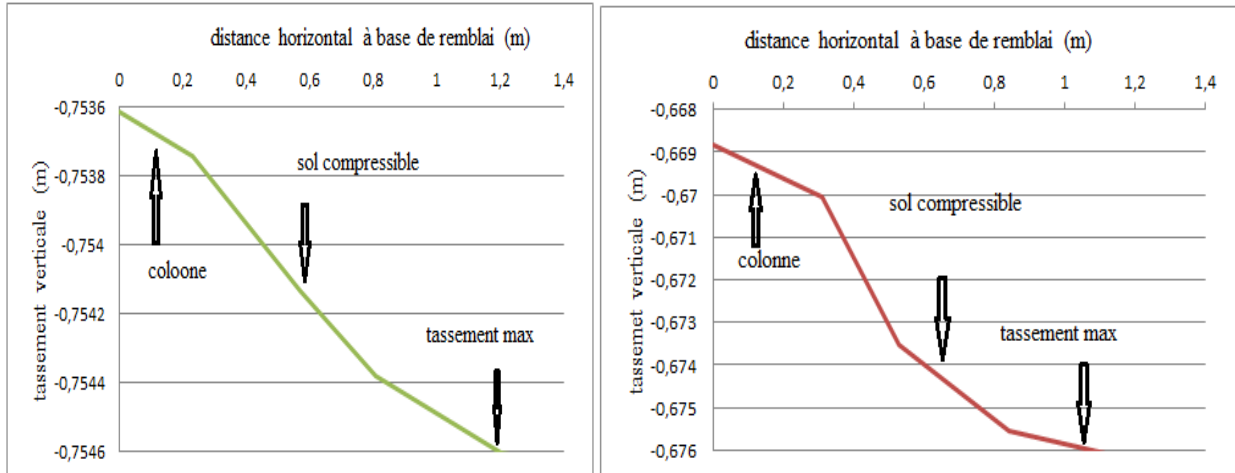


Figure IV.3 : tassement vertical, (a) colonne de sable ordinaire (OSANC) ;(b) colonne de sable encasée (ESANC).

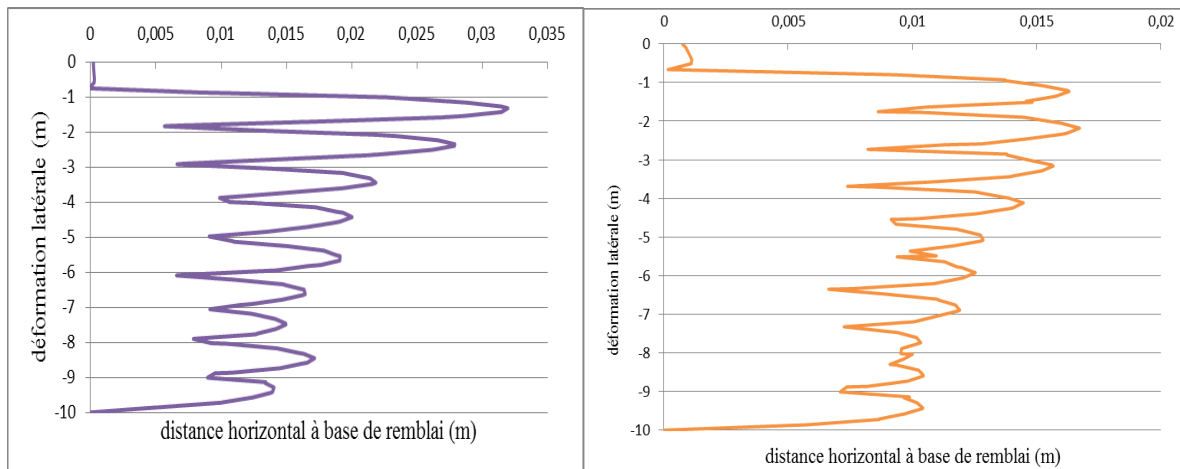


Figure IV.4: Déformation latérale, (a) colonne de sable ordinaire (OSANC) ; (b) colonne de sable encasée (ESANC)

La Figure IV.3: montre la variation du tassement vertical au sommet de la colonne distance hozisantale à la base du remblai. Pour les deux cas (colonne de sable ordinaire et encasée) avec un faible confinement du sol compressible a conduit au tassement max de valeur 1.4 m et 0.7 m respectivement de la colonne de sable ordinaire au contraire dans la colonne de sable enrobée on a trouvé que le tassement a diminué de valeur max 1.4 m et 0.6 m comme illustré à la figure IV.3.

Chapitre IV : modélisation numérique d'un sol non renforcé par les colonnes de sable recouvert de géotextiles

Les valeurs prédites de la variation de tassement sont fortement influencées par la déformation quand la colonne de sable ordinaire est enrobée.

La figure IV.4: montre la déformation à la partie supérieure de la colonne de sable ordinaire est 1.4 m et 0.03 m respectivement, au contraire de déformation latérale dans colonne de sable encasée a diminué à 1.4 m et 0.01 m comme illustré la figure IV.4

D'après les figures IV.3 et IV.4 nous concluons que par rapport à la colonne de sable sans enrobage du géotextile (OSANC), elle n'atteint pas une stabilité suffisante pour les remblais sur sols compressibles, ce qui est généralement le principal motif d'utilisation c'est (ESANC).

Conclusion :

Dans ce chapitre à travers de la modélisation numérique d'un remblai supporté d'une colonne de sable (ordinaire/ encastré avec un géotextile approprié). On a trouvé que la colonne de sable encastré jouer un rôle très important dans la construction sur les sols compressible (faible capacité portante) au contraire de (OSANC) : la déformation latérale de la colonne et le tassement vertical.

Selon les résultats obtenus à partir de la présente étude, les conclusions suivantes sont fabriquées:

- Il a été obtenu que les colonnes de sable ordinaire inefficaces pour soutenir le remblai en raison d'un renflement excessif (0.01 m) causé par le manque de pression latérale.
- D'autre part, les colonnes de sable encasées (OSANC) ont montré un bon comportement, à savoir un bombement (0.03 m) et un tassement (0.6 m contre 0.7 m pour (OSANC) de sorte qu'il est possible de construire en toute sécurité.

Conclusion générale

La contribution à l'analyse numérique de la stabilité du remblai par des colonnes de sable recouvert de géotextile sur des sols compressible montre une technologie très efficace, moins coûteuse et plus respectueuse de l'environnement, c'est-à-dire qu'elle a un impact moindre sur l'environnement par rapport aux autres techniques de renforcement des sols. Son objectif général est d'améliorer les propriétés mécaniques des sols compressible et de les améliorer en profondeur pour les rendre plus susceptibles de supporter des fondations légères pour des constructions légères telles que les remblais, les barrages et les ouvrages d'art....Ce travail est composée de deux parties principales. La première partie est consacrée à la structure bibliographique qui comporte trois chapitres. Le premier chapitre traite des généralités sur le sol, ses types et ses propriétés, le remblai et ces types. Le deuxième chapitre traité sur les méthodes de renforcement «par géotextiles et colonnes de sable. » Dans le dernier chapitre bibliographique, nous avons présenter l'outil de modalisation Plaxis 2D. La deuxième partie nous avons fait une étude de modalisation numérique pour un remblai supporté par des colonnes de sable recouvert des géotextiles pour atteindre l'équilibre sur sol compressible, cette étude paramétrique intense est effectués pour déterminer la sensibilité des résultats (c'est-à-dire la déformation latéral et tassement vertical). Sur la base des résultats de cette étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Il a été obtenu que les colonnes de sable (OSAND) inefficaces pour soutenir le remblai en raison d'un renflement excessif (0.03 m) causé par le manque de pression latérale.
- D'autre part, les colonnes de sable encastrées (ESANC) ont montré un bon comportement, à savoir un bombement (0.01 m) et un tassement (0.6 m contre 0.7 m pour OSANC) de sorte qu'il est possible de construire en toute sécurité.

Les Références

- 1) <https://www.africmemoire.com/part.3-chapitre-premier-generalites-sur-le-sol-785.html>
- 2) Lérau, J. (2006). Cours de Géotechnique 1. Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse, Département des sciences et technologies pour l'ingénieur.
- 3) https://www.academia.edu/35099782/Aide_m%C3%A9moire_de_m%C3%A9canique_des_sols?email_work_card=view-paper
- 4) <https://geniecivilpdf.com/wp-content/uploads/Etude-et-r%C3%A9alisation-des-remblais-sur-sols-compressibles.pdf>
- 5) <https://genie-civile.blogspot.com/2013/04/classificatio-et-geotechnique-des-sols.html>
- 6) Saleh, S. (2021). Improving Bearing Capacity of Weak Soils: A Review. Journal of Construction Research, 3(1).
- 7) https://user.engineering.uiowa.edu/~swan/courses/53139/notes/weak_compressible_soils.pdf
- 8) <https://repository.usthb.dz/bitstream/handle/123456789/2760/TH7085.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- 9) BENDAHO, B. (2011). Amélioration de la capacité portante des sols par les géotextiles (Doctoral dissertation).
- 10) KHAOUNI, E., OTMANI, S. (2019). stabilisation des sol par l'utilisation des géosynthétiques
- 11) AMIDOU, SERE. (1995). Ouvrages renforcés par géotextiles chargés en tête: Comportement et dimensionnement (Doctoral dissertation).
- 12) Rouhani, R. (2019). Etude Numérique Par Plaxis de la Stabilité d'un Remblai sur Sol mol renforcée par Colonnes ballastée entourée par géosynthétique.
- 13) Berrabah, F., Benmebarek, S., & Benmebarek, N. (2020). Three-dimensional numerical analysis of geosynthetic-reinforced embankment over locally weak zone. Transportation Infrastructure Geotechnology, 7(2), 269-296.
- 14) Benchelha, M. T., & Saidi, A. (2004). Amélioration des sols de fondation par colonnes ballastées. Cas des ouvrages d'art de la rocade méditerranéenne de nador, 1-12.
- 15) Vermeer, P., Schweiger, H., Karstunen, M., & Cudny, M. (2003). Geotechnics of Soft Soils- Theory and Practice.
- 16) KAROUN, S., et ZAMOUM, M, A (2019) l'influence des charges de la structure sur un sol renforcé par colonnes balastées.
- 17) LALOUCHE, M. (2021) comportement des sols renforcés par colonnes flexibles (Doctoral dissertation)

- 18) LAMOURI, A (2015) utilisation des methodes numériques dans les calculs de la stabilité des barrages en terre.
- 19) ADERRAHIM, Z. (2014) les source d'erreurs en modalisation numérique : application aux ouvrages géotechniques.
- 20) HELLALI,M., LALALI , M. (2020) Amélioration des sols par colonnes ballastées etude de cas.
- 21) Debbabi, I. E., Saddek, R. M., Rashid, A. S. A., & Muhammed, A. S. (2020). Numerical modeling of encased stone columns supporting embankments on sabkha soil. Civil Engineering Journal, 6(8), 1593-1608.
- 22) Bazizi, H., & Kara, D. (2010). Renforcement des sols par colonnes ballastées (cas de la zone portuaire de Bejaia) (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri TiziOuzou).
- 23) Mekerbi, M. (2012). Etude des remblais sur sols compressibles (Doctoral dissertation, Alger).
- 24) MEKAOUSSI, A. (2013). ANALYSE D'UN MODÈLE RÉDUIT DE COLONNES BALLASTÉES PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- 25) Alkhorshid, N. R., Araújo, G. L. S., & Palmeira, E. M. (2018). Behavior of geosynthetic-encased stone columns in soft clay: numerical and analytical evaluations. Soils and Rocks, 41(3), 333-343.