

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث 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 :/2022



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع...../2022

Mémoire de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : géotechnique

Thème

**Modélisation numérique des colonnes ballastées
recouvertes de géosynthétiques à couches
Horizontales supportant le remblai sur les sols mous**

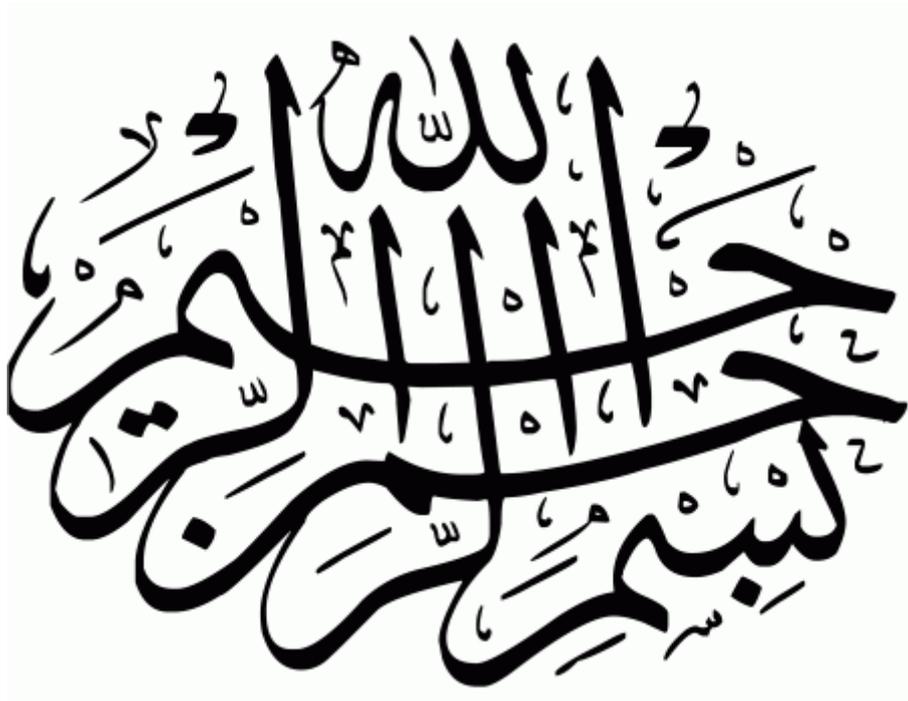
Nom et Prénom de l'étudiant :

Thelib Samira

Encadreur :

Dr. Debbabi imad Eddine

Promotion : Juin 2022



REMERCIEMENTS

Nous remercions notre Dieu qui a donné le courage et la volonté de poursuivre Nos études, ainsi que nos parents qui ont sacrifié leur vie pour notre réussite.

*La première personne que nous tenons à remercier est notre encadrant **Dr. Debbabi imad eddine**, pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être Mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute Personnalité.*

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé De près ou de loin à la réalisation de ce travail

DÉDICACES

Je dédie ce mémoire à :

*À l'être le plus cher de ma vie, **Mon père**, qui fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

A ma très chère mère, Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

*A mes chers frères **Halim** et **Djalal**, à mes sœurs **Souhila** et **Fatima** pour leur appui et leur encouragement*

*Aux bourgeons de la famille et source de bonheur : **djawed, houssam, aymen, manissa, Rissal, lina***

*A tous les membres de la famille **TheLib** et de la famille **Messaoudi***

*A tous mes amis et ceux qui ont partagé mes souvenirs d'école : **Malak, Djoumana, Imane, Randa, Kenza.***

A tous ceux qui m'ont appris une lettre à mes chers professeurs.

Résumé

De nos jours, la réduction des sites propices à la construction est devenue un grand défi pour les ingénieurs et les a incités à réfléchir à l'amélioration du sol le site. Parmi toutes les méthodes d'amélioration du sol, colonne ballastée devient de plus en plus populaire de nos jours en raison de sa construction simple et de considération économique. L'installation d'une colonne ballastée sur un sol mou a grain fin augmente la capacité et la stabilité. D'autre part, l'installation des colonnes ballastées dans des sols très mous tels que la sebkha qui a une densité et une résistance très faibles se heurte à certaines limitations et les particules de sol peuvent ne pas obstruer les ballastées avec succès, donc un développement ultérieur dans l'installation des colonnes ballastées renforce les colonnes avec des matériaux géo synthétiques ou des géotextiles. Ce travail présente les résultats de l'analyse numérique bidimensionnelle axiale réalisée l'aide de PLAXIS 2D, pour modéliser un remblai soutenu par des colonnes ballastées sur le sol de sebkha. L'étude porte sur l'évaluation du gonflement maximum de colonne ballastée et de l'affaissement du remblai. Des simulations numériques 2D ont été effectuées pour étudier les effets que les colonnes ballastées renforcées avec armature interne appelées enrobage verticale et bandes horizontale qui sont l'une des meilleures méthodes d'amélioration des zones faibles, en particulier pour augmenter la stabilité.

Mots-clés : colonnes ballastées renforcées ; géo synthétique ; Sol de Sebkha ; logiciel PLAXIS.

Abstract

Nowadays, the reduction of sites suitable for construction has become a great challenge for engineers and has prompted them to think about improving the soil of the site. Among all soil improvement methods, stone pillar is becoming more and more popular these days due to its simple construction and economical consideration. Installing a stone column on loose, fine-grained soil increases capacity and stability. On the other hand, the installation of the stone columns in very soft soils such as sabkha which has very low density and strength comes up against certain limitations and the soil particles may not clog the stones successfully, so a further development in the installation of stone columns reinforces the columns with geosynthetic materials or geotextiles. This work presents the results of the axial two-dimensional numerical analysis carried out using PLAXIS 2D, to model an embankment supported by stone columns on the ground of sabkha. The study concerns the evaluation of the maximum swelling of the stone column and the subsidence of the embankment. 2D numerical simulations were carried

out to study the effects that stone columns reinforced with internal reinforcement called vertical encasement and horizontal strips which are one of the best methods of improving weak areas, in particular to increase stability.

Keywords: reinforced stone columns; geosynthetics; Soil of Sabkha; PLAXIS software.

المخلص

في الوقت الحاضر أصبح تقليص المواقع المناسبة للإنشاءات تحديا كبيرا للمهندسين وشجعهم على التفكير في تحسين التربة على الموقع. من بين جميع طرق تحسين التربة أصبح العمود الحجري أكثر شيوعا هذه الأيام اعتمادا على بنائه البسيط الاقتصادية. يؤدي تركيب عمود حجري بشكل خاص على التربة الرخوة وذات الحبيبات الدقيقة إلى زيادة قدرة التحمل والاستقرار. من ناحية أخرى فإن تركيب اعمدة حجرية في تربة ناعمة للغاية مثل السبخة التي تمتلك كثافة وقوة منخفضة في تركيب الاعمدة بالتطوير الاضافي جدا يصطدم ببعض القيود وقد لا تسد جزيئات التربة الحجاره بنجاح لذا فان قمنا الحجرية كتعزيز الاعمدة بمواد تركيبية صناعية.

يعرض هذا العمل نتائج التحليل العددي ثنائي الابعاد المحوري الذي تم اجراءه باستخدام برنامج PLAXIS 2D لنمذجة

جسر مدعوم بأعمدة حجرية على تربة السبخة تتعلق الدراسة بتقييم الانتفاخ الأقصى للعمود الحجري وهبوط الردم

كلمات مفتاحية

اعمدة من الحجر المقوى، تربة السبخة، جيوسينثيتيك، برنامج بلاكسيس

Sommaire

REMÈRCIEMENTS

DÉDICACE

LISTE DES ABRÉVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE1

PARTIE I : Synthèse Bibliographique

Chapitre 1

généralités sur les sols compressibles

1.1 Introduction.....	3
1.2 Sols mous.....	4
1.2.1 Les vases et les argiles molles.....	4
1.2.2 Les sols de sebkha.....	4
1.2.2.1 Types de sebkha.....	5
a) Sebkha côtiers.....	5
b) Sebkha intérieurs.....	7
1.2.2.2 Distribution des sebkhas.....	7
1.2.2.3 Stabilisation des sebkhas.....	9
1.2.2.4 Les difficultés l'utilisation de la sebkha	10
1.2.2.5 Problèmes de Sebkha comme sol de fondation	10
1.3 Construction des remblais sur sols mous	11
1.3.1 Définition d'un remblai	11
1.3.1.1 Les types de remblai et leur comportement.....	12
1.3.2 La conception des remblais sur pilotis.....	13
1.3.3 Charges générées par le remblai.....	13
1.4 Problèmes posés par la construction des remblais sur sols mous.....	14

1.4.1 Problèmes de tassement.....	14
1.4.2 Problèmes de stabilité.....	15
Conclusion.....	15

Chapitre 2
Renforcement des sols par géosynthétique

2.1 Introduction.....	16
2.2 Définition géosynthétique.....	16
2.3 Type des géosynthétiques.....	17
2.4 Rôles principaux des matériaux géosynthétiques.....	20
2.5 Géosynthétique dans les remblais sur sols compressibles.....	23
2.6 Spécifications géosynthétique.....	25
2.7 Géosynthétiques pour le renforcement des sols.....	26
2.8 Remblais renforcés sur fondations meubles.....	26
2.8.1 Conception.....	26
2.8.2 Considérations de conception.....	27
2.8.3 Propriétés des matériaux.....	28
2.9 Quelques cas historiques des remblais renforcés par des géosynthétiques sur sols compressibles.....	29
2.10 Avantage de l'utilisation de géosynthétique pour le Renforcement.....	30
Conclusion.....	31

Chapitre 3
Renforcement des sols par colonnes ballastées

3.1 Introduction.....	32
3.2 Définition des colonnes ballastées.....	32
3.3 Renforcement des sols mous par des colonnes ballastées ordinaire.....	32
3.3.1 L'objectif d'un renforcement de sol par colonnes ballastées.....	32
3.3.2 Domaines d'applications.....	33

4.4.2 Effet CBE.....	51
Conclusion.....	52
Conclusion générale.....	53
Référence.....	55

LISTE DES ABRÉVIATIONS :

CBO : colonne ballastée ordinaire

CBE : colonne ballastée enveloppée

CBRH+CBEV : colonne ballastée renforcée horizontale + colonne ballastée enveloppée verticale

CBH : colonne ballastée horizontale

CBR : colonnes ballastées renforcée

CBS : colonne ballastée supporte

γ_a : poids spécifique sec

TDS : totale de solide dissous

Cc : indices de compression

Cs : indice de gonflement

OCR : ratios de sur consolidation

ρ_{max} : Densité sèche maximale

Wopt : teneur en humidité optimale

LL : limite de liquidité

PL : plastique limite

PL : l'indice de plasticité

GBS : géosynthétique bentonitiques

DVP : draine verticaux préfabriqués

Fs : coefficient de sécurité

M_D : moment moteur du sol

M_R : moment résistant du sol

ΔM_R : moment résistant du a l'action du géosynthétique

P_A : force de poussée du remblai

P_R : force de frottement le long de l'interface renforcement / remblai

J : Rigidité à la traction du géotextile

CFMS : comité français de mécanique des sols

P_l : pression limite nette mesurée au pressiomètre Louis Ménard,

q_c : résistance de pointe mesurée au pénétromètre statique

N_{SPT} : nombre de coups mesuré au « Standard Pénétration Test »,

C_u : cohésion non drainée

α : taux d'incorporation

A_c : rapport entre l'aire de la colonne

A : l'aire totale d'une cellule élémentaire

D : diamètre de la colonne

S : l'espacement entre les colonnes

n :Facteur de concentration des contraintes

σ_c :contrainte apportée par la colonne

σ_s : contrainte apportée par le sol

β : facteur de réduction des tassements

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 l'unité cell

S_v : espacement entre les couches

HS : sol durcissant

M-C : modèle de Mohr-Coulomb

γ_{sat} : Masse unitaire du sol sous la nappe phréatique

ψ : angle de dilatation

c : Cohésion effective

m : La pente de la ligne d'état critique

E_{50}^{ref} : Rigidité sécante en essai triaxial drainé standard

$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$: Rigidité tangente pour le chargement primaire de l'oedomètre

$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$: puissance de rigidité de déchargement/rechargement pour la dépendance de la rigidité au niveau de contrainte

FEM : méthode élément finis

LWZ : Zone localement faible

LISTE DES FIGURES

N° de la figure	Désignations des Figures	N° de page
Figure 1.1	Sebkhas côtières	6
Figure 1.2	Formation de sebkhas côtiers (d'après Akili et Torrance, 1981).	6
Figure 1.3	Sebkhas intérieures	7
Figure 1.4	Répartition des sols de sebkha dans le monde (d'après Al - Amoudi, 1994).	8
Figure 1.5	Remblais sur sols compressible (France Maccaferri)	12
Figure 1.6	Répartition des contraintes à la base d'un remblai.	14
Figure 1.7	Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation (Pilot et al 1988).	15
Figure 2.1	Les géotextiles (Bathurst 2007a).	17
Figure 2.2	Les géogrilles (Bathurst 2007a).	17
Figure 2.3	Les géofilets (Bathurst 2007a).	18
Figure 2.4	Les géomembranes (Bathurst 2007a).	18
Figure 2.5	Les géocomposites (Bathurst 2007a).	18
Figure 2.6	Les géosynthétiques bentonitiques (Bathurst 2007a).	19
Figure 2.7	Les géotuyaux (Bathurst 2007a).	19
Figure 2.8	Les géosynthétiques alvéolaires (Bathurst 2007a).	20
Figure 2.9	Géomousses (Bathurst 2007a).	20
Figure 2.10	Séparation (Palmeira 2007)	21
Figure 2.11	Filtration (Palmeira 2007)	21

Figure 2.12	Drainage (Palmeira 2007)	22
Figure 2.13	Renforcement (Palmeira 2007)	22
Figure 2.14	Confinement des (barrières aux) fluides/gaz (Palmeira 2007)	23
Figure 2.15	Contrôle de l'érosion (Palmeira 2007)	23
Figure 2.16	Remblais renforcés : a) concept ; b) rupture de roulement ; c) rupture de rotation et d) propagation latérale. (D'après Bonaparte et Christopher, 1987, et Haliburton et al. 1978).	28
Figure 3.1	Silos de stockage MECAFA Algérie	33
Figure 3.2	Centre commercial et bâtiments industriels (Keller France)	34
Figure 3.3	Ouvrages hydrauliques (Keller France)	34
Figure 3.4	Champ d'application des colonnes ballastées. (Brochure-Keller-France technique vibrocompactage-colonnes- balla	35
Figure 3.5	Transmission de surcharge des (A) pieux et (B) colonnes ballastées (PAR. Dr. Nouiabdelkader)	36
Figure 3.6	Mise en œuvre des colonnes ballastées par voie humide (Document de Keller®).	37
Figure 3.7	Réalisation des colonnes ballastées en voie sèche (Document de Keller®).	38
Figure 3.8	Cellule unitaire en maillage triangulaire et carrée de colonnes ballastée (PAR Dr. Nouiabdelkader)	39
Figure 3.9	Chargement du lit composite par Malarvizhi et Ilamparuthi (2004)	42
Figure 3.10	Configuration expérimentale par Sharma et al (2004)	43
Figure 3.11	Schémas de : (a) CBO ; (b) CBEV ; (c) CBRH (Mahmoud Ghazavi et al 2018).	44
Figure 3.12	Simulation axisymétrique par éléments finis de la colonne renforcée par géosynthétique dans le concept de cellule unitaire : (a) Condition aux limites et maillage par éléments finis ; (b) (CBEV) ; (c) (CBRH); (d) (CBEV + CBRH)	45

Figure 4.1	Simulation axisymétrique par éléments finis de la colonne renforcée par géosynthétique dans le concept de cellule unitaire : (a) (CBEV) ; (b) (CBRH) ; (c) (CBEV + CBRH).	47
Figure 4.2	(a) tassement vertical par rapport à la profondeur du remblai ; (b) Déformation latérale (CBO)	49
Figure 4.3	(a) tassement vertical par rapport à la profondeur du remblai ; (b) Déformation latérale (CBE)	50
Figure 4.4	(a) Effet de l'espacement sur les profils de renflement. (b)Tassement de colonne granulaires renforcé.	51
Figure 4.5	Déformation latérale du colonne en fonction de la profondeur pour différentes Valeurs de la profondeur du remblai	52

:

LISTE DES TABLEAUX

N° de tableau	Désignation du Tableau	N° de page
Tableau 2.1	Propriétés géosynthétiques requises pour les applications de renforcement	28
Tableau 3.1	Champs d'application des colonnes ballastée	35
Tableau 4.1	Paramètres des matériaux utilisés dans l'analyse numérique	48

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction générale :

Le sol est généralement un matériau hétérogène avec des caractéristique très variable, les principaux problèmes liés aux sols de façon générale se manifestent par une capacité portance faible, des déformations (tassement absolu ou différentiel) importants sous charges statique, ou dynamique (séisme) surtout pour les sols sableux lâches et saturés. L'intérêt est particulièrement porté dans cette étude sur le sol appelé sebkha. Sebkha est un sol plat salé que l'on trouve partout dans le monde et qui particulièrement répandue dans les pays chauds et arides. Ça peut être rencontrés dans les zones côtières. Construction de talus sur ces sols problématiques est toujours un défi pour les ingénieurs géotechniques.

Le développement de la mécanique des sols et les recherches de domaine de la géotechnique ont permis la mise au point d'une large gamme de techniques permettant l'amélioration du sol présentant de faibles propriétés géotechniques. Parmi les techniques d'amélioration de sol on citera, les colonnes ballastées qui sera l'objet principal de notre travail. Cette technique, consiste à incorporer par compactage un matériau granulaire, dans un terrain présentant de faibles caractéristiques géotechniques, elle améliore les caractéristiques mécaniques des sols par augmentation de leurs capacités portantes et la réduction de leurs tassements sous les charges appliquées. Ces dernières peuvent aussi jouer le rôle d'un drain et réduire les risques de liquéfaction dans les zones sismiques. Les colonnes ballastées sont considérées parmi les techniques les plus élaborées. De par leur rapidité d'exécution et leur prix compétitif par rapport aux autre méthodes existantes tel que les colonnes par exemple (Bououd et chibane, 2012). Les méthodes de justification les plus utilisées pour le dimensionnement des colonnes ballastées sont :

- Aboshi et al. (1979) ont renforcé la partie supérieure de la colonne avec une jupe en acier
- Sharma et al. (2004) Des couches horizontal de géogridle dans la partie supérieure de la colonne ont été adoptées.
- Mahmoud Ghazavi et al. (2018) colonnes ballastées renforcées horizontalement.
- Debbabi et al. Contribution À L'analyse Numérique Des Remblais Sur Sols Mous." Université Mohamed Khider–Biskra, 2021.

Introduction générale

L'objectif de ce travail est d'améliorer nos connaissances sur la problématique des remblais sur sols compressibles, ce travail de recherche se présente comme une contribution sous la forme d'une modélisation numérique qui étudie le comportement des remblais routiers construits sur un sol de sebkha renforcés par des colonnes ballastées encaissées.

Ce travail de recherche est composé de quatre chapitres, les trois premiers chapitres sont consacrés à l'étude bibliographique et dernier chapitre à l'étude numérique. Le présent mémoire a été organisé comme suit :

Le premier chapitre : est consacré à des généralités sur les sols compressibles et en particulier les sols sebkha : Catégories de sols mous et leurs caractéristiques techniques, types de Sebkha ; Caractéristiques de sols de sebkha ; Problèmes liés au sol sebkha ; Problèmes posés par la construction de remblais sur les sols compressibles.

Le deuxième chapitre : Dans ce chapitre présent les matériaux géosynthétiques les plus courants et leurs principales propriétés sont présentés. On retrouve également l'émergence de l'utilisation des géotextiles pour de nombreuses fonctions (renforcement, séparation, drainage, filtration...etc.) et Quelques cas historiques des remblais renforcés par des géosynthétiques sur sols compressibles.

Le troisième chapitre : contient des généralités sur la technique d'amélioration des sols par Colonnes ballastées. Il sera présenté dans ce chapitre les performances de la technique, les Domaines et les limites d'applications des colonnes ballastées, les techniques de mise en œuvre, Choix des matériaux, Paramètres du dimensionnement.

Le quatrième chapitre : Dans ce chapitre, des calculs numériques ont été effectués pour étudier l'efficacité des effets de la modélisation d'un pont sur un sol lisse amélioré avec un ensemble de colonnes ballastée. Réalisée à l'aide du programme PLAXIS, l'étude porte sur l'évaluation du gonflement maximal de la colonne lors du tassement du remblai.

PARTIE I :
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

**CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉ
SUR SOL COMPRESSIBLE**

1.1 Introduction :

Mécanique des sols et des roches s'intéressent à l'étude des sols compressibles. Car les dépôts d'argiles molles recourent une grande partie de la terre. C'est donc tout naturellement qu'un effort de recherche important et continu a été déployé dans le monde pour résoudre les problèmes posés par la construction d'ouvrages sur ces sols. Les sols compressibles sont généralement de formation récente, inaptes supporteur ouvrage d'art, mais pouvant, moyennant certaines précautions, servir de fondation à un remblai. Les remblais routiers, tout au moins ceux qui ont une hauteur importante, sont souvent édifiés sur des sols très compressibles. Ils sont en effet, le plus souvent, construits dans des zones de dépression comportant de grands épaisseurs comportant de grandes épaisseurs de tels sols, soit que le remblai serve lui-même à la traversée de la vallée, soit qu'il s'agisse du remblai d'accès à un ouvrage franchissant une rivière.

Les sols compressibles sont caractérisés par :

- Une nature argileuse avec plus ou moins de matière organique moins importante mais rarement négligeable ;
- Une teneur en eau très faible, et un poids spécifique apparent (ces sols sont très souvent l'histoire) ;
- Très faible résistance au cisaillement ;
- Haute compressibilité entraîne, même sous faible charges, des amplitudes de tassement importantes, le taux de règlement diminuant avec le temps, mais ne s'annulant pas quelques années. Ces sols, généralement de formation récente (quelques milliers d'années) contiennent presque toujours, en proportion plus ou moins importante, de matières organiques.

Elles peuvent être divisées en trois catégories : les vases et argiles molles ; soles sebkha.

1.2 Sols mous :

1.2.1 Les vases et les argiles molles :

Les vases est une substance présente dans la plupart des types de sols. Les géologues décrivent la vase comme de très petites particules (c'est-à-dire des particules). C'est un sédiment formé dans l'eau douce ou salée. En général, des particules très fines (inférieures à 200 μm avec un fort pourcentage de particules inférieures à 2 μm) de nature minérale variable, le pourcentage de rétention d'eau est très élevé car les particules se collent les unes aux autres, l'argile en contient généralement un certain pourcentage de matière organique (généralement moins de 10%). Il peut s'agir de tourbe si la présence de certains micro-organismes favorise la formation de tourbe. En fait, du point de vue géotechnique, on confond souvent vase et argile molle.

Les argiles molles représentent une catégorie bien connue de sols problématiques rencontrés souvent dans les régions côtières sous forme de dépôts d'épaisseurs variables. Pour le mécanicien des sols, depuis la phase de reconnaissance géotechnique jusqu'à la modélisation du comportement, divers problèmes sont posés par les argiles molles. Pour le géotechnicien, ces sols se caractérisent par :

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

1.2.2 Les sols de sebkha :

Une sebkha du mot arabe sebkha, que l'on trouve en pays désertique ou presque est une dépression temporairement occupée par un lac, en général salé et où se déposent des évaporites. Les eaux proviennent du ruissellement, mais aussi des nappes phréatiques d'après le dictionnaire de géologie, (Alain Foucault et Jean-François Raoult, 2001). Ces dépressions fermées, excepté les cuvettes karstiques du type doline, telles les dayas des Hamadas nord-

Chapitre 1 : généralité sur sol compressible

africaines, constituent un des traits majeurs et des plus austères des paysages arides. Leur origine est essentiellement tectonique, mais leur évolution ultérieure est d'ordre Climatique.

Consistent essentiellement en des particules de silt sableux et d'argile saleuse faiblement. Les sebkhas sont le résultat de l'érosion hydro-éolienne et d'un déblaiement éolien. Ces cuvettes sont alimentées en eau de manière discontinue soit par l'écoulement des oueds en saison des pluies, soit par les eaux des nappes souterraines, qui remontent vers la surface, lors des saisons chaudes, en suivant des failles. À la surface les cristaux de sels sont soumis à l'action du vent, et à son processus de creusement. [KACEM, M. O. U. S. S. A. (2006)]

1.2.2.1 Types de Sebkhha :

1.2.2.1.1 Les Sebkhhas côtières :

Sebkhhas côtières On pense que la formation de sebkhas côtiers est liée à la régression de la mer qui a prévalu dans de nombreuses régions le long des côtes sud et sud-ouest du golfe Persique au cours des 4000 à 5000 dernières années, en particulier dans les zones subtotaux, intertidales et supé tidales.]. En raison de leur proximité avec les côtes, les principaux constituants des sebkhas côtières sont les carbonates (c'est-à-dire l'aragonite et la calcite), dont la teneur diminue à mesure que la sebkha progresse vers la terre. Ces sebkhas sont généralement austères, incrustés de sel et pratiquement plats, à l'exception d'éventuels canaux de marée de tempête dispersés et de petites dunes de sable isolées. Figure 1.2 représentent une coupe transversale généralisée à travers une sebkha côtière typique. La figure 1.2 décrivent les caractéristiques géomorphologiques suivantes des sebkhas côtières : [AL-AMOUDI, O. S. B (2002)]

- La présence d'une barrière à la fois vers la mer et vers la terre par des dunes ou des affleurements rocheux,
- Le profil plutôt plat où la surface plonge très doucement vers la mer à des taux imperceptibles,
- La faible profondeur des nappes phréatiques qui ne dépasse normalement pas 1,5 m.



Figure 1.1 : Sebkhass côtières.

Sebkhha se forme en trois étapes :

- L'eau de mer recouvre une partie de la terre

Lors des inondations et forme des lagunes dans le sol ;

- Après le retrait de l'eau de mer,
- Il reste des sédiments qui seront mélangés avec du sable côtier,

Dans la phase finale, une haute La température et le vent provoquent l'évaporation de l'eau dans la région et le sol de la sebkha côtière est formé (Fookes et al. 1985). La figure (2) résume la formation de sebkhas côtières.

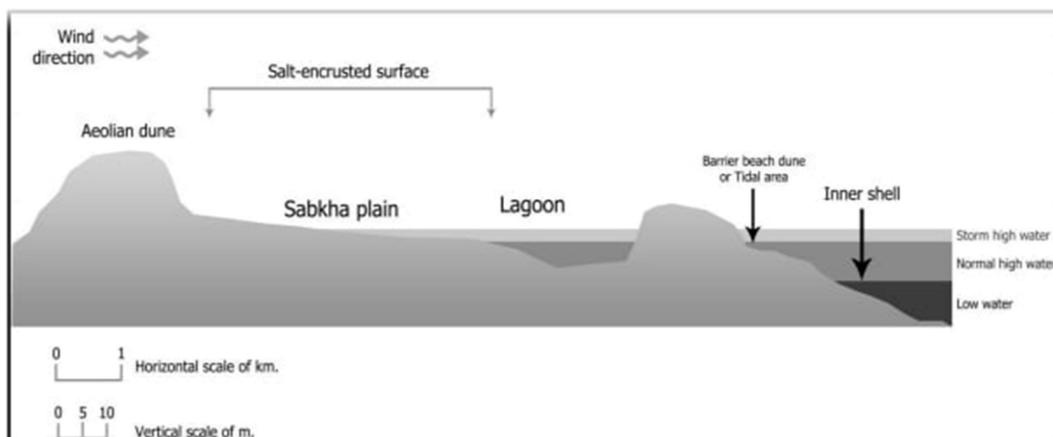


Figure 1.2 : Formation de sebkhas côtiers (d'après Akili et Torrance, 1981).

Chapitre 1 : généralité sur sol compressible

1.2.2.1.2 Les sebkhas intérieures :

Les sebkhas continentales ou intérieures sont à l'origine beaucoup plus anciennes que les sebkhas côtières, et leur formation était liée à la transgression de l'eau de mer il y a 300 000 ans, lorsque son niveau était bien au-dessus de son niveau actuel, et à cette époque, a commencé à régresser en laissant derrière elle des salines qui forment ces gisements. Ils sont souvent interprétés comme des surfaces de déflation, d'où le vent enlève de petites particules sèches, parallèlement à la nappe phréatique à un niveau contrôlé par l'humidité des sédiments. La nappe phréatique doit être plus élevée que la surface du substrat rocheux et le niveau de base de la déflation doit se situer juste au-dessus de la frange capillaire dans les sédiments. Le taux d'évaporation dans ces sebkhas est censé être plus élevé que celui des côtes en raison des conditions plus arides. Par conséquent, la nappe phréatique joue un rôle beaucoup plus influent dans le développement de ces types de sebkha qui sont généralement moins développés en étendue et principalement contrôlés tectoniquement et/ou topographiquement. Les sédiments de ces sebkhas se composent principalement de gypse (roses du désert), de quartz et de calcite, avec de l'halite toujours présente au niveau de la croûte. Enfin, la présence de sédiments graveleux est plus fréquente dans les terrains sebkha continentaux que côtiers. [AL-AMOUDI, O. S. B (2002)]



Figure 1.3 : sebkhas intérieures.

1.2.2.3 Distribution des sebkhas :

La répartition de la sebkha le long des rives sud et sud-ouest du golfe Persique est bien documentée. Ces sols s'étendent par intermittence sur plus de 1 700 km, avec des extensions intérieures variables d'environ 20 km en moyenne. Un résumé des sebkhas côtières et

Chapitre 1 : généralité sur sol compressible

continentales dans les plaines côtières de l'est de l'Arabie saoudite a été rapporté par Johnson et al. Le long des côtes occidentales de l'Arabie saoudite, des sebkhas côtières existantes à Obhor, Al-Lith et Yanbu. Près de la ville de Jizan, une sebkha côtière existe autour d'un dôme de sel. Au Nord, les sebkhas continentales sont réparties dans le Wadi As-Sirhan. La plupart de ces sebkhas sont situées dans certaines des villes les plus peuplées le long des côtes du golfe Persique et de la mer Rouge, ou de grands d'un proje et d'infrastructure existante.

Un examen de la distribution mondiale de la sebkha indique sa présence étendue au Moyen-Orient, notamment en Egypte, au Soudan, en Libye, en Tunisie, en Algérie et en Éthiopie. Sebkhha existe également en Inde, en Australie, au Mexique et en Afrique australe. Contrairement aux attentes, la sebkha et les sédiments de type sebkha se produisent dans des climats relativement froids, comme en Californie, en Utah et au Texas aux États-Unis. L'aridité semble donc jouer un rôle plus fondamental que le temps chaud dans la formation de la sebkha. Les emplacements actifs et potentiels de la sebkha dans le monde sont illustrés à la Fig. 1.4, ou les emplacements potentiels incluent certains sites en Amérique du Nord et du Sud ainsi que dans ce qu'on appelait auparavant l'Union soviétique. [AL-AMOUDI, O. S. B (2002)]

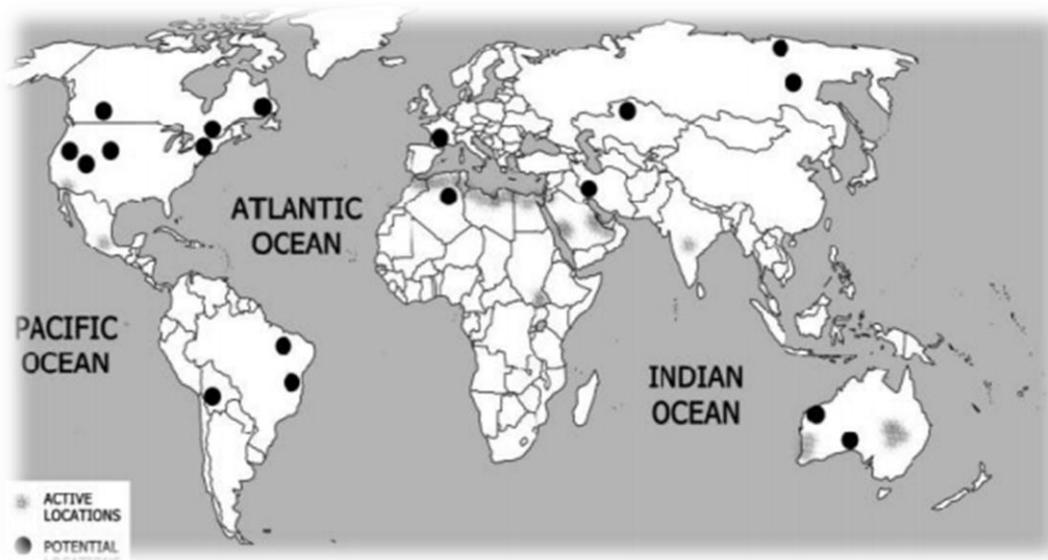


Figure 1.4 : Répartition des sols de sebkha dans le monde (d'après Al -Amoudi, 1994a).

1.2.2.3 Stabilisation de sebkha :

Beaucoup d'études ont été récemment menées sur la stabilisation de sebkha (Al-Amoudi, 1992 ; Ali, 1999 ; Ahmed, 1997 ; Al-Ayedi, 1996). Les résultats de ces études peuvent être récapitulés comme suit : [BERRABAH FOUAD 2010]

❖ Le ciment :

Le ciment est considéré l'un des meilleurs matériaux utilisés dans la stabilisation de sebkha, particulièrement quand le sol est sableux. Le pourcentage du ciment à ajouter est déterminé basé sur quelques nombres d'essais pour évaluer la résistance et la durabilité lorsqu'il est soumis à l'inondation par l'eau (Al-Ayedi, 1996).

❖ La chaux :

La chaux est employée pour stabiliser les sebkhas plastiques qui contiennent une grande quantité d'argile. Les essais préliminaires devraient être effectués pour confirmer la convenance de la chaux pour renforcer la sebkha, particulièrement en présence d'une concentration modérée des sulfates (c.-à-d., gypse et anhydrite) et des chlorures. Par ailleurs, la combinaison de chaux et du ciment peut être employée pour obtenir la résistance et la durabilité appropriées (Ahmed, 1997).

❖ Les géotextiles :

Les géotextiles peuvent être utilisés dans le cas de sebkha ayant des quantités élevées de sels (Abdul Jawad et autres, 1994). Il peut être secondairement utilisé comme technique de contrôle de drainage afin d'intercepter le bord capillaire (Ali, 1999 ; Siddiqi, 2000 ; Aiban 2006). Quelques essais sur l'utilisation des géotextiles pour augmenter la capacité portante des sebkhas et pour arrêter l'élévation de la salinité de l'eau ont été rapportées (Abdul Jawad et autres, 1994). Les géotextiles peuvent également réduire les déformations permanentes des sols de sebkha.

❖ La technique de vibroremplacement :

Dans le cas des couches épaisses de sebkha, les techniques de vibroremplacement (c.-à-d. colonnes ballastées) peuvent être la meilleure solution quand les conditions de chargement ne sont pas fortement concentrées. En ce cas, un certain nombre de colonnes sont recommandées pour être utilisées au-dessous de la fondation de natte (Akili et Ahmed, 1983).

- ❖ La technique de préchargement :

La technique de préchargement peut également être appliquée pour la stabilisation de sebkha. Cette technique peut être viable pour la sebkha compressible complexe ayant des sols argileux ou des matières organiques (Al-Shamrani et Dhowian, 1997).

1.2.2.4 Les difficultés l'utilisation de la sebkha :

- ❖ La variabilité des sédiments, qui rend les sites de la sebkha extrêmement sensibles au tassement différentiel ;
- ❖ Le cadre géochimique complexe et changeant de la sebkha, qui semble influencer les propriétés mécaniques des sédiments de la sebkha ;
- ❖ La difficulté d'évaluer, par des sondes conventionnelles, le degré de cimentation des sables de sebkha en particulier, dans la gamme légèrement à moyennement cimentée ;
- ❖ Le lessivage potentiel du carbonate dans les sédiments à haute teneur en carbonate, ainsi que les changements de volume potentiels connus pour se produire dans les couches contenant du gypse. [AKILI, W. (2004)]

1.2.2.5 Problèmes de Sebkha comme sol de fondation :

En raison de la nature des sols de sebkha, à la fois chimiquement et physiquement, certains problèmes peuvent survenir pendant la construction. Ces problèmes ont été identifiés par un certain nombre de chercheurs : Akili et Torrance (1980, 1981), Akili et Ahmed (1986), Al-Amoudi et al. (1992b), Abdul jauwad et Al-Amoudi (1995), Sabtan et Shehata (2002), Akili (2004) et Akili (2006). Les problèmes les plus courants sont résumés ci-dessous : [ALNUAIM, A. M (2014)]

- 1) La compressibilité du sol de sebkha varie d'un point à un autre ce qui peut conduire à grand tassement différentiel, qui peut causer de graves dommages
- 2) La résistance à la compression non confinée des couches superficielles de sebkha est très faible (environ 20 kPa), qui peut être encore réduit en raison de

la marée de tempête, des précipitations, de la montée du sol nappe phréatique ou crue éclair.

- 3) L'hydratation et la déshydratation du gypse instable dans la formation de sebkha peuvent conduire à grand changement volumétrique, qui peut causer des dommages dans les structures fondées sur le sol de sebkha (Akili, 1981).
- 4) Les sols de Sebkha sont riches en carbonates, chlorures et sulfates formant des minéraux tels que gypse, halite, dolomie, anhydrite et magnésite (Kinsman, 1969 ; Butler, 1969). La plupart des sels sont concentrés dans les 200 premiers millimètres du sol sebkha (Sabtan et Shehata, 2002), conduisant à des concentrations élevées de chlorure et de sulfate (jusqu'à 158 ppt et 5,24 points, respectivement). A ce niveau de concentration en sel, le renforcement des fondations peut se corroder et son béton peut se détériorer (Akili, 1981 ; Al-Amoudi, 1995).
- 5) Le mécanisme de pompage par évaporation provoque fréquemment une montée de la nappe phréatique niveau, qui déplace les sels solubles de la nappe phréatique vers la surface. Par conséquent, les sels solubles peuvent atteindre la sous-structure (c'est-à-dire les fondations). Si les sels solubles remplissent les pores de la sous-structure et s'assèchent, des fissures se développeront (Akili, 1981).
- 6) La capacité portante du sol de sebkha peut diminuer et le tassement des fondations peut augmenter si elle interagit avec l'eau douce interagit parce que l'eau douce pourrait se dissoudre certains des matériaux de cimentation et ainsi réduire la résistance au cisaillement de la sebkha (Sonnenfeld, 1984 ; Al-Amoudi, 1992).

1.3 Construction des remblais sur sols mous :

1.3.1 Définition d'un remblai :

Un remblai est un ouvrage en terre qui provient de la mise en place de matériaux pour rehausser ou niveler le terrain naturel. Il doit pouvoir supporter les sollicitations ultérieures (trafics routier ou ferroviaire, bâtiments, superstructures...) sans déformation préjudiciable (tassements, glissements...). La qualité d'un remblai dépend de la nature des matériaux qui le

Chapitre 1 : généralité sur sol compressible

composent et de leur mise en œuvre. Les matériaux, issus des déblais du site ou d'un emprunt, doivent être mis en place à une teneur en eau correcte (pour assurer une portance suffisante) et compactés (pour garantir leur stabilité). [NEDJMEDDINE, N (2019)]



Figure 1.5 : Remblais sur sols compressible (France Maccaferri)

1.3.1.1 Les 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 : [NEDJMEDDINE, N (2019)]

a. 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

b. 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

c. Les roches siliceuses :

Ces roches sont fragmentables mais sont résistantes.

d. Les roches salines :

La composition en sel de ses roches leur procure un caractère soluble qui ne permet pas de les utiliser. Elles seront donc comme matériaux de remblai.

e. La terre 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.

f. Les matériaux de démolition :

Les débris et matériaux issues d'une démolition peuvent être réutilisés dans le remblai. Nous pouvons citer entre autres, les briques, les parpaings, les blocs de ciment, les mortiers...Cependant certains éléments doivent être enlevés à savoir, les éléments putrescibles, les ferrailles etc....

1.3.2 La conception des remblais sur pilotis :

La conception des remblais sur colonne peut être divisée en trois parties principales :

1. Calcul de la proportion de la charge verticale porté par l'armature du fait de la voûte du sol sur les colonnes,
2. Calcul de la tension générée dans le renforcement dû à la proportion du vertical chargement non supporté par l'armature,
3. Calcul de la force de traction générée dans le renforcement dû à la tendance du remblai à étaler latéralement. [RUSSELL, D., NAUGHTON, P. J (2003)]

1.3.3 Charges générées par le remblai :

Le remblai apporte des charges aux sols de fondation qui sont d'abord proportionnelles à sa densité moyenne (γ) dont l'estimation est donc nécessaire pour toute évaluation de charge. La mesure de (γ) est souvent rendue difficile en terrassement par la rapidité avec laquelle le remblai est mis. De plus, cette densité peut changer en augmentant ou en diminuant la teneur en eau du matériau de remblai (pluie, etc.)

Lorsque le remblai est très large par rapport à sa hauteur H, il est normal de supposer que dans partie centrale la répartition des pressions à la base du remblai est verticale et uniforme :

$$\sigma_v = \gamma.H \quad (1.1)$$

Chapitre 1 : généralité sur sol compressible

Bien qu'il n'en soit plus de même sur les bords, on reconnaît que les contraintes sont verticales partout et proportionnel à la hauteur du remblai au-dessus du point considéré Figure 1.7. Cette hypothèse est considérée comme de moindre qualité car la largeur en tête (a) du remblai diminue en importance par rapport à sa hauteur (H) Chalosse. [DEBBABI, I. E (2021)]

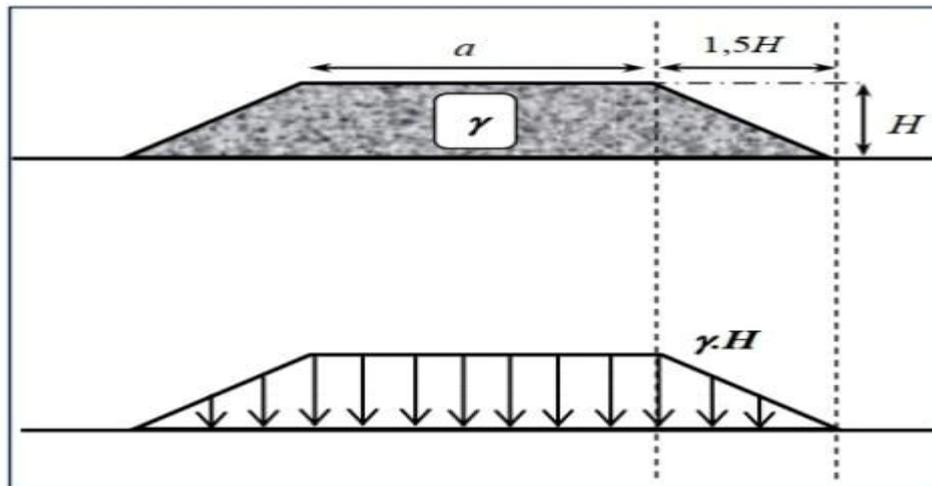


Figure 1.6 : Répartition des contraintes à la base d'un remblai.

1.4 Problèmes posés par la construction des remblais sur sols mous :

1.4.1 Les problèmes de tassement :

Le tassement du sol est sa déformation verticale due à l'application des contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son propre poids. Il ne faut pas le confondre avec la compaction du sol (appelée aussi tassement du sol) qui peut apparaître à l'occasion de phénomènes naturels (pluies intenses en sols battants), ou être d'origine anthropique (sur piétinement, passages d'engins agricoles). Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place. Dans les sols non saturés les tassements sont presque instantanés mais dans les sols saturés, ils peuvent s'étendre sur quelques secondes dans les sols sableux-graveleux, jusqu'à plusieurs dizaines d'années dans les argiles peu perméables. Pour vérifier la conformité des structures vis-à-vis des conditions de sécurité et de service on doit faire un calcul de tassement.

[<http://fr.scribd.com/doc/19173492/Elments-de-Mcanique-Des-Sols>]

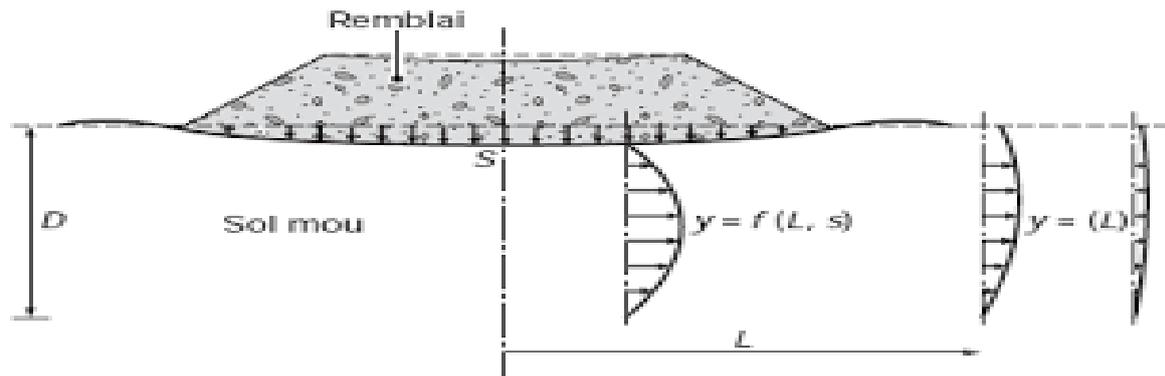


Figure 1.7 : Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation (Pilot et al 1988).

1.4.1 Problèmes 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. 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. [AKOUETE, K. B. (2016)]

Conclusion :

Les sols compressibles sont caractérisés par une faible résistance au cisaillement qui augmente avec consolidation, haute compressibilité et comportement retardé sous chargement dans le temps. Quelconque la construction de remblais sur ce type de sol pose généralement deux types de problèmes liés à stabilité et établissement.

CHAPITRE 2 :
RENFORCEMENT DES
SOLS PAR
GÉOSYNTHÉTIQUE

2.1 Introduction :

Le renforcement à l'aide des nappes géosynthétiques est l'une des techniques les plus importantes pour la construction de barrages sur des sols compressibles. Cette technique représente une alternative économiquement et techniquement intéressante. Holtz rapporte qu'en 1970, il y avait seulement cinq ou six types de géosynthétiques disponibles, alors qu'aujourd'hui plus de 600 produits géosynthétiques différents sont vendus dans le monde entier, les géosynthétiques ont révolutionné beaucoup d'aspects de notre pratique, et dans quelques applications ils ont entièrement remplacé le matériau de construction traditionnel. Dans beaucoup des cas, l'utilisation d'un géosynthétique permet l'augmentation de manière significative du facteur de sécurité, l'amélioration de la performance, et la réduction des coûts en comparaison avec une conception conventionnelle et une construction alternative.

Leur domaine d'application est très vaste puisqu'ils peuvent être installés :

Sur des talus d'ouvrages hydrauliques ou d'installations de stockage de déchets ;

À la base de remblai construit sur :

- Sur zone à risque de cavité,
- Sol compressible,
- Sol amélioré par inclusions rigides,

Dans des ouvrages en terre pour construire des talus renforcés ou des ouvrages de soutènements...

2.2 Définition géosynthétique :

Le nom "géosynthétique" désigne les nappes synthétiques utilisées en contact avec le sol. Mis en application depuis une vingtaine d'années dans le domaine du génie civil, les géosynthétiques sont principalement utilisés sous la forme des nappes pour assurer aussi bien un rôle de drain, de filtre, de séparation ou de renforcement. Ils permettent, lorsqu'ils sont incorporés dans la structure, de diminuer la quantité de matériaux utilisés, d'utiliser des matériaux de qualité limitée, d'empêcher l'interpénétration de deux couches, de renforcer en grande déformation d'un remblai sur sol mou. [HOLTZ R.D 2001]

2.3 Type des géosynthétiques :

- **Les géotextiles :**

Les géotextiles sont des nappes continues de fibres ou filaments tissés, non-tissés, tricotés ou thermo-soudés. Les nappes sont souples et perméables et ressemblent en général à des textiles. Les géotextiles sont utilisés pour des applications en séparation, filtration, drainage, renforcement et contrôle de l'érosion.

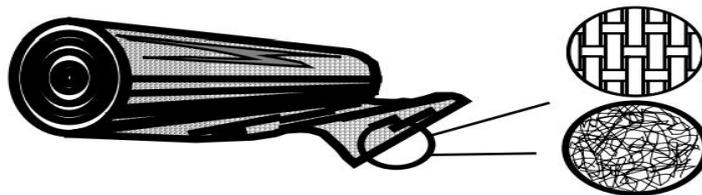


Figure 2.1 : Les géotextiles (Bathurst 2007a).

- **Les géogrilles :**

Les géogrilles sont des géosynthétiques ressemblant à des grilles ouvertes. La principale application des géogrilles est le renforcement des sols.

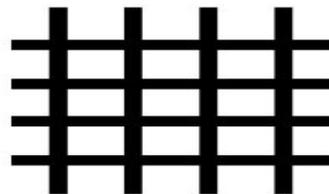


Figure 2.2 : Les géogrilles (Bathurst 2007a).

- **Les géofilets :**

Les géofilets sont des matériaux analogues aux grilles, constitués de deux ensembles de brins grossiers parallèles de polymères extrudés, s'entrecroisant selon un angle aigu constant. Le maillage forme une nappe ayant une porosité dans le plan qui est utilisée pour véhiculer des débits relativement importants de fluides ou de gaz.

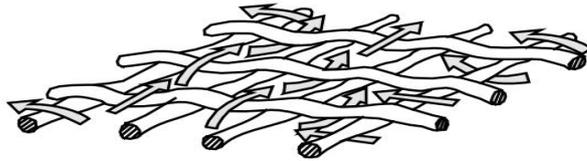


Figure 2.3: Les géofilets (Bathurst 2007a).

- **Les géomembranes :**

Les géomembranes sont des nappes souples continues fabriquées à partir d'un ou plusieurs matériaux synthétiques. Elles sont relativement imperméables et sont utilisées comme couche d'étanchéité pour le confinement des fluides ou des gaz et comme barrière à la vapeur.



Figure 2.4 : Les géomembranes (Bathurst 2007a).

- **Les géocomposites**

Les géocomposites sont des géosynthétiques fabriqués par association de deux ou plusieurs types de géosynthétiques. Ils incluent par exemple : géotextile-géofilet, géotextile-géogrille, géofilet-géomembrane ou un géosynthétique bentonitique (GSB). Les drains géocomposites préfabriqués ou les drains verticaux préfabriqués sont constitués d'une âme drainante en plastique entourée d'un filtre géotextile.

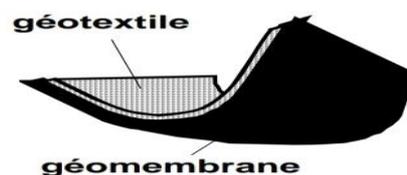


Figure 2.5 : Les géocomposites (Bathurst 2007a).

Chapitre 2 : Renforcement des sols par géosynthétique

- **Les géosynthétiques bentonitiques :**

Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) sont des géocomposites préfabriqués avec une couche de bentonite incorporée de façon typique entre un géotextile supérieur et un géotextile inférieur ou collée à une géomembrane ou une couche unique de géotextile. Les géosynthétiques bentonitiques à base de géotextiles sont souvent cousus ou aiguilletés à travers le cœur de bentonite pour augmenter la résistance au cisaillement interne. Lorsqu'ils sont hydratés, ils sont efficaces comme barrière aux liquides et gaz et sont communément utilisés dans les étanchéités de décharges, souvent en association avec une géomembrane.

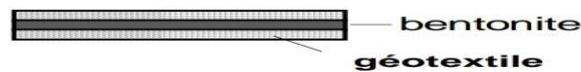


Figure 2.6 : Les géosynthétiques bentonitiques (Bathurst 2007a).

- **Les géotuyaux ;**

Les géotuyaux sont des tuyaux perforés ou des tuyaux pleins en polymères utilisés pour le drainage des liquides ou gaz (y compris la collecte des lixiviats ou gaz dans les cas d'utilisation en installation de stockage de déchets). Dans certains cas les tuyaux perforés sont entourés d'un filtre géotextile.

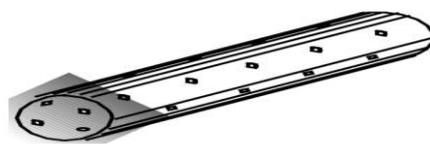


Figure 2.7 : Les géotuyaux (Bathurst 2007a).

- **Les géosynthétiques alvéolaires :**

Les géosynthétiques alvéolaires sont relativement épais, étant constitués de réseaux tridimensionnels réalisés à partir de feuilles de polymères découpées en bandes. Les bandes sont jointes entre elles pour former des cellules interconnectées qui sont remplies de sol et parfois de béton. Dans certains cas des bandes de grilles polyoléfiniques larges de 0,5 m à 1 m ont

Chapitre 2 : Renforcement des sols par géosynthétique

été attachées ensemble avec des barres en polymères verticales et utilisées pour former des couches épaisses de géosynthétiques alvéolaires appelées géomatelas.



Figure 2.8 : Les géosynthétiques alvéolaires (Bathurst 2007a).

- **Les Géomousses :**

Les blocs ou plaques de géomousses sont obtenus par expansion de mousse polystyrène pour former un réseau de faible densité de cellules closes remplies de gaz. Les géomousses sont utilisées pour l'isolation thermique, comme remblai léger ou comme couche verticale compressible pour réduire la pression des sols contre les murs rigides.

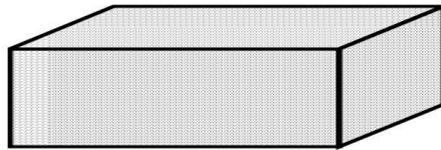


Figure 2.9 : géomousses (Bathurst 2007a).

2.4 Rôles principaux des matériaux géosynthétiques :

- **Séparation :**

Le géosynthétique sépare deux couches de sol de Granulométries différentes. Par exemple, des géotextiles sont utilisés pour empêcher les matériaux de la couche de forme d'une route de pénétrer dans les sols mous de la couche de fondation sous-jacente, maintenant ainsi l'épaisseur de projet et l'intégrité de la chaussée. Les séparateurs permettent également d'empêcher les sols fins sous-jacents d'être "aspirés" dans les couches de base en matériaux granulaires des routes.

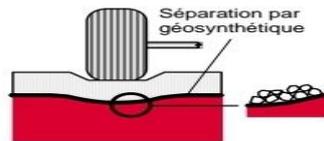


Figure 2.10 : Séparation (Palmeira 2007)

- **Filtration :**

Le géosynthétique agit comme un filtre de sable en permettant à l'eau de circuler dans le sol tout en retenant en amont les particules de sol. Par exemple les géotextiles sont utilisés pour empêcher la migration des sols dans les matériaux granulaires drainants ou les drains tout en maintenant l'écoulement au travers du système. Les géotextiles sont également utilisés en dessous des enrochements ou d'autres matériaux de protection dans les systèmes de protection des côtes ou des berges de rivières pour empêcher l'érosion des sols.

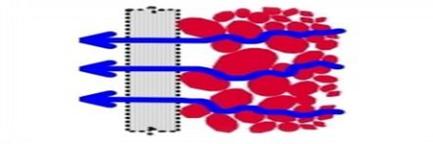


Figure 2.11 : Filtration (Palmeira 2007)

- **Drainage :**

Le géosynthétique agit comme un drain pour conduire les écoulements de fluides dans les sols moins perméables. Par exemple les géotextiles sont utilisés pour dissiper les pressions interstitielles à la base des remblais routiers. Pour des débits plus importants, des géocomposites drainants ont été développés. Ces matériaux ont été utilisés comme écrans drainants de rives de chaussées, épis drainants sur talus et comme drains dans les culées et murs de soutènement. Des drains verticaux préfabriqués (DVP) sont utilisés pour accélérer la consolidation des sols mous cohésifs sous remblais et remblais préchargés.

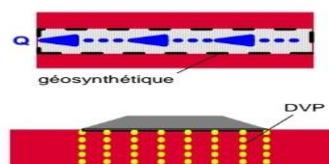


Figure 1.12 : Drainage (Palmeira 2007)

- **Renforcement :**

Le géosynthétique agit comme élément de renfort au sein d'une masse de sol ou en combinaison avec le sol pour produire un composite ayant des propriétés en déformation et résistance améliorées par rapport à un sol non renforcé. Par exemple, des géotextiles et géogrilles sont utilisés pour augmenter la résistance à la traction d'une masse de sol afin de créer des pentes verticales ou subverti cales (murs en sol renforcé). Le renforcement permet la construction de remblais sur sols de fondation très mous et la réalisation de pentes de talus de remblais plus raides qu'avec des sols non renforcés. Des géosynthétiques (habituellement des géogrilles) sont également utilisés pour le franchissement de cavités qui peuvent se développer sous des couches support en matériau granulaire (routes et voies ferrées) ou sous les systèmes de couverture dans les installations de stockage de déchets

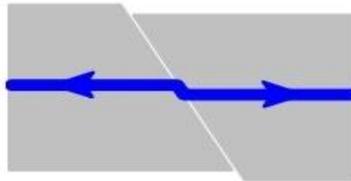


Figure 2.13 : Renforcement (Palmeira 2007)

- **Confinement des (barrières aux) fluides/gaz :**

Le géosynthétique se comporte comme une barrière relativement imperméable aux fluides ou gaz. Par exemple, des géomembranes, des composites en films minces et géotextiles, des géosynthétiques bentonitiques et des géotextiles enduits sur site sont utilisés comme barrière aux fluides pour limiter le débit de fluides ou gaz. Cette fonction est également utilisée dans les couches de chaussées en béton bitumineux, en capsulage de sols gonflants et confinement de déchets.

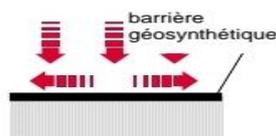


Figure 2.14 : Confinement des (barrières aux) fluides/gaz (Palmeira 2007)

- **Contrôle de l'érosion :**

le géosynthétique agit pour réduire l'érosion des sols causée par l'impact des pluies et les eaux de ruissellement. Par exemple, des couvertures géosynthétiques temporaires et des matelas géosynthétiques légers définitifs sont disposés sur la surface du sol exposé sur pentes. Des fascines en géotextile sont utilisées pour retenir les particules en suspension des eaux de ruissellement chargées en sédiments. Certains matelas pour le contrôle de l'érosion sont fabriqués avec des fibres de bois biodégradables.

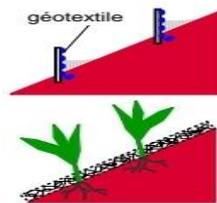
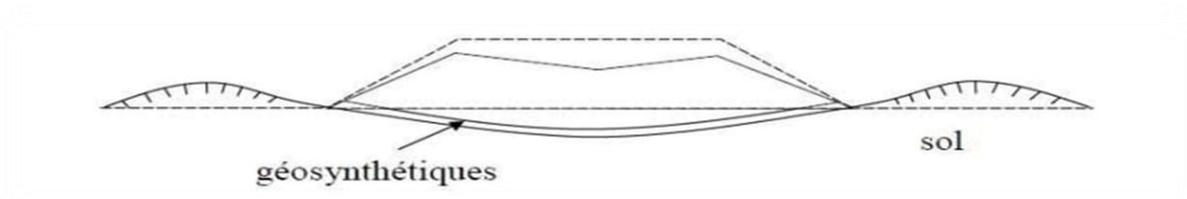


Figure 2.15 : Contrôle de l'érosion (Palmeira 2007)

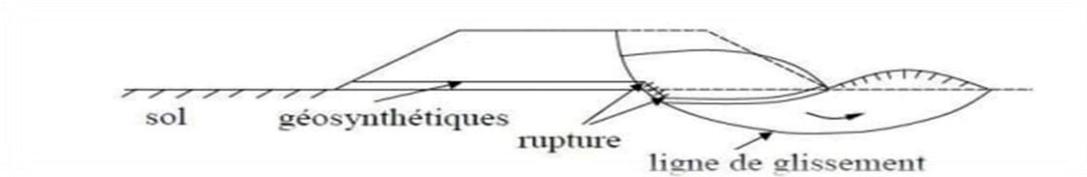
2.5 Géosynthétique dans les remblais sur sols compressibles :

La construction de remblais sur sols compressibles constitue un enjeu majeur. Dans ce contexte, l'utilisation de nappes géosynthétiques pour améliorer la stabilité de ces remblais est une des techniques de renforcement de sol parmi les plus efficaces et largement éprouvée. Pour ces problèmes, les géosynthétiques peuvent être efficacement utilisés pour : [HOLTZ, R. D. (2001)]

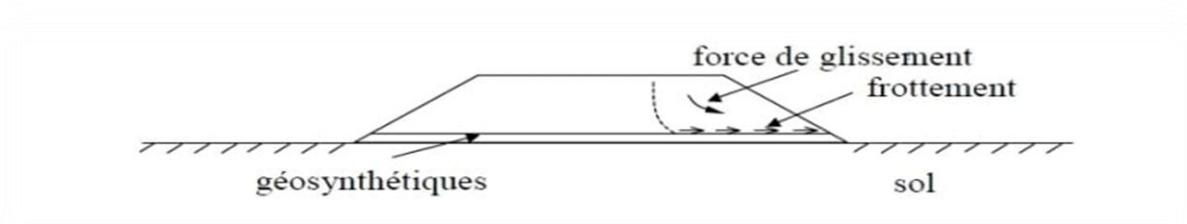
- 1) Réduire les déplacements des sols compressibles causés par leurs faibles portances ;



- 2) Prévenir une rupture d'ensemble du remblai et du sol de fondation ;



- 3) Prévenir une rupture par glissement le long de la nappe géosynthétique.



Le niveau de stabilité d'un remblai renforcé sur sols compressibles peut être évalué par le coefficient de sécurité :

- pour une stabilité d'ensemble : $F_s = \frac{M_R + \Delta M_R}{M_D} \geq$ en générale 1.2 ~1.3.

Où :

M_D : moment moteur du sol.

M_R : moment résistant du sol.

ΔM_R : moment résistant dû à l'action du géosynthétique.

- Pour une stabilité vis-à-vis d'une rupture par glissement, $F_S = \frac{P_R}{P_A} \geq$ général ~1.5.

P_A : force de poussée du remblai (de pression de poussée des terres),

P_R : force de frottement le long de l'interface renforcement /remblai.

2.5 Spécifications géosynthétique :

De bonnes spécifications sont essentielles au succès de tout projet de génie civil, et cela est particulièrement vrai pour les projets dans lesquels des géosynthétiques doivent être utilisés. Christopher et DiMaggio (1984) et Holtz et al. (1997) donnent des conseils sur la rédaction de spécifications géotextiles génériques et basées sur les performances. Les spécifications

Chapitre 2 : Renforcement des sols par géosynthétique

génériques ne sont que cela, génériques et sont basées sur les propriétés géosynthétiques spécifiques requises pour la conception, l'installation et les performances à long terme. Spécifier un géosynthétique particulier "nom de marque ou son équivalent" peut entraîner des difficultés lors de l'installation. L'entrepreneur peut sélectionner un produit qui a des propriétés complètement différentes de celles prévues par le concepteur, et la détermination de ce qui est « équivalent » est toujours un problème.

Des spécifications basées sur des listes de "produits approuvés" peuvent également être développées si elles sont basées sur des tests en laboratoire et sur l'expérience d'applications et de conditions spécifiques. Une fois qu'une liste approuvée a été établie par une agence, de nouveaux géosynthétiques peuvent être ajoutés après une évaluation appropriée. L'élaboration d'une liste approuvée prend un temps considérable effort, mais une fois établi, il fournit une méthode simple et pratique pour spécifier géosynthétiques pour les applications de routine. Toutes les spécifications géosynthétiques doivent inclure les éléments suivants :

- ✓ Exigences générales,
- ✓ Propriétés géosynthétiques spécifiques,
- ✓ Coutures et chevauchements,
- ✓ Procédures de placement,
- ✓ Réparations,
- ✓ Critères d'acceptation et de rejet.

Les exigences générales comprennent les types de géosynthétiques, les matériaux polymères acceptables et les commentaires liés à la stabilité et à la durabilité du matériau. Les fabricants et représentants de géosynthétiques sont de bonnes sources d'information sur ces caractéristiques. D'autres éléments qui doivent être spécifiés dans cette section sont des instructions sur le stockage et la manipulation afin que les produits puissent être protégés contre l'exposition aux rayons ultraviolets, à la poussière, à la boue ou à tout ce qui peut affecter leur performance. Le cas échéant, le poids et les dimensions du rouleau peuvent également être

Chapitre 2 : Renforcement des sols par géosynthétique

spécifiés, et les exigences de certification doivent être incluses dans cette section. [HOLTZ, R. D. (2001)]

2.7 Géosynthétiques pour le renforcement des sols :

Les trois principales applications de renforcement de sol à l'aide de géosynthétiques sont :

- (1) Le renforcement de la base des remblais construits sur des fondations très molles,
- (2) Pour les pentes de sol, en augmentant leur stabilité et leur angle de pente stable,
- (3) En réduisant les pressions de terre derrière les murs de soutènement. [HOLTZ, R. D. (2001)]

2.8 Remblais renforcés sur fondations meubles :

2.8.1 Conception :

La conception et la construction de remblais sur des sols de fondation mous est un problème géotechnique très difficile. Comme l'ont noté Leroueil et Rowe (2001), les projets réussis nécessitent une étude approfondie du sous-sol, la détermination des propriétés et des analyses de tassement et de stabilité. Si les tassements sont trop importants ou si une instabilité est probable, un certain type d'amélioration du sol de fondation est justifié. Les méthodes traditionnelles d'amélioration des sols comprennent le préchargement/la suralimentation avec des drains ; remplissage léger ; excavation et remplacement ; mélange de sol en profondeur, colonne de remblai, etc., comme discuté par Holtz (1989) et Holtz et al. (2001b). Aujourd'hui, le renforcement géosynthétique doit également être considéré comme une alternative réalisable pour le traitement des fondations. Dans certaines situations, la conception finale la plus économique peut être une combinaison d'une alternative de traitement de fondation traditionnelle avec un renforcement géosynthétique. La figure 2.20 montre le concept de base pour l'utilisation d'un renforcement géosynthétique. Notez que le renforcement ne réduira pas l'ampleur de la consolidation à long terme ou du tassement secondaire du remblai. [HOLTZ, R. D. (2001)]

2.8.2 Considérations de conception :

Comme pour les remblais ordinaires sur sols mous, l'approche de conception de base pour les remblais renforcés est de concevoir contre la rupture. Les manières dont les remblais Construites sur des fondations souples peuvent échouer ont été décrites par Terzaghi et al. (1996), entre autres. Fig. 2.16 montre un comportement insatisfaisant qui peut se produire dans les remblais renforcés. Les trois modes de rupture possibles indiquent les types d'analyses de stabilité nécessaires à la conception. La capacité portante globale du remblai doit être adéquate et le renforcement doit être suffisamment solide pour empêcher les ruptures de rotation au bord du remblai. Les ruptures de propagation latérale peuvent être évitées par le développement d'une résistance au cisaillement adéquate entre la base du remblai, le renforcement et la fondation. De plus, une analyse pour limiter les déformations du géosynthétique doit être effectuée. Enfin, les exigences de résistance du géosynthétique dans le sens longitudinal, généralement la résistance de la couture transversale, doivent être déterminées. Une discussion de ces concepts de conception ainsi que des procédures de conception détaillées sont données par Christopher et Holtz (1985), Bonaparte et al. (1987), Holtz (1989 et 1990), Humphrey et Rowe (1991), Holtz et al. (1997) et Leroucil et Rowe (2001). [HOLTZ, R. D. (2001)]

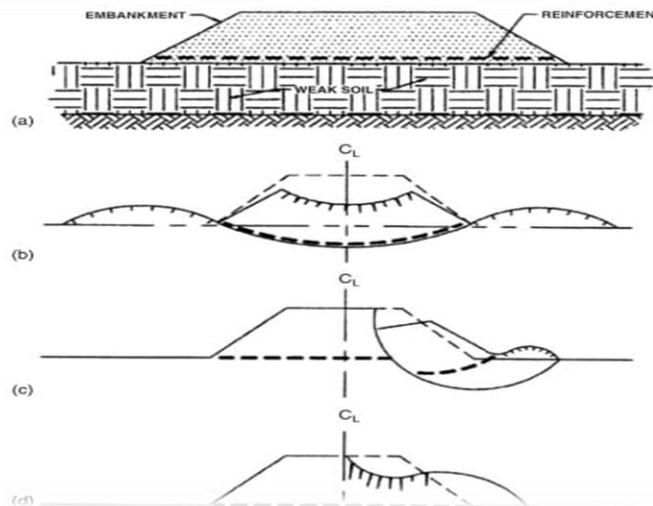


Figure 2.16 : Remblais renforcés : a) concept ; b) rupture de roulement ; c) rupture de rotation et d) propagation latérale. (D'après Bonaparte et Christopher, 1987, et Haliburton et al. 1978).

2.8.3 Propriétés des matériaux :

Sur la base des calculs de stabilité, les résistances géosynthétiques minimales requises pour la stabilité à un facteur de sécurité approprié peuvent être déterminées. En plus de ses dix

Chapitre 2 : Renforcement des sols par géosynthétique

propriétés de sille et de frottement, les exigences de drainage, les conditions de construction et les facteurs environnementaux doivent également être pris en compte. Les propriétés géosynthétiques requises pour les applications de renforcement sont données dans le tableau 2.1.

Lorsqu'ils sont correctement conçus et sélectionnés, les géotextiles ou les géogrilles à haute résistance peuvent fournir un renforcement adéquat des remblais. Les deux matériaux peuvent être utilisés aussi bien, à condition qu'ils aient les propriétés de conception requises. Il existe certaines différences dans la façon dont ils sont installés, en particulier en ce qui concerne les coutures et la maniabilité sur le terrain. De plus, sur certains sites très mous, en particulier là où il n'y a pas de tapis racinaire ou de couche végétative, les géogrilles. [HOLTZ, R. D. (2001)]

Tableau 2.1 : Propriétés géosynthétiques requises pour les applications de renforcement

Critères et paramètre	Biens
Exigences de conception :	
Mécanique	Résistance et module de grande largeur
Résistance à la traction et module	Résistance de grande largeur Fluage sous tension Angle de frottement
Force de couture	Sol-géosynthétique
Fluage de tension	
Frottement sol-géosynthétique	
Hydraulique	
Résistance de la tuyauterie	Taille d'ouverture apparente
Perméabilité	Perméabilité et permittivité
Exigences de constructibilité :	
Résistance à la traction	Prendre de la force
Résistance à la perforation	Résistance à la perforation
Résistance au déchirement	Résistance à la déchirure trapézoïdale
Durabilité :	
Stabilité aux UV (si exposé)	Résistance aux UV
Chimique et biologique (si nécessaire)	Résistance chimique et biologique

2.9 Quelques cas historiques des remblais renforcés par des géosynthétiques sur sols compressibles :

a) Cas historique 1 (Rowe, 2002) :

Un remblai a été réalisé à Sackville avec et sans renforcement sur des sols sensibles présentant, sur une épaisseur comprise entre 1 et 6 m, une teneur en eau w comprise entre 40 et 70 %, une limite de liquidité WL de 42 à 76 %, une limite de plasticité WP de 15 à 23 % et un indice de liquidité IL supérieur à 1. Le remblai sans renforcement a connu la rupture pour une hauteur de 6.1 m, alors que le remblai avec renforcement a atteint 8.2 m. [BENMEBAREK, S., BERRABAH, F2015]

b) Cas historique 2 (Rowe et Sodermen, 1984) :

Rowe et Sodermen (1984,1985) présente une étude de l'analyse de stabilité des remblais renforcés combinant la méthode d'équilibre limite et le méthode éléments finis. Le remblai d'essai a été réalisé sur 3.8 m d'argile organique avec un résistance au cisaillement non drainée de 8 KPa. La résistance à la traction du renforcement est 215 KN/m et sa raideur $J= 2000$ KN/m. la hauteur à la rupture a été de 1.75 m sans renforcement et 2.75 m pour un remblai renforcé à la base par un géosynthétique. L'analyse d'équilibre limite (la méthode de Bishop) de ces remblais exécutés par les auteurs a prévu des hauteurs à la rupture égale à 1.7 m et 2.55 m pour le remblai non renforcé et renforcé, respectivement. Ces prévisions sont comparées avec les hauteurs observées à la rupture dans les deux cas. [BENMEBAREK, S., BERRABAH, F2015]

Cas historique 3 (Volman et al, 1977) :

Dans ce cas historique deux remblais d'essai ont été réalisés sur 4.2 m de tourbe et d'argile. Un des remblais était non renforcé et l'autre a été renforcé avec une nappe de géotextile tissé. Le renforcement a une résistance à la traction de 61 KN/m, la déformation à la rupture égale à 20% et la tension moyenne égale à 258 KN/m. les autres rapportent que le remblai sans renforcement a connu la rupture pour une hauteur de 3.5m, alors que le remblai avec renforcement a atteint 4.5 m sans rupture. [BENMEBAREK, S., BERRABAH, F2015]

2.10 Avantage de l'utilisation de géosynthétique pour le

Renforcement :

- Amélioration des caractéristiques mécaniques des sols ;
- Réduction de l'interpénétration des matériaux d'apport avec les sols en place et diminution des mouvements de terre ;
- Réduction du mélange indésirable de terries et diminution des exigences de Transfer de matériau ;
- Modification des structures routières et ferroviaires pour en augmenter les capacités;
- Diminution des emprises;
- Création de merlons antibruit d'aspect naturel ;
- Réduction des délais de construction (possibilité de travailler pendant la période hivernale)
- Augmentation de la sécurité et de la stabilité des remblais ;
- Préservation de l'aspect naturel du paysage ;
- Optimisation des coûts de construction. [HAOUAM, S. E]

Conclusion

Les traitements des sols fragiles à l'aide de la méthode géosynthétique donne des résultats très satisfaisants tout en portant l'amélioration des sols et la réduction avec latérale de sol attendu dans les conditions de chargement périodique, avec un sol non traité. Dans ce chapitre présent les matériaux géosynthétiques les plus courants et leurs principales propriétés sont présentés. On retrouve également l'émergence de l'utilisation des géotextiles pour de nombreuses fonctions (renforcement, séparation, drainage, filtration...etc.)

Nous avons vu que les géosynthétiques permettent d'augmenter d'une manière significative le facteur de sécurité et la hauteur de remblai. Il s'agit aussi d'une augmentation de performance due aux tassements uniformes après la construction de remblai et une réduction des déplacements pendant la construction et ceci réduit la quantité de matériaux. Quelques cas historiques relatives aux remblais renforcés ont montré notamment, que le renforcement par géosynthétiques de la base des remblais permet de réaliser des remblais de hauteur supérieur à

Chapitre 2 : Renforcement des sols par géosynthétique

la hauteur de rupture sans renforcement. Les déformations dans le renforcement pendant la construction du remblai restent très faibles par rapport aux valeurs données par les calculs.

CHAPITRE 3 :
RENFORCEMENT DES SOLS
PAR COLONNE BALLASTÉE

3.1 Introduction

L'un des sols principaux défis des ingénieurs est de construire différents types de structures sur sol faible. Parmi les différentes techniques mises en œuvre par les ingénieurs, les colonnes ballastées sont l'un des moyens les plus utiles de modifier les faibles sols, tel que le sol alluvial. Ces méthodes détachent et modifient les sédiments fragiles utilisant des matériaux tels que la ballastée. Les colonnes ballastées constituent une technique intéressante pour l'amélioration en place des sols compressibles. Leurs avantages majeurs sont de réduire les tassements, d'augmenter la capacité portance des sols, d'accélérer la consolidation et l'élimination des risques de liquéfaction lors des séismes. Grâce à ces avantages, les procédés de renforcement sont considérablement développés dans le domaine de la construction géotechniques et cela à l'échelle internationale.

Dans ce chapitre contient des généralités sur la technique d'amélioration des sols par colonnes ballastées, les domaines et les limites d'applications des colonnes ballastées, les techniques de mise en œuvre, les paramètres caractéristiques.

3.2 Définition des colonnes ballastées :

Colonne ballastée est un Système de renforcement du sol consistant à mettre en place ponctuellement et selon un maillage donné des colonnes (diamètre faible par rapport à la profondeur) de matériau granulaire compacté à refus dans un terrain compressible. Cette technique permet ensuite d'utiliser des fondations superficielles. La mise en œuvre d'un renforcement de sol par colonnes ballastées est réalisée par une entreprise spécialisée dans les ouvrages de traitement de sols. Il peut s'agir d'une entreprise réalisant plus généralement des fondations spéciales, quoiqu'il ne s'agisse pas là de fondations à proprement parler, mais bien d'un traitement de sol visant l'amélioration de ses caractéristiques géotechniques. [ZAIMA, Y., BOUBEZARI, I 2019]

3.3 Renforcement des sols mous par des colonnes ballastées

ordinaire :

3.3.1 L'objectif d'un renforcement de sol par colonnes ballastées :

L'objectif d'un renforcement de sol par colonnes ballastées est d'améliorer les caractéristiques géotechniques d'un sol. Elles permettent, en substituant localement par un matériau granulaire

Chapitre 3 : Renforcement des sols par colonne ballastée

frottant le sol existant peu résistant, de moindre raideur et compressible, en vue d'obtenir une amélioration mécanique globale de l'ensemble « sol plus colonnes, » notamment en termes de compressibilité. Le traitement d'un sol par colonnes ballastées conjugue les actions suivantes :

- Augmenter la capacité portante du sol ;
 - Diminuer les tassements totaux et différentiels ;
 - Diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant ;
 - Diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des Séismes.
- [[Agence Qualité Construction](#) 2014]

3.3.2 Domaines d'applications :

3.3.2.1 Type d'ouvrage :

Les recommandations du Comité Français de Mécanique des Sols (CFMS, 2011) stipulent que l'utilisation la plus fréquente des traitements par colonnes ballastées concerne des ouvrages où existent des dallages ou radiers recevant des charges surfaciques et susceptibles d'accepter des tassements :

- Halls et Silos de stockage.



Figure 3.1 : Silos de stockage MECAFA Algérie

- Bâtiments industriels et commerciaux.



Figure 3.2 : centre commercial et bâtiments industriels (keller France)

- Ouvrages hydrauliques étanches (réservoirs de toute nature, station d'épuration).



Figure 3.3 : Ouvrages hydrauliques (Keller France).

Les colonnes ballastées peuvent aussi servir pour l'amélioration du sol support sous les remblais d'accès de surélévation (barrage et digues en terres, routes, chemin de fer) ou pour stabiliser des glissements du sol.

Elles sont moins utilisées sous les fondations superficielles de bâtiments logistiques et peu utilisées sous les bâtiments d'habitation. Elles sont utilisées aussi sous les ouvrages maritimes (renforcement de fonds marins). [REMADNA, A. (2019)]

3.3.2.2 Conditions géotechniques du sol :

Dhouib et Blondeau (2005) ont établi une synthèse des informations relatives aux champs d'application des colonnes ballastées relevées dans la littérature et auprès des entreprises spécialisées françaises (Tableau 3.1). Il ressort de cette synthèse une limitation de l'utilisation des colonnes ballastées aux argiles et limons de cohésion non drainée au moins

Chapitre 3 : Renforcement des sols par colonne ballastée

égale à 25 kPa. Toutefois, les auteurs reportent également des cas d'utilisation dans des sols de cohésion non drainée inférieure à cette limite.

Tableau 3.1 : Champs d'application des colonnes ballastées

Sols	Faisabilité	Etreinte latérale				Remarques
		P _i (kpa)	q _c (Mpa)	N _{SPT} (coups)	Cu (kpa)	
Argile	oui	150-400	0.6-1.2	4- 6	25-50	-
Limon	oui	150-400	0.6-1.2	4-6	25-50	-
Sable fin lâche	oui	150-400	0.6-1.2	4-6	-	-
Tourbe	non	-	-	-	-	Matériau Evolutif
Autre sols organiques	non	-	-	-	-	Matériau Evolutif
Remblais inerte	oui	200-500	0.6-1.6	-	-	-
Décharge	non	-	-	-	-	Matériau évolutif

Où :

pl : pression limite nette mesurée au pressiomètre Louis Ménard,

q_c : résistance de pointe mesurée au pénétromètre statique (CPT),

NSPT : nombre de coups mesuré au « Standard Pénétration Test »,

cu : cohésion non drainée du sol mou.

La mise en place de colonnes ballastées est déconseillée dans les terrains présentant des risques de perte des caractéristiques volumétriques/ mécaniques. L'utilisation de colonnes ballastées est ainsi exclue dans les tourbes, les vases organiques, les décharges d'ordures ménagères et les sols présentant une perte au feu supérieure à 5%. [LAOUCHE, M. (2021)]

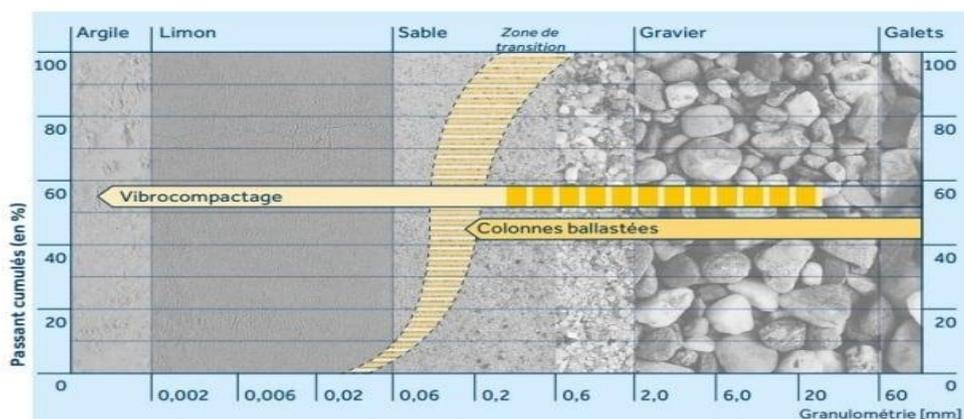


Figure 3.4 : Champ d'application des colonnes ballastées. (Brochure-Keller-France technique vibrocompactage-colonnes- balla)

3.3.3 Méthodes d'exécution des colonnes ballastées :

Les colonnes ballastées peuvent être réalisées par des vibreurs suspendus à une grue. La société Keller' a développé plusieurs types de vibreurs à savoir les conditions du sol. L'alimentation du matériau d'apport (ballast) peut se faire par le haut (alimentation par le haut) ou par le bas du vibreur (alimentation par le bas). [NOUI, A. (2019)]

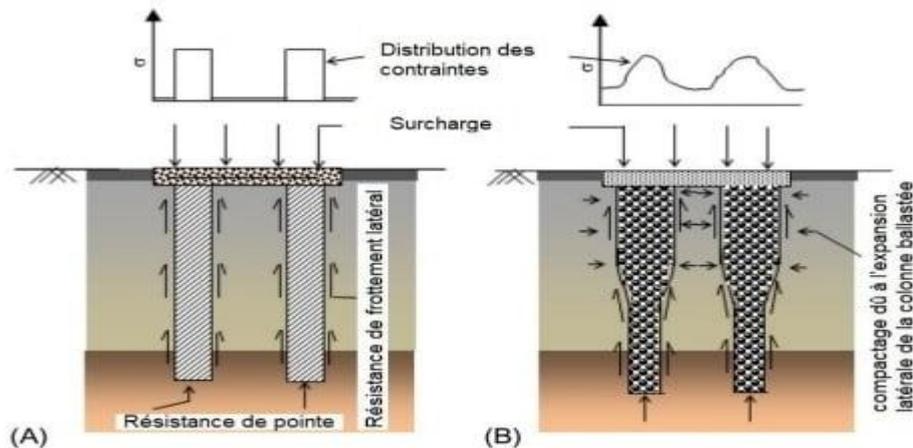


Figure 3.5 : transmission de surcharge des (A) pieux et (B) colonnes ballastées (NOUI, A. (2019))

Le fonçage du vibreur dans le sol s'effectue par l'injection de l'eau ou de l'air et parfois les deux (cas assez rare). Il y a deux procédés de mises en œuvre :

- Par voie humide ;
- Par voie sèche ;

3.3.3.1 Colonnes exécutées par voie humide (vibro- remplacement) :

La machine spécialisée est auto foncée avec un lançage à l'eau pour aider la pénétration sous l'effet du poids propre de vibreur. Le sol est déplacé suite au processus d'injection de l'eau, et les particules solides se déplacent à la surface par l'eau durant la réalisation du forage. Une fois le forage atteint la profondeur désirée, le vibreur sera remonté, et le matériau d'apport est incorporé gravitairement dans le forage réalisé. Un compactage du ballast est ensuite achevé par ré-pénétration du vibreur par passes successives de l'ordre de 0.3 à 1.2 m. Un processus qui amène à un déplacement latéral du ballast sur les bords du forage, et par conséquent une expansion de la colonne (Fig.3.6).

Chapitre 3 : Renforcement des sols par colonne ballastée

Ces étapes seront répétées jusqu'à la fin de l'installation de la colonne. Cette dernière sera finie avec un diamètre de 0.8 à 1.2 m. Plus que le sol en place est compressible, plus que l'expansion de la colonne sera significative.

La Fig3.6 présente les étapes de la procédure de l'installation d'une colonne par cette méthode et elle est utilisée dans les sols relativement imperméables et cohésifs ($C_u = 15$ à 50 kPa)

Dans les endroits où la nappe phréatique est élevée et la stabilité du forage est discutable (Greenwood et Kirsch 1984). Le principal inconvénient de cette technique est représenté dans la grande quantité d'eau requise et qui doit ensuite être éliminée sans causer de pollution (Babu et al. 2012). [NOUI, A. (2019)]

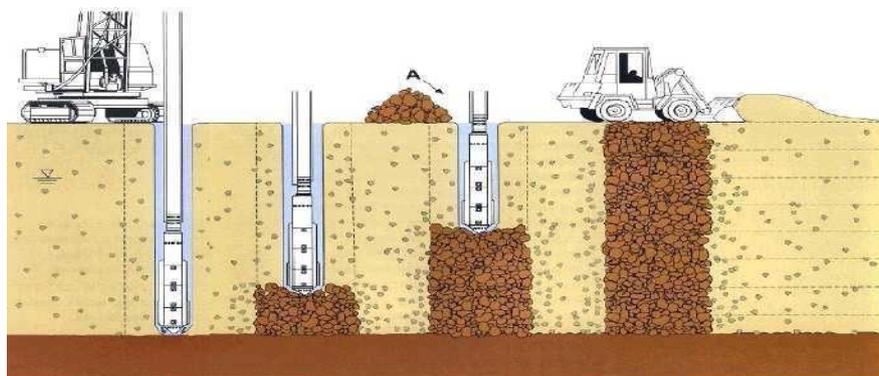


Figure 3.6: Mise en œuvre des colonnes ballastées par voie humide (Document de Keller®).

3.3.3.2 Colonnes Exécutées par voie Sèche (vibro- déplacement) :

Dans cette méthode, la pénétration à la profondeur requise est effectuée par auto-fonçage du vibreur directement dans le sol par refoulement latérale. Le forage est réalisé sous la pression d'air pour aider la pénétration du vibreur sous l'effet de son poids propre et des vibrations profondes. Aucune particule solide ne sera déplacée, et la réalisation du forage sera par vibro-refoulement. Le ballast est incorporé par une benne à la tête du forage. Une expansion latérale résulte suite compactage de la colonne, et cette dernière atteint un diamètre maximal de l'ordre de 0.6 m (moins que celle obtenue par installation par voie humide). La Fig.3.7 présente les étapes de l'installation d'une colonne par voie sèche. [NOUI, A. (2019)]

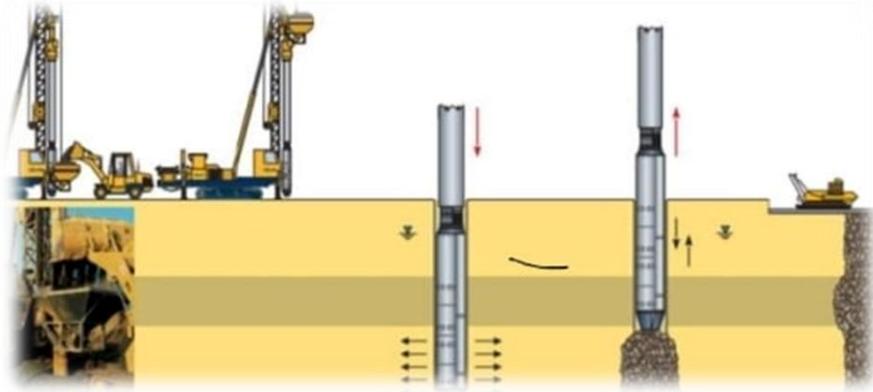


Figure 3.7 : réalisation des colonnes ballastées en voie sèche (Document de Keller®).

3.3.4 Paramètres du dimensionnement :

Les paramètres nécessaires pour le dimensionnement des colonnes ballastées sont le diamètre et la profondeur des colonnes, d'incorporation, facteur de concentration des contraintes, facteur de réduction de tassement, etc. L'espacement entre les colonnes, le taux d'incorporation. Le diamètre de la colonne mise en œuvre par voie humide (80 à 120 cm) est plus important que celui d'une colonne mise en œuvre par voie sèche (50 à 80 cm). La détermination de la hauteur des colonnes ballastées se fait à base de la contrainte transmise par l'ouvrage, la nature du sol et le but recherché. [NOUI, A. (2019)]

❖ Taux d'incorporation 'a' :

Le taux d'incorporation 'a' (facteur de substitution) est le rapport entre l'aire de la colonne A_c et l'aire totale d'une cellule élémentaire A , il utilise pour déterminer le pourcentage de la colonne par rapport au sol. 'a' est lié au diamètre de la colonne (D) et à l'espacement entre les colonnes (S)

$$\alpha = \frac{A_c}{A} = K \left(\frac{D}{S} \right)^2 \quad (1)$$

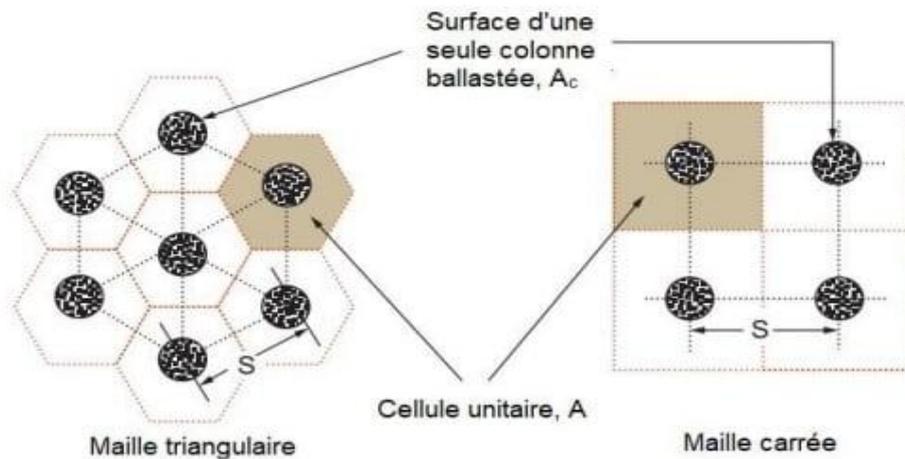


Figure 3.8 : cellule unitaire en maillage triangulaire et carrée de colonnes ballastée (NOUI, A. (2019))

Où k est $t/4$ et $7/(2\sqrt{3})$ pour les maillages carrés et triangulaires, respectivement. Le diamètre équivalent d'un cylindre renfermant la cellule unitaire peut être considéré comme $1.05S$ pour un modèle triangulaire et $1.13S$ pour un modèle carré.

❖ **Facteur de concentration des contraintes n :**

Le rapport de concentration des contraintes verticales est le rapport de la contrainte apportée par la colonne σ_c à celle apportée par le sol après traitement σ_s :

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} \quad (2)$$

❖ **Facteur réduction des tassements de β :**

Le facteur de réduction des tassements β est le rapport du tassement s_i ; du sol avant traitement au tassement s_f du milieu composite obtenu après traitement :

$$\beta = \frac{s_i}{s_f} \quad (3)$$

3.3.5 Choix des matériaux :

3.3.5.1 Matériaux constitutifs des colonnes :

Le matériau constitutif de la colonne est drainant. Selon la norme NF P 11-212 (DTU 13.2 « Fondations profondes pour le bâtiment »), les dispositions constructives suivantes doivent être respectées :

- La granulométrie du matériau d'apport doit vérifier les trois conditions : $d_s > 0,1 \text{ mm}$, $d_{30} > 10 \text{ mm}$, $d_{100} > 100 \text{ mm}$;
- Le fuseau granulométrique doit être choisi selon la fonction essentielle que l'on veut conférer à la colonne ballastée ;
- Le rôle porteur est accru par un fort pourcentage de cailloux. Le matériau d'apport peut être roulé ou concassé en fonction des disponibilités locales ;

La roche constituant les éléments du matériau d'apport doit avoir des caractéristiques mécaniques élevées ($R_c > 25 \text{ MPa}$) et ne pas être délitable ni sujette à l'attrition. [AMMAR DHOUB 2007]

3.3.5.2 Matériaux du matelas de répartition :

Le DTU 13.2 stipule « un groupe de colonnes ballastées est toujours coiffé par une couche de répartition... Il s'agit d'une couche épaisse de matériau graveleux et c'est souvent la plate-forme de travail elle-même qui joue le rôle de couche de répartition ». Lorsque le matelas de répartition sert de plate-forme de travail, son re-profilage et son compactage final, avec éventuellement un complément de matériau d'apport pour régler l'épaisseur demandée, doivent être réalisés après l'exécution totale des colonnes ballastées.

Le texte du COPREC précise que l'épaisseur du matelas de répartition dépend de plusieurs facteurs tels que :

- La nature et l'intensité des charges,
- Le type de fondations (cas des dallages armés ou non),
- Le module de déformation du matériau du matelas et du sol encaissant et les caractéristiques des colonnes ballastées (diamètre, maillage).
- Il stipule enfin que l'épaisseur du matelas doit être d'au moins 0,5 m sous les charges réparties avec des entraxes entre colonnes d'au plus 3 m et que le matelas n'est pas nécessaire sous les éléments de fondation rigide (semelles isolées, semelles filantes).

Chapitre 3 : Renforcement des sols par colonne ballastée

Il est rare que le matelas de répartition soit réalisé en matériau similaire à celui des colonnes. En pratique courante, le matelas est mis en place par l'entreprise chargée des terrassements sous forme de grave naturelle (0-31,5 mm ou 0-80 mm) ou grave-ciment sur grave naturelle, voire de limon traité.

D'après les informations recueillies auprès des entreprises spécialisées et celles émanant de la littérature, l'épaisseur du matelas varie en pratique entre 0,3 et 1 m. [AMMAR DHOUB 2007]

3.4 Renforcement des sols mous par des colonnes ballastées enveloppée :

Montrer la preuve d'une résistance et d'une compressibilité faibles est parmi les caractéristiques de sols mous d'où la nécessité d'une technique d'amélioration du sol pour ce type de sols est révélée. Par la simplicité de sa construction et par une réflexion économique, la colonne ballastée est devenue une méthode appropriée pour améliorer les strates faibles. Le mécanisme est tel que la capacité portante est augmentée au moyen d'un renflement qui provoque la pression passive à être générée dans le sol environnant (Greenwood, 1970). Cependant face à des sols très mous les colonnes ballastées ont certaines limitations comme la réduction du drainage radial dû aux particules d'argile obstruer autour des ballastées donc l'installation des colonnes ballastées doit être assistée avec renforcement tels que géosynthétiques, géogrilles, etc. (Raithel et Kempfert, 2000 ; Raithel et al., 2002). L'encapsulation des colonnes ballastées avec la géogrille de résistance supérieure entraîne des captivités de la colonne et alternativement empêche le déplacement latéral aide ainsi augmentant la capacité portante en plus d'éviter la perte de ballastée lors de l'installation.

Malarvizhi et Ilamparuthi (2004) ont effectué une série d'analyses empiriques sur des colonnes enveloppées dans une géogrille pour étudier l'effet de la géogrille sur la capacité portante de la boue marine molle. La colonne ballastée couverte a été testée et ses performances comparées à la colonne ballastée traditionnelle. Des boues marines à haute plasticité et des copeaux de granit d'une granulométrie allant de 5 à 10 mm ont été utilisés. Des géogrilles composées de Netlon Nova Curtain avec une maille à trous de 1 mm x 1 mm, une maille carrée à mailles à trous de 4 mm x 4 mm et du CE121 ont été utilisées comme matériaux d'incorporation pour la colonne ballastée. Les résultats ont montré que La rigidité de l'enrobage a augmenté la capacité de charge de la colonne ballastée. La colonne ballastée encastrée a réduit le tassement du lit d'argile. Cependant, les performances de la colonne ballastées renforcée

Chapitre 3 : Renforcement des sols par colonne ballastée

doivent être affinées en faisant varier le rapport de surface, la teneur en humidité de l'argile et le rapport l/d des colonnes. [MALARVIZHI, S. N., ILAMPARUTHI, K. 2004]

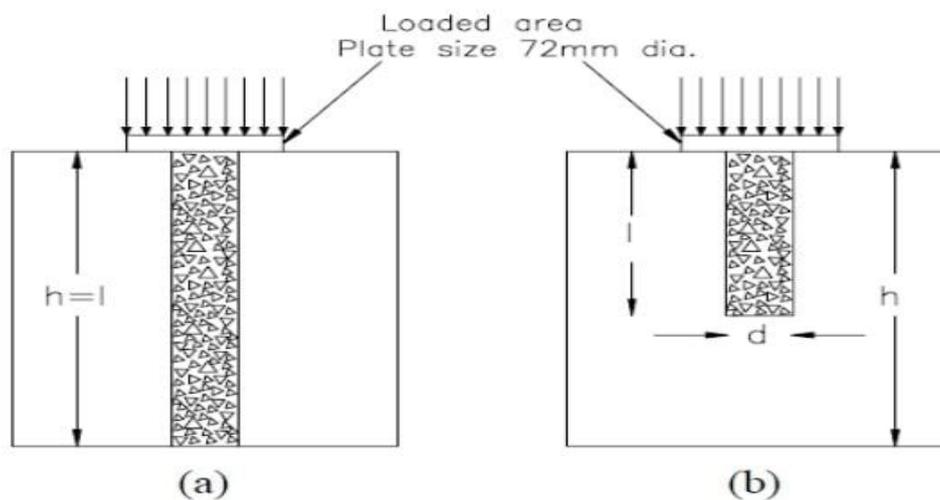


Figure 3.9 : Chargement du lit composite par (Malarvizhi et Ilamparuthi 2004)

3.5 Renforcement des sols mous par des colonnes ballastées supportent :

L'utilisation de colonnes ballastées est courante comme méthode de renforcement du sol pour soutenir des structures résilientes dans des sols mous à très meubles. Lorsque des sols améliorés très mou sont chargés par des colonnes ballastées, les colonnes ballastées sont soumises à un gonflement excessif, car un confinement latéral trop faible offert par de tels sols entraîne une très faible contrainte de rupture pour la terre composite. Les performances des colonnes ballastées dans telles conditions peuvent être améliorées soit en les gainant de matériaux géosynthétiques, soit en plaçant des bandes horizontales de terre à l'intérieur des colonnes à intervalles réguliers. La colonne ballastée renforcée est constituée de géosynthétique et granulats grossiers concassés de différentes tailles. Détails supplémentaires concernant les colonnes ballastées renforcées sont discutés dans Sharma et al (2004) et Mahmood Ghazavi et al (2018).

Sharma et al (2004) ont mené une série d'essais sur des colonnes ballastées à couches renforcées pour étudier l'effet de la géogrille sur la capacité portante et réduire le renflement de la colonne granulaire figure 3.14. Les essais ont été réalisés sur des colonnes ballastées de 300 mm de

Chapitre 3 : Renforcement des sols par colonne ballastée

diamètre et 60 mm de diamètre. Deux essais ont été réalisés, le premier essai en chargeant colonne seule avec une plaque de diamètre 60 mm et le second essai en chargeant toute la surface à l'aide d'une plaque de diamètre 120 mm, la charge a été appliquée par paliers de 45 N à 245 N. De cette analyse, il a été constaté que la géogrille améliorait efficacement la capacité portante de la colonne granulaire, le diamètre de gonflement et la longueur de gonflement de la colonne granulaire. [SHARMA ET AL 2004]

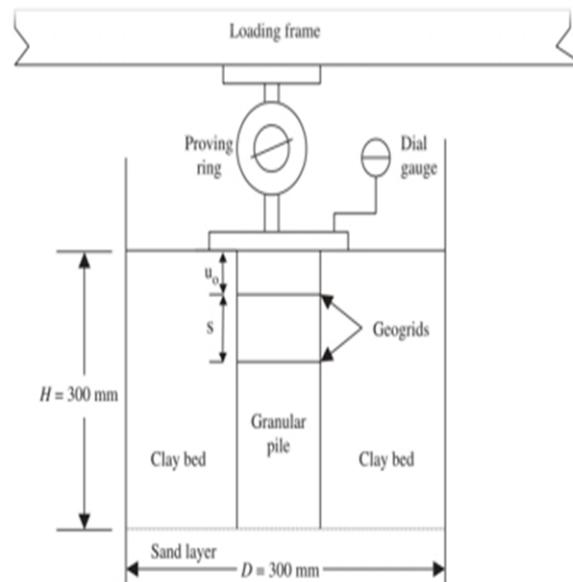


Figure 3. 10 : Configuration expérimentale par (Sharma et al 2004)

Mahmoud Ghazavi et al. (2018) ont mis en œuvre des séries de tests en laboratoire et numériques simulation en utilisant un enrobage vertical ou des couches horizontales (Figure 3.11). Certains gros corps des essais en laboratoire ont été effectués sur des colonnes ballastées en 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 ballastées augmente en utilisant des couches de renforcement horizontales. De plus, ils réduisent les déplacements latéraux renflement des colonnes ballastées par leurs effets de friction et d'emboîtement avec les agrégats de colonne ballastée. Les résultats de l'analyse numérique ont montré que la capacité portante augmente avec l'augmentation le nombre de couches horizontales et la diminution de l'espace entre les couches. [MAHMOUD GHAZAVI ET AL. (2018)]

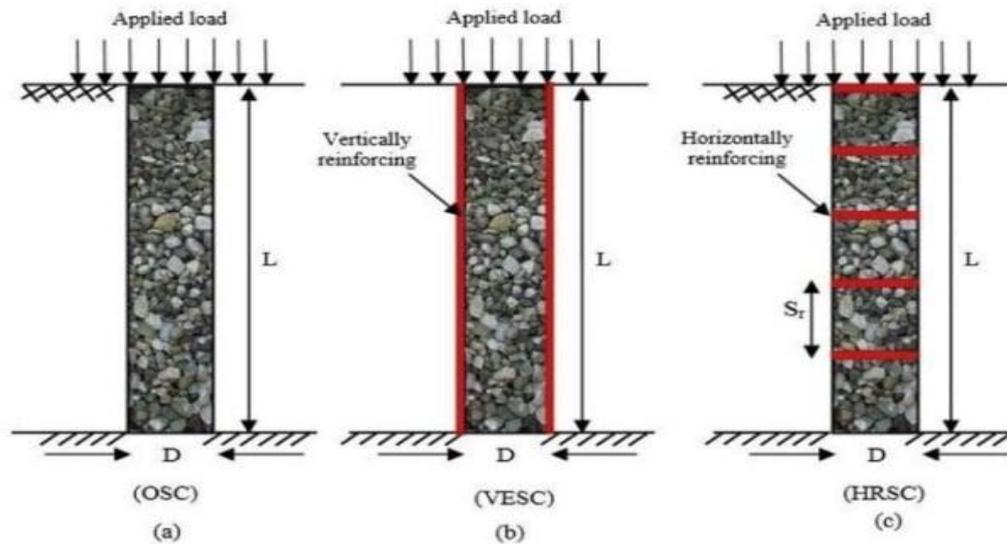


Figure 3.11 : Schémas de : (a) CBO ; (b) CBEV ; (c) CBEH (Mahmoud Ghazavi et al 2018).

3.6 colonne renforcée par géosynthétique à couches horizontales et verticale :

L'étude démontre que les colonnes de ballastée ordinaire (CBO) sont inefficaces compte tenu de la nature de ces sols en raison du renflement excessif causé par le manque de pression latérale. D'autre part, les colonnes ballastée armée avec renforcement externe et renforcement interne (VCBE+HRCB) sont l'une des meilleures méthodes d'amélioration des zones localement faibles (LWZ), notamment pour augmenter la stabilité du remblai sur l'autoroute, à savoir un renflement et un tassement raisonnable, de sorte qu'il est possible de construire des remblais sûrs et très hauts. En outre, une étude paramétrique approfondie est menée pour étudier l'effet de l'espacement des bandes de renforcement horizontales et de la longueur renforcée de la colonne. L'influence du diamètre de la colonne ballastée, de la profondeur de la zone localement faible et de l'effet de la rigidité du géosynthétique sur les performances du composite (CBE) - remblai est également étudiée [DEBBABI ET AL 2021]

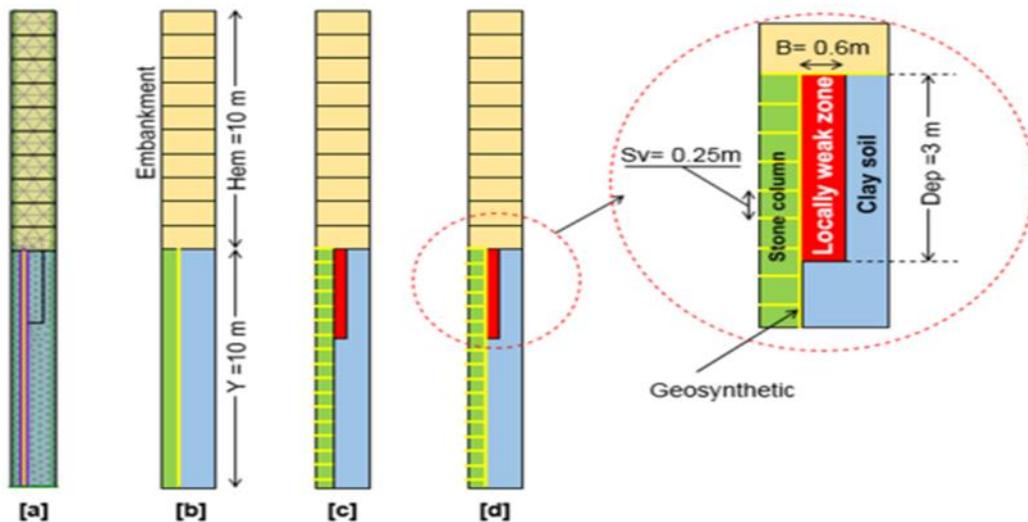


Figure 3.12 : Simulation axisymétrique par éléments finis de la colonne renforcée par géosynthétique dans le concept de cellule unitaire : (a) Condition aux limites et maillage par éléments finis ; (b) (CBEV) ; (c) (CBRH) ; (d) (CBEV + CBRH)

Conclusion :

Nous sommes arrivés à ce chapitre avec une certaine quantité de connaissances de base renforcement des sols mous par des colonnes ballastées. Les différents procédés d'exécution à savoir l'installation des colonnes par voie sèche et l'installation avec injection de l'eau (par voie humide) ont été présentés. Les champs d'application de ce type de renforcement ainsi que leurs diverses utilisations ont été détaillées. et ont De plus, les colonnes ballastées renforcée et les colonnes ballastées supportes sont avérées être une solution idéale pour améliorer les performances de la colonne Surtout en sol meuble. Les colonnes peuvent être recouvertes de formes de sol artificielles, qui sont Les principaux matériaux utilisés pour augmenter la résistance et la stabilité des structures géotechniques.

Il convient, enfin, de dire que le traitement par colonnes ballastées est une technique Très efficace pour améliorer les performances des ouvrages reposants sur les sols mous, il Offre tout simplement une amélioration globale du comportement du sol traité.

PARTIE II :
ETUDE NUMÉRIQUE

**CHAPITRE 4 : MODÉLISATION
NUMÉRIQUE DE COLONNES
BALLASTÉES ENVELOPPÉE
RENFORCÉES DE
GÉOSYNTHÉTIQUES EN COUCHES
HORIZONTALES SUPPORTANT UN
REMBLAI SUR DES SOLS DE
SEBKHAS**

4.1 Introduction :

Dans certains cas, les propriétés du sol ne sont pas adaptées aux structures de support telles que les bâtiments, les ponts et les barrages, en particulier les problèmes liés à la traversée des routes dans les sols de sebkha en plus du comportement des sols de sebkha compressibles qui sont très sensibles au mouillage et ont souvent une diminution significative de la capacité portante lorsque ces sols entrent en contact avec l'eau. En général, nous avons constaté que l'utilisation des colonnes ballastées pour l'amélioration des sols (sebkha) est pratique, économique et facile à mettre en œuvre. Dans le cadre de cette étude, des analyses axisymétriques bidimensionnelles ont été réalisées à l'aide de PLAXIS 2D.

Les colonnes ballastées renforcée avec renfort extérieur et renfort intérieur (CBEH+CBEV) sont l'une des meilleures méthodes d'amélioration de la zone faible, en particulier d'augmenter la stabilité du remblai ; à savoir un renflement très réduit et un règlement raisonnable.

4.2 Présentation du Problème :

Les codes numériques sont maintenant largement utilisés pour l'étude de la stabilité des remblais sur sol compressible traité par des colonnes au matériau granulaire (Han et al.2004). La présente étude s'intéresse à l'étude de la stabilité d'un remblai posé sur un sol compressible traité par des colonnes ballastées entourées par géosynthétiques en appliquant : la méthode numérique deux dimensionnelle avec des colonnes ballastées entourées par des nappes géosynthétiques.

En utilisant le programme de code d'éléments finis PLAXIS 2D pour l'analyse de déformation et de stabilité, un modèle axisymétrique a été réalisé afin de simuler la cellule unitaire. 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 ballastée pour soutenir un grand remblai sur une zone faible (sol de sebkha) a été étudié. Les propriétés du remblai argile molle, des colonnes ballastées peuvent être trouvées dans la littérature (alkhorshid et al 2018). Les colonnes ont été installées dans un maillage carré $s=2.5$ supportant un remblai de 3 m de haut. L'épaisseur du sol argileux 6m et sol marne 14 m et la longueur de la colonne ballastée sont supposées être 20 m. Le rayon de la colonne à l'intérieur 1.4m, taux de remplacement de surface ($Arr=r2c/r2e = 8.16\%$, et une rigidité en traction

Chapitre 4 : Modélisation numérique de colonnes ballastées enveloppée renforcées de géosynthétiques en couches horizontales supportant un remblai sur des sols de sebkhas

géosynthétique $J= 4000 \text{ kn/m}$. les dimensions et les caractéristiques de la zone faible (sol de sebkha) ont été choisies parmi les valeurs données par (benmebarek et al 2015).

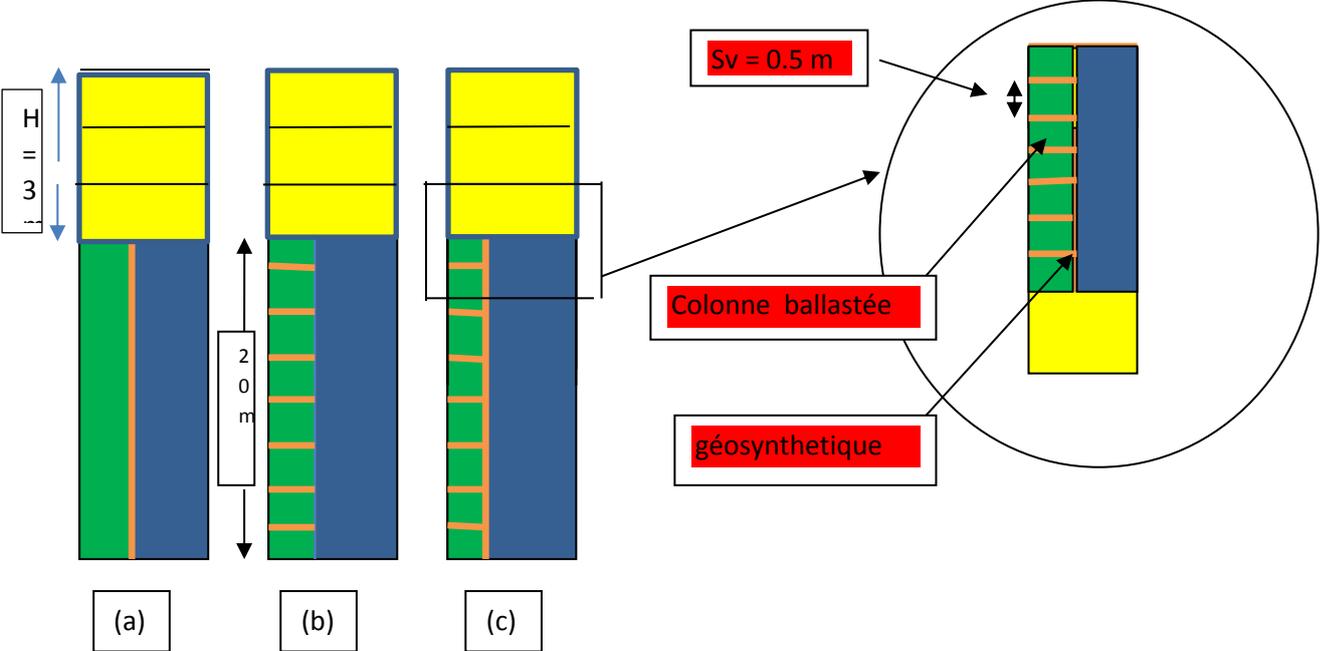


Figure 4.1 : Simulation axisymétrique par éléments finis de la colonne renforcée par géosynthétique dans le concept de cellule unitaire : (a) (CBEV) ; (b) (CBRH) ; (c) (CBEV + CBRH).

Chapitre 4 : Modélisation numérique de colonnes ballastées enveloppée renforcées de géosynthétiques en couches horizontales supportant un remblai sur des sols de sebkhas

Tableau 4.1 : Paramètres des matériaux utilisés dans l'analyse numérique

Matériel Propriétés	Argile vaseuse	Colonne ballastée	Remblais	Marne
Modèle de matériau	SSM	M-C	M-C	SSM
γ_{SAT} (KN/m ³)	16.4	19	20	17
E' (Kpa)	-	45000	30000	-
φ' (°)	15	39	35	17
ψ (°)	0	5	0	0
C' (Kpa)	6	0	1	8
ν'	0.2	0.3	0.3	-
E_{50}^{REF} (Kpa)	-	-	-	-
E_{OED}^{REF} (Kpa)	-	-	-	-
E_{UR}^{REF} (Kpa)	-	-	-	-
Cc	0.35	-	-	0.3
Cs	0.035	-	-	0.03
E	-	-	-	-
m (POWER)	1	-	-	-
P^{REF} (Kpa)	100	-	-	-
K ₀	0.6	0.37	-	-
M	-	-	-	-

4.3 Résultats et discussions

Les analyses numériques ont été menées pour simuler la construction de remblai sur colonne ballastée ordinaire (CBO) et colonne ballastée Enveloppée (CBE), l'amélioration du comportement est déterminée en fonction de la diminution du tassement de la colonne ballastée et de la diminution de la déformation latérale de la colonne ballastée.

4.3.1 Tassement et déformation latérale :

La figure 4.2 montre la variation du tassement en haut de la colonne tracée contre lui La profondeur du remblai, la figure 4.2 (a) montre le déplacement maximal de la colonne sans renforcement (CBO) à une profondeur de 0,31 m, en raison du confinement minimal. La figure 4.2 (b) montre que la grande la déformation à la partie supérieure de la colonne ballastée ordinaire est de 0,045 m. Ceci explique que le sol compressible est l'un des plus gros problèmes avec l'installation de la colonne en raison de la faible résistance au cisaillement. Le manque de support latéral provoque une grande déformation latérale (renflement).

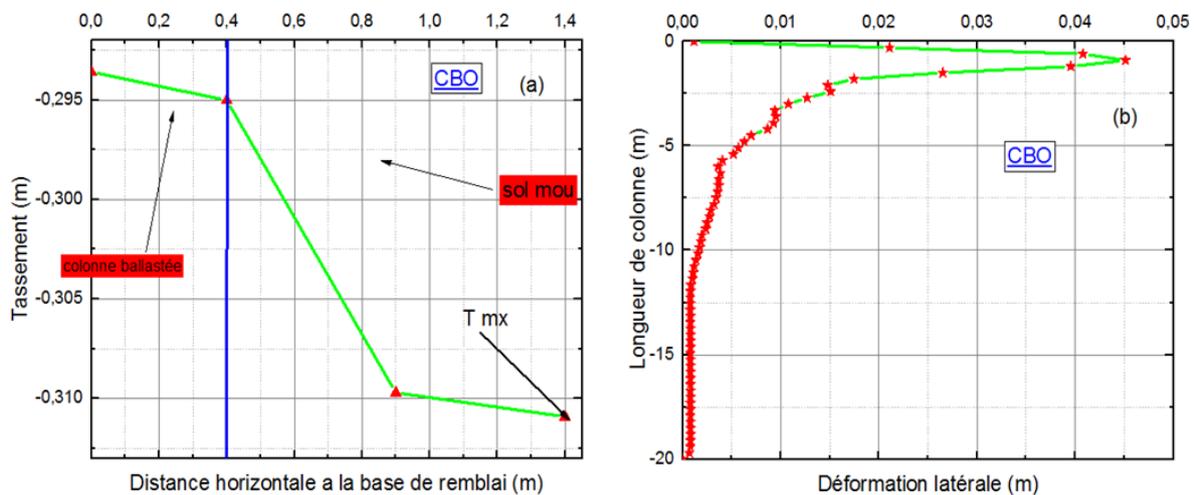


Figure 4.2 : (a) tassement vertical par rapport à la profondeur du remblai ; (b) Déformation latérale (CBO).

La figure 4.3 montre la variation du tassement en haut de la colonne tracée contre lui La profondeur du remblai, la figure 4.3 (a) montre le déplacement maximal de la colonne avec renforcement (CBE) à une profondeur de 0,30 m, a montré moins de renflement. La figure 4.3 (b) montre que la grande la déformation à la partie supérieure de la colonne ballastée enveloppée est de 0,040 m. Le manque de support latéral provoque de grandes déformations latérales (renflement).

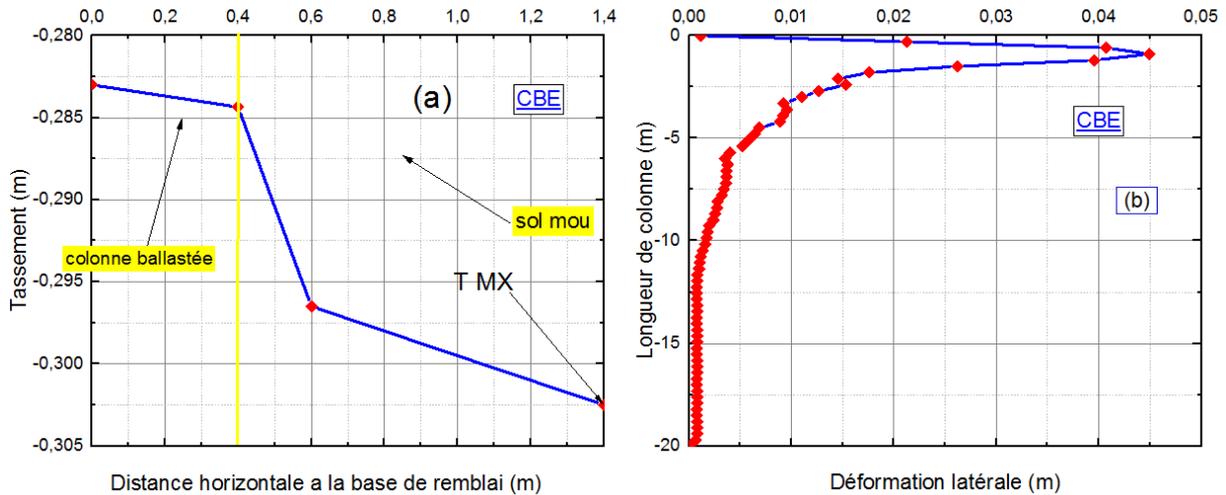


Figure 4.3 : (a) tassement vertical par rapport à la profondeur du remblai ; (b) Déformation latérale (CBE)

4.4 Etude paramétrique :

4.4.1 Effet de l'espacement des bandes de renforcement horizontal :

L'espacement entre les couches horizontales a un effet dominant sur les colonnes ballastées. Les résultats ont montré que l'augmentation de l'espacement des bandes de renfort horizontales augmentent la déformation latérale et réduisent le tassement.

La figure 4.4(a) a montré la déformation latérale de la colonne en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de l'espacement vertical entre l'horizontale bandes de renforcement (S_v) : 0,5 et 1 m, les déformations latérales sont de 0,024 m et 0,015 m, respectivement. L'espacement des bandes de renforcement horizontales peut être réduit en raison de l'absence d'une pression de confinement latérale adéquate, en particulier dans la partie supérieure de la colonne.

La figure 4.4 (b) a montré le tassement vertical distribué en surface sur une distance de l'axe central de la colonne ballastée jusqu'au bord extérieur de la cellule unitaire en fonction des valeurs du vertical espacement entre les bandes de renforcement horizontales. La valeur du tassement à l'espacement vertical de 0,5 m et 1 m est estimée à 0,20 m et 0,26 m, respectivement. Il convient de noter que l'effet de la verticale l'espacement est important pour la stabilité du remblai ; augmentant ainsi l'espacement vertical entre les bandes de renforcement horizontales augmente la charge appliquée au sol compressible.

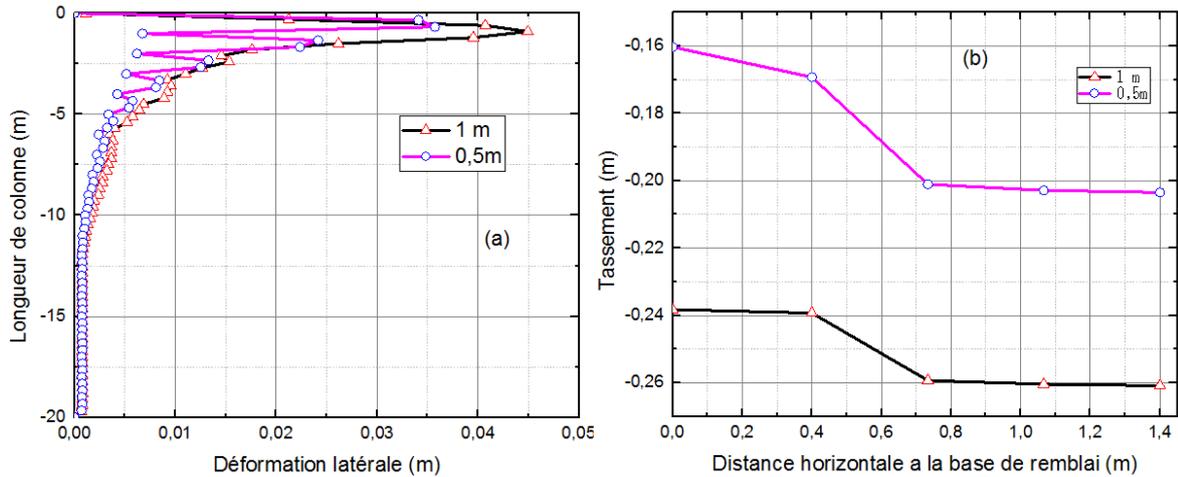


Figure 4.4 : (a) Effet de l'espacement sur les profils de renflement. (b) Tassement de colonne granulaires renforcé.

4.4.2 Effet de CBE :

La figure 4.5 montre la déformation latérale de la colonne en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la longueur de colonne. Les résultats montrent une augmentation de la latérale déformation consécutive à l'augmentation de longueur de colonne. Augmenter longueur de colonne augmente la contrainte verticale au-dessus des colonnes et du sol compressible (sol Sebka). La conséquence est une augmentation de la contrainte horizontale exercée sur colonne ballastée renforcée où pour des longueurs de la colonne de 20 m et 15 m, les déformations latérales sont de 0.045m et 0.31m, respectivement. On peut conclure que, par rapport à une colonne ballastée sans revêtement géotextile (CBE), l'utilisation de (CBE) peut être problématique en raison du manque de pression de confinement latérale adéquate, en particulier dans la partie supérieure de la colonne. Cela sert généralement de motivation principale pour l'utilisation du (CBH).

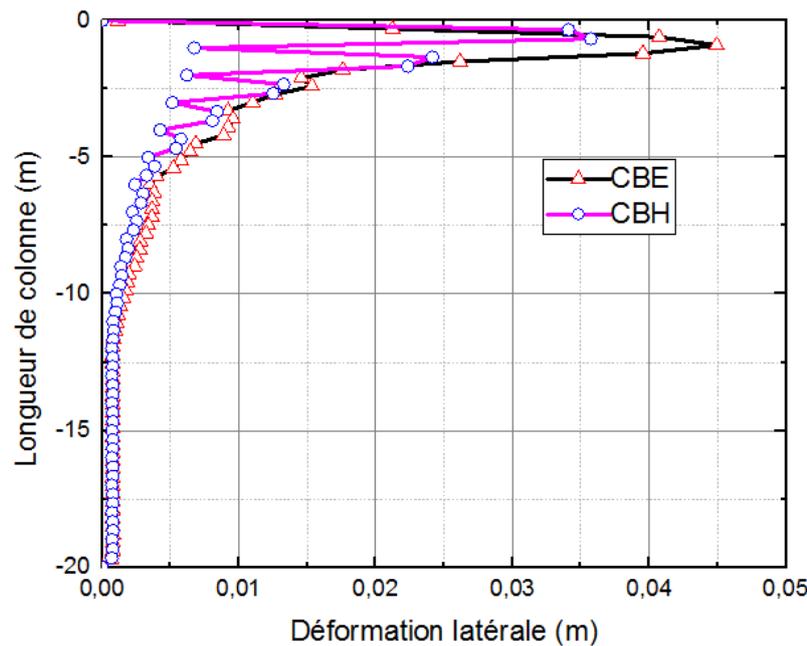


Figure 4.5 : Déformation latérale de la colonne en fonction de la profondeur pour différentes Valeurs de la profondeur de la colonne.

Conclusion

Dans ce chapitre, des calculs numériques ont été effectués pour étudier l'efficacité des effets de la modélisation d'un pont sur un sol lisse amélioré avec un ensemble de colonnes ballastées. Réalisée à l'aide du programme PLAXIS, l'étude porte sur l'évaluation du gonflement maximal de la colonne lors du tassement du remblai.

Sur la base des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- ❖ Il a été démontré que les colonnes ballastées ordinaires étaient inefficaces pour soutenir le remblai en raison du renflement excessif causé par le manque de pression latérale. D'autre part, les colonnes ballastées enveloppées ont montré un meilleur comportement,
- ❖ La réduction de l'espacement entre les couches de renforcement a un bon effet sur les colonnes ballastées car elle réduit les déformations latérales
- ❖ Le traitement du sol compressible par des colonnes ballastées encapsulé par géosynthétique se permet d'augmenter le facteur de sécurité
- ❖ La capacité portante augmente avec l'augmentation le nombre de couches horizontales et la diminution de l'espace entre les couches.

CONCLUSION GENERAL

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail de recherche présenté dans cette thèse s'intéresse pour modéliser un remblai soutenu par des colonnes ballastées sur le sol de sebkha. L'étude porte sur l'évaluation du renflement maximum de colonne ballastée et de l'affaissement du remblai, Renforcement du sol à l'aide de colonnes ballastées c'est une technique alternative et attractive, Le traitement des colonnes ballastées est largement utilisé Pour résoudre les problèmes de stabilité des entreprises sur le sol compressible. Les colonnes ballastées renforcées se sont avérées idéales dans un sol mou, en particulier les colonnes peuvent être recouvertes de formes de géostatistiques.

Des simulations numériques 2D ont été effectuées pour étudier les effets que les colonnes ballastées renforcées avec armature interne appelées enrobage verticale et bandes horizontale qui sont l'une des meilleures méthodes d'amélioration des zones faibles, en particulier pour augmenter la stabilité. Le travail de cette thèse est divisé en deux parties. La première partie a pour objectif de La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique comportant trois chapitres, la première généralité des sols compressibles et d'autre part les méthodes de renforcement de remblai sur sol mou.

Dans la deuxième partie des calculs numériques ont été effectués pour étudier l'efficacité des effets de la modélisation d'un pont sur un sol mou amélioré avec un ensemble de colonnes ballastées. Réalisée à l'aide du programme PLAXIS, l'étude porte sur l'évaluation du renflement maximal de la colonne lors du tassement du remblai.

Sur la base des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Il a été démontré que les colonnes ballastées ordinaires étaient inefficaces pour soutenir le remblai en raison du renflement excessif causé par le manque de pression latérale. D'autre part, les colonnes ballastées enveloppées ont montré un meilleur comportement,
- La réduction de l'espacement entre les couches de renforcement a un bon effet sur les colonnes ballastées car elle réduit les déformations latérales
- Le traitement du sol compressible par des colonnes ballastées encapsulées par Géosynthétique se permet d'augmenter le facteur de sécurité

Conclusion générale

- La capacité portante augmente avec l'augmentation le nombre de couches horizontales et la diminution de l'espace entre les couches.

LES RÉFÉRENCES

Les références

Les références

- ABOSHI, H. "THE" COMPOZER"-A METHOD TO IMPROVE CHARACTERISTICS OF SOFT CLAYS BY IN-CLUSION OF LARGE DIAMETER SAND COLUMNS.". PARIS. (1979).
- GHAZAVI, M., YAMCHI, A. E., & AFSHAR, J. N. (2018). BEARING CAPACITY OF HORIZONTALLY LAYERED GEOSYNTHETIC REINFORCED STONE COLUMNS. GEOTEXTILES AND GEOMEMBRANES, 46(3), 312-318.
- DEBBABI, I. E., REMADNA, M. S., & RASHID, A. S. A. (2021). NUMERICAL MODELING OF HORIZONTALLY LAYERED GEOSYNTHETIC REINFORCED ENCASED STONE COLUMNS SUPPORTING EMBANKMENT ON SABKHA SOIL. PAPER PRESENTED AT THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH IN AFRICA.
- TOUNEKTI, F., BOUASSIDA, M., KLAI, M., & MARZOUGI, I. (2008). ETUDE EXPERIMENTALE EN VUE D'UN MODELE DE COMPORTEMENT POUR LA VASE DE TUNIS. REVUE FRANÇAISE DE GEOTECHNIQUE, (122), 25-36.
- KACEM, M. O. U. S. S. A. (2006). ETUDE D'UNE SEBKHA : LA SEBKHA D'ORAN (OUEST ALGERIEN) (DOCTORAL DISSERTATION, PHD THESIS LPHD THESIS IN EARTH SCIENCES OPTION : SEDIMENTOLOGY, ORAN ALGERIA).
- AL-AMOUDI, O. S. B. (2002). CHARACTERIZATION AND CHEMICAL STABILIZATION OF AL-QURAYYAH SABKHA SOIL. JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING, 14(6), 478-484.
- BERRABAH FOUAD « ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES REMBLAIS RENFORCÉS PAR DES GÉOSYNTHÉTIQUES SUR SOLS MARÉCAGEUX » ANNEE 2010.

Les références

- AKILI, W. (2004, APRIL). FOUNDATIONS OVER SALT-ENCRUSTED FLATS (SABKHA) : PROFILES, PROPERTIES AND DESIGN GUIDELINES. IN PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CASE HISTORIES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, NEW YORK, NY, PAPER (NO. 1.43, P. 19).
- ALNUAIM, A. M., & EL NAGGAR, M. H. (2014). PERFORMANCE OF FOUNDATIONS IN SABKHA SOIL : NUMERICAL INVESTIGATION. GEOTECHNICAL AND GEOLOGICAL ENGINEERING, 32(3), 637-656.
- NEDJMEDDINE, N. E. G. U. E. Z., & ZAKARYA, D. O. U. A. D. I. (2019). EVALUATION GEOSTATISTIQUE DE LA STABILITE D'UN REMBLAI (APPLICATION AU CAS DU REMBLAI DE L'EXTENSION DE L'AERODROME D'AIN ARNAT-WILAYA DE SETIF) (DOCTORAL DISSERTATION, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- RUSSELL, D., NAUGHTON, P. J., & KEMPTON, G. (2003, SEPTEMBER). A NEW DESIGN PROCEDURE FOR PILED EMBANKMENTS. IN PROCEEDINGS OF THE 56TH CANADIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE AND 2003 NAGS CONFERENCE (VOL. 1, PP. 858-865). CGS WINNIPEG, MB.
- [HTTP://FR.SCRIBD.COM/DOC/19173492/ELMENTS-DE-MCANIQUE-DES-SOLS](http://fr.scribd.com/doc/19173492/elements-de-mcanique-des-sols).
- AKOUETE, K. B. (2016). CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES SOLS COMPRESSIBLES DE LA COMMUNE DE COTONOU.
- HOLTZ, R. D. (2001). GEOSYNTHETICS FOR SOIL REINFORCEMENT THE NINTH SPENCER J. BUCHANAN LECTURE BY.
- BENMEBAREK, S., BERRABAH, F., & BENMEBAREK, N. (2015). EFFECT OF GEOSYNTHETIC REINFORCED EMBANKMENT ON LOCALLY WEAK ZONES BY NUMERICAL APPROACH. COMPUTERS AND GEOTECHNICS, 65, 115-125.

Les références

- HAOUAM, S. E., & HASSAINE, S. (2020). ETUDE DU POTENTIEL DE VALORISATION ENERGETIQUE DU BIOGAZ DE LA STATION D'EPURATION BARAKI (DOCTORAL DISSERTATION, DIRECTEUR : MME. FARADJI DJAMILA NEE KHERBOUCHE/CO-DIRECTEUR : MME. GHOMRI AMINA).
- ZAIMA, Y., BOUBEZARI, I., & ARABET, L. E. (2019). ETUDE DU COMPORTEMENT STATIQUE ET DYNAMIQUE D'UN MASSIF EN SOL RENFORCE (DOCTORAL DISSERTATION, UNIVERSITE DE JIJEL).
- COLONNES BALLASTEES » [ARCHIVE], FICHES PATHOLOGIE, SUR WWW.QUALITECONSTRUCTION.COM, AGENCE QUALITE CONSTRUCTION (CONSULTE LE 23 SEPTEMBRE 2014) .
- REMADNA, A. (2019). ETUDE NUMERIQUE DE L'AMELIORATION DES SOLS PAR DES COLONNES BALLASTEES (DOCTORAL DISSERTATION, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER-BISKRA).
- LAOUCHE, M. (2021). COMPORTEMENT DES SOLS RENFORCES PAR COLONNES FLEXIBLES (DOCTORAL DISSERTATION, UNIVERSITE DE BATNA 2).
- NOUI, A. (2019). COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES FONDATIONS SUR SOL COMPRESSIBLE RENFORCE PAR COLONNES BALLASTEES (DOCTORAL DISSERTATION, UNIVERSITE DE BATNA 2).
- AMMAR DHOUIB ; FRANCIS BLONDEAU « LIVRE COLONNES BALLASTEES » 2007
- MALARVIZHI, S. N., ILAMPARUTHI, K. 2004. LOAD VERSUS SETTLEMENT OF CLAYBED STABILIZED WITH STONE AND REINFORCED STONE COLUMN. 3RD ASIAN REG. CONF. ON GEOSYNT. : 322-329.

Les références

- SHARMA, R. S., KUMAR, P., NAGENDRA, G. 2004. COMPRESSIVE LOAD RESPONSE OF GRANULAR PILES REINFORCED WITH GEOGRIDS. CAN. GEOTECH. J. 41 : 187–192
- ALKHORSHID, N. R. (2017). ANALYSIS OF GEOSYNTHETIC ENCASED COLUMNS IN VERY SOFT SOIL. UNIVERSITY OF BRASILIA, DEPARTMENT OF CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING. BRASILIA : PHDTHESIS, 128 P, G.TD-133/17