



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE  
ET POPULAIRE



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

**Université Echahid Hamma Lakhdar -El-Oued**

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

## **MEMOIRE**

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Génie civil**

**Option: Matériaux en génie civil**

THEME

**ETUDE NUMERIQUE DU COMPORTEMENT D'UN  
SABLE RENFORCE PAR GEOSYNTHETIQUE.**

**Dirigé par :**

Farik Ali

**Présenté par :**

Ben Ali Oualid

Bali Youcef

**Promotion 2018/2019**

# Remerciements

*Je remercie en premier mon Dieu pour tout ce qu'il ma donner.  
Je remercie en second mes parents, qui ont sacrifié leur vie pour notre  
bien.*

*Toute ma famille et mes amis qui m'ont soutenu.*

*Je remercie monsieur le professeur Farik Ali pour avoir assuré  
l'encadrement scientifique de ce mémoire. Ses précieuses orientations  
et conseils*

*m'ont permis de mener à bien ce travail.*

*En fin, mes sincères remerciements et gratitude à tous mes  
enseignants.*

*Je remercie également le président et les membres de jury d'avoir  
accepté d'examiner  
mon travail.*

## ملخص

تستخدم الردميات المقواة كحل في العديد من التطبيقات مثل الجدران الاستنادية ، الردميات على التربة القابلة للضغط ، ركائز الجسور والسدود ...

وللجاذبية الفعالة لتقنية تقوية التربة بالجيوسنتييك، فإن هذ البحث سيركز على دراسة سلوك الرمل المدعم بطبقات من الجيوسنتييك. في هذا العمل ، بعد تقديم عرض بيليوغرافي حول التقنيات المختلفة لتقوية التربة و مميزات الجيوسنتييك ، يهتم بالمحاكاة العددية لهبوط واستقرار الردم المعزز بواسطة طبقات من الجيوسنتييك على تربة لينة. تم تنفيذ هذه الدراسة باستخدام برنامج البلاكسيس (Plaxis2D 8.2)، الذي يعتمد على التحليل بطريقة العناصر المحددة.. يركز التحليل على تأثير التعزيز على استقرار و هبوط الردم.

**الكلمات المفتاحية :** جيوسنتييك، النمذجة العددية، الرمل المدعم ، التربة اللينة ، الإسقرار.

# Résumé

Les remblais en sol renforcé sont utilisées en solution pour beaucoup d'applications comme les murs de soutènement, les remblais sur sols compressibles, les culées porteuses, les barrages...

Attiré par les performances du renforcement des sols par géosynthétiques, ce mémoire étudie le comportement des remblais en sable renforcé par des nappes géosynthétique. Dans le présent travail, après la présentation d'une synthèse bibliographique sur les différentes techniques de renforcement du sol et les performances des géosynthétiques, s'intéresse à la simulation numérique du tassement et la stabilité d'un remblai renforcé par des nappes géosynthétiques sur sols compressibles. L'étude numérique est effectuée à l'aide du code de calcul Plaxis2D 8.2 qui est basé sur la méthode des éléments finis. L'analyse vise l'effet de renforcement sur la stabilité et le tassement du remblai.

**Mots clés :** Géosynthétique, modélisation numérique, sable renforcé, sol compressibles, stabilité.

## **ABSTRACT**

Reinforced embankments are used in solution for many applications such as retaining walls, embankments on compressible soils, abutments, dams...

Attracted by performance of the geosynthetic soil reinforcement, this thesis examines the behavior of sand-filled embankment reinforced by geosynthetic layers. In the present work, after the presentation of a bibliographic synthesis on the different techniques of soil reinforcement and the geosynthetic performances, is interested in the numerical simulation of the settlement and the stability of a reinforced embankment by geosynthetic layers on soft ground. The study is performed using the finite element code Plaxis2D 8.2 which is based on the finite element method. The analysis focuses on the reinforcement effect on the stability and settlement of the embankment.

**Key words:** Geosynthetic, numerical modelling, reinforced sand, soft soil, stability.

## Notation

$B$	Largeur du remblai
$C'$	Cohésion effective
$C_c$	Indice de compression
$C_{sg}$	Cohésion de l'interface sol-géosynthétique
$C_s$	Indice de gonflement
$C_u$	Cohésion non drainée
$C_v$	Coefficient de consolidation
$C_\alpha$	Taux de consolidation secondaire
$e$	Indice des vides
$E$	Module d'élasticité
$E_i$	Module d'élasticité de la couche $i$
$E_m$	module d'élasticité moyen
$F$	Coefficient de sécurité
$h$	Hauteur du remblai
$h_i$	Épaisseur de la sous couche $i$
$H$	Épaisseur de la couche compressible
$I$	Coefficient d'influence
$J$	Raideur de la géogrid
$K_h, K_v$	Coefficients de perméabilité horizontale et verticale
$K_a$	Coefficient de poussée
$M_D$	Moment moteur
$M_R$	Moment résistant
$N_c$	Facteur de capacité portante
$P_a$	Résultante des pressions des terres
$q_{ult}$	Capacité portante ultime
$R_{inter}$	Facteur de réduction de la résistance pour les interfaces
$S$	Tassement total
$S_c$	Tassement de consolidation

$S_f$	Tassement de fluage
$S_i$	Tassement instantané
$S_{oed}$	Tassement oedométrique
$S_{lat}$	Tassement dû aux déplacements latéraux
$S_t$	Tassement à l'instant t
$T_g$	Force stabilisante additionnelle de géosynthétique
$T_{ls}$	Résistance au glissement latéral de renforcement
$T_v$	Facteur temps
$t_{100}$	Temps correspondant à la fin de la consolidation primaire
$U$	degré de consolidation
$Z$	Profondeur
$\Delta MR$	Moment résistant additionnel de renforcement
$\Delta u$	Surpression interstitielle
$\Delta \sigma$	Contrainte exercée par le remblai
$\Delta \sigma_m$	Augmentation moyenne de la contrainte verticale dans la couche compressible
$\Delta \sigma_z$	Accroissement de la contrainte verticale à une profondeur Z
$\beta$	Orientation de la force de renforcement par rapport à l'horizontale
$\varphi'$	Angle de frottement effectif
$\varphi_{sg}$	Angle de frottement de l'interface sol-géosynthétique
$\psi$	Angle de dilatance
$\gamma$	Poids volumique
$\gamma_w$	poids volumique de l'eau
$\mu$	Coefficient correcteur de Skempton et Bjerrum
$\nu$	Coefficient de Poisson
$\sigma'_p$	Contrainte de préconsolidation
$\sigma'_{v0}$	Contrainte verticale initiale
$\sigma'_{vf}$	Contrainte effective verticale à mi-couche

## List de figure

Figure (1.1) rampes de pyramides	3
Figure (1.2) : exemple pour la construction du remblai par étapes	5
Figure (1.3) : ruptures circulaires.	5
Figure (1.4) : poinçonnement.	6
Figure (1.5) : surcharge temporaire.	6
Figure (1.6) : renforcement par géotextiles	8
Figure (1.7) : substitution du mauvais sol.	9
Figure (1.8) : drains verticaux.	10
Figure (1.9) : consolidation atmosphérique	11
Figure (1.10) : colonnes ballastées	11
Figure (1.11) : plots ballastés pilonnés	12
Figure (1.12) : injection solide.	13
Figure (1.13): colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet.	14
Figure (1.14) : colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment	15
Figure (1.15): remblai sur inclusions rigides.	16
Figure (1.16): principe de l'électro-osmose.	17
Figure (2.1) : Les géotextiles	20
Figure ( 2.2): Différent types de géogrilles.	20
Figure (2.3): Géofilet	21
Figure (2.4): Géomembrane	21
Figure (2.5) : Géocomposite.	22
Figure (2.6) : Géosynthétique bentonitiques.	22
Figure (2.7) : Les géotuyaux.	23
Figure (2.8) Les géosynthétiques alvéolaires	23
Figure (2.9) Les blocs ou plaques de géomousses	23
Figure (2.10) : l'utilisation des géosynthétiques dans la séparation	24
Figure (2.11) : pose des géogrilles de séparation.	24
Figure (2.12) : l'utilisation des géosynthétiques dans le renforcement.	25
Figure (2.13): Pose des géotextiles de renforcement.	25
Figure (2.14) V: Utilisation contre l'érosion	25

Figure (2.15): L'utilisation des géosynthétiques dans la filtration	26
Figure (2.16) :Utilisation pour filtration.	26
Figure (2.17) : Géosynthétiques en drainage	27
Figure (2.18) : Utilisation des géotextiles pour le drainage	28
Figure (2.19.a): Mécanisme de mise en tension des treillis et géogrilles durant le compactage.	28
Figure (2.19.b): Utilisation du géogrille dans le renforcement.	29
Figure (2.20) : Mécanismes typiques de dégradation des routes non revêtues et non renforcées sur les sols mous.	29
Figure (2.21): Apport des géosynthétiques sur le comportement des routes non revêtues.	30
Figure (2.22) : Diagramme typique de conception	30
Figure (2.23) : construction d'une route non revêtue sur une argile organique molle	31
Figure (2.24): La fonction de renforcement.	32
Figure (2.25):variation de la capacité portante après utilisation de géosynthétique (das, 1988).	33
Figure (2.26): Renforcement des pentes par géosynthétiques	33
Figure ( 2.27):Utilisation des nappes de géosynthétiques pour le renforcement des murs de soutènement.	33
Figure (2.28) : Rôle des géosynthétiques pour stabiliser les remblais selon différents modes de rupture.	34
Figure( 3.1): Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique	40
Figure (3.2) : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.	41
Figure (3.3): Fenêtre des paramètres du Hardening Soil Model.	42
Figure (3.4) : Fenêtre des paramètres avancés du Hardening Soil Model.	43
Figure ( 4.1 ) : Renforcement nécessaire pour assurer la stabilité au glissement circulaire : (a) modèle de rupture rotationnelle; (b) modèle de rupture rotationnelle pour le cas où le renforcement n'augmente pas la résistance du sol	47
Figure (4.2) : Renforcement nécessaire pour assurer la stabilité au glissement latéral [12] : (a) glissement du remblai au-dessus de renforcement ; (b) rupture de renforcement et glissement du remblai sur le sol de fondation	48
Figure (4.3) : Notation et abaque de Giroud [14] pour le calcul du tassement élastique	50

immédiat ( $\nu = 0.5$ )	
Figure (4.4) : Abaque d'Osterberg [15] pour le calcul du coefficient d'influence sous une charge en forme de demi-remblai	52
Figure (4.5) : Notations utilisées dans l'abaque et la formule d'Osterberg .	52
Figure (4.6) : Tassement secondaire. Méthode de Buisman-Koppejan	54
Figure (4.7): Méthode de calcul du tassement dû aux déplacements latéraux[17]	55
Figure (4.8) : (a) Situation du projet(b) Division du Chott en deux bassins	55
Figure (4.9) : Renforcement et protection du remblai	56
Figure (4.10) : Pose de nappe de géotextile directement sur le sol de sebkha : (a) état sec ; (b) état inondé	56
Figure (4.11): (a) Illustration de la surface plane avant la pose de géogrille (b) Mise en place de nappe de géogrille	56
Figure (4.12): Géométrie du problème pour le sol non renforcé	57
Figure (4.13) : Géométrie du problème pour le sol renforcé.	57
Figure (4.14) : Maillage et conditions aux limites du remblai renforcé sur sol mou	59
Figure (4.15): Initialisation des contraintes initiales avec la procédure K0.	59
Figure (4.16) : Choix de $K_0$ .	60
Figure (4.17) : Valeurs des contraintes initiales.	60
Figure (4.18) Menu général de calcul.	61
Figure (4.19) : Valeurs de déplacement imposé.	62
Figure (4.20) : Fenêtre d'évolution de calcul.	62
Figure (4.21) : Vecteurs de déplacement (même échelle) après la construction du remblai : (a) remblai non renforcé ; (b) remblai renforcé	63
Figure (4.22) : Comparaison entre le coefficient de sécurité d'un remblai non renforcé et renforcé	64
Figure (4.23): Effet du nombre des nappes de géogrilles sur l'amélioration de la stabilité du remblai	
Figure (4.24): Effet de l'espacement entre les couches des sur le coefficient de sécurité d'un remblai	65
Figure (4.25): Effet de l'angle de frottement du sable $\phi$ sur l'amélioration de la stabilité du remblai	

## List de tableaux

Tableaux (3.1) : SSM Valeurs des paramètres de compressibilité et de gonflement $\lambda$ et $k$	44
Tableau (4.1) : Paramètres du modèle de Mohr-Coulomb utilisés dans l'analyse par éléments finis	58

## Table des matières

Remerciements	i
ملخص	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Notations	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	x
Sommaire	xi
<b>Introduction général</b>	1
<b>Chapitre 1 : Différent technique de renforcement de sol.</b>	2
1. Historique sur le renforcement des sols	3
2. Les techniques de construction	4
2.1. Dispositions constructives relatives au remblai	4
2.1.1 Construction par étapes	4
2.1.2- Banquettes latérales	5
2.1. 3- Surcharge temporaire	6
2.1.4- Remblais allégés	7
2.1.5 Renforcement par géotextiles	7
2.2- Modifications du sol supportant le remblai	8
2.2.1 - Substitution du mauvais sol	8
2.2.2 - Drains verticaux	9
2.2.3 - Consolidation atmosphérique	10
2.2.4 - Colonnes ballastées	11
2.2.5 - Plots ballastés pilonnés	12
2.2.6 - Injection solide	13
2.2.7 - Colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet «jet grouting »	14
2.2.8 - Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment	15
2.2.9 - Remblai sur inclusions rigides	15
2.2.10 - Electro-osmose	16
3. Conclusion	17
<b>Chapitre 2 : Renforcement des sols par géosynthétiques</b>	18
1. Introduction	19

2. Définitions des géosynthétiques	19
3. Classifications des géosynthétiques	20
3.1. Les géotextiles	20
3.2. Les geogrilles	20
3.3. Les géofilets	21
3.4. Les géomembranes	21
3.5 Les géocomposites	21
3.6. Les géosynthétiques bentonitiques	22
3.7. Les géotuyaux	22
3.8. Les géosynthétiques alvéolaires	23
3.9 Les blocs ou plaques de géomousses	23
4. Les fonctions des géosynthétiques	24
4.1 Séparation	24
4.2 renforcement	24
4.3 Contrôle de l'érosion	25
4.4 Filtration	26
4.5 Drainage	26
4.6 Confinement des (barrières aux) fluides/gaz	27
4.7 Principe de renforcement de géogrilles	28
4.8 Géosynthétiques dans les routes non revêtues	29
5. Les principaux domaines d'application de géosynthétique	31
5.1 Le renforcement	31
5.2. Les routes et les chemins de fer	32
5.3. Les fondations	32
5.4. Autres application	33
6. Avantage de l'utilisation de géosynthétique pour le renforcement	34
7. Conclusion	34
<b>Chapitre 3 : Présentation l'outil numérique. Plaxis 8.02</b>	<b>35</b>
1. Introduction	36
2. Bref historique	36
3. Concepts de base	36
4. Calculs par la MEF	37
5. Présentation de PLAXIS	38

5.1.Le code éléments finis PLAXIS	38
5.2.Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS	39
5.2.1. Comportement élastoplastique	40
5.2.2.Modèle de Mohr-Coulomb	41
5.2.3 Modèle de sol avec écrouissage (Hardening Soil Model)	41
5.2.4 Modèle pour sols mous (Soft Soil Model)	43
6. Conclusion	44
<b>Chapitre 4: Etude numérique d'un sable renforcé par géosynthétique sur sol compressible</b>	45
1. Introduction	46
2. Méthodes de calcul de la stabilité d'un remblai renforcé par géosynthétiques	46
2.1. Stabilité au poinçonnement	46
2.2.La méthode de cercle de glissement	46
2.2.1.Stabilité au glissement latéral	47
2.3. Étude des tassements d'un remblai sur sol compressible	49
2.3.1. Décomposition du tassement en quatre termes	49
2.3.2. Calcul du tassement instantané	49
2.3.3. Calcul du tassement de consolidation	50
2.3.3.1. Amplitude des déformations	51
2.3.4. Calcul du tassement de fluage	53
2.3.5. Calcul du tassement dû aux déplacements latéraux	54
3. Cas d'un ouvrage réalisé en Algérie (Remblai routier traversant la sebkha du Chott El Hodna)	55
4.Procédure de la simulation numérique	56
4.1. Les caractéristiques générales du modèle	58
4.1.1. Matériaux constitutifs	58
4.2.Géométrie	58
4.2.1 Conditions aux limites	58
4.2.2 Conditions en déplacement	59
4.2.3.Génération de Maillage	59
4.3. Conditions initiales	59
4.4. Calculs	60
5. Résultats de l'étude	62

5.1. Effet du renforcement sur le tassement absolu	62
5.2. Effet du renforcement sur la stabilité du remblai	63
6. Etude paramétrique	64
6.1. Effet de nombre des nappes de géogrilles	64
6.2. Effet de la variation de l'espace entre les nappes de géogrilles	65
6.3. Effet de la variation de l'angle de frottement du sable	66
7. Conclusion	66
<b>Conclusion</b>	68
<b>Références bibliographiques</b>	69

## Introduction général

Différentes techniques de renforcement des sols existent depuis plusieurs années. Ces techniques consistent à incorporer des éléments de renforcement dans le but d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols.

L'amélioration de ces caractéristiques peut être obtenue, soit par des procédés physico-chimiques, technique qui consiste à traiter les sols par l'ajout des liants comme par exemple la chaux et le ciment, soit par association à la terre de matériaux possédant de meilleures caractéristiques intrinsèques.

Dans le but de quantifier l'apport des renforcements, en termes de caractéristiques intrinsèques d'un sol, nous avons, dans notre travail, simulation numérique de sable renforcé par des lits géosynthétiques en faisant varier le nombre et l'espacement entre les nappes.

Ainsi, ce mémoire comprend quatre parties :

**Le premier chapitre** est consacré à une synthèse sur les différentes techniques de renforcement de sol. Il sera présenté dans ce chapitre : Description et principe de fonctionnement ; Domaine d'application ; l'avantage et l'inconvénient.

**Le deuxième chapitre** nous présenterons renforcement des sols par géosynthétiques.

Il sera présenté dans ce chapitre : définitions des géosynthétiques ; classifications des géosynthétiques ; les fonctions des géosynthétiques ; les principaux domaines d'application de géosynthétique ; avantage de l'utilisation de géosynthétique pour le renforcement

**Le troisième chapitre** nous présenterons les lois de comportement utilisées dans ce mémoire ainsi que le code PLAXIS

**Le quatrième chapitre** représente la simulation numérique d'un remblai en sable renforcé

Il sera présenté dans ce chapitre méthodes de calcul de la stabilité d'un remblai renforcé par géosynthétiques ; étude des tassements de la stabilité d'un remblai sur sol compressible.

# Chapitre 1 :

Différent technique de  
renforcement de sol.

## 1. Historique sur le renforcement des sols

Le renforcement des sols par inclusion est connu depuis l'ancien Égypte, les bâtisseurs des grandes pyramides utilisaient des rampes en remblais de 20 mètres de hauteur, renforcées par des lits de roseaux et des poutres en bois de palmier. La figure 1.1 montre le principe du renforcement dans une rampe d'après les bâtisseurs des pyramides

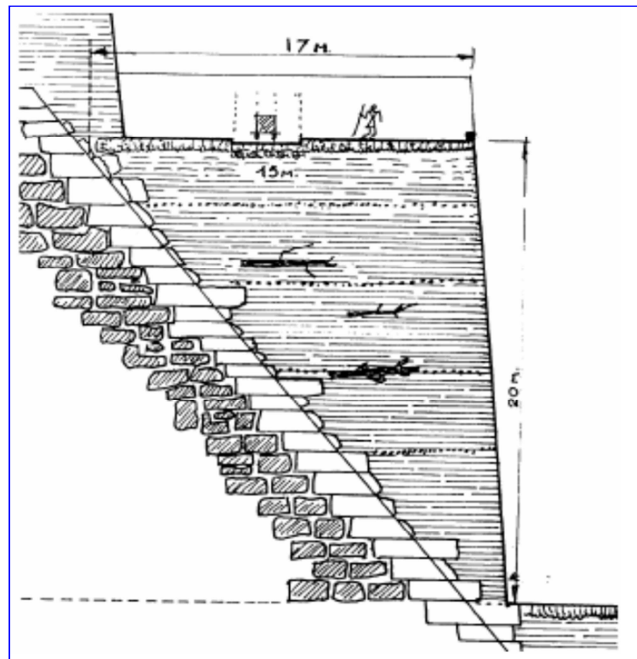


Figure (1.1) rampes de pyramides

(D'après les bâtisseurs des grandes pyramides, g.goyon, pygmalion, 1990).

Au début de 20ème siècle, la technique de renforcement des sols a été développée, dont les inclusions de poutre, tirants, ancrés en bois ou en métal et grillage ont été employés.

Depuis 1965, cette technique a été le sujet de nombreuses évolutions en France, les efforts se sont concentrés sur le développement et l'optimisation des éléments de renforcements dans les diverses formes et matériaux. En effet plusieurs travaux de recherches expérimentales et théoriques ont été entrepris dans les laboratoires et les universités pour atteindre une meilleure compréhension de la conduite de la terre armée.

En 1966, au cours d'une conférence, l'inventeur de la terre armée Henri Vidal, a présenté pour la première fois ce nouveau matériau, devant la Comité Française de Mécanique des sols. [1]

## **2. Les techniques de construction :**

Les techniques classiquement utilisées pour la construction des remblais sur sols compressibles pouvant être accompagnées de techniques de traitements des sols, il convient d'étudier les principes constructifs suivant deux aspects (**j.p magnan, 2000**) : [2]

- dispositions constructives relatives au remblai ;
- modifications du sol supportant le remblai.

### **2.1. Dispositions constructives relatives au remblai :**

Les techniques les plus utilisées sont citées comme suit :

- construction par étapes,
- banquettes latérales,
- surcharge temporaire,
- remblais allégés,
- renforcement par géotextiles.

Les détails de ces techniques sont expliqués ci-après :

#### **2.1.1 Construction par étapes :**

##### **▪Description et principe de fonctionnement :**

la résistance du sol augmente avec le niveau des contraintes effectives. La construction par étapes permet d'exploiter cette propriété pour des sols qui ne peuvent supporter dans leur état naturel la totalité de la charge prévue : le remblai est construit par couches ; l'épaisseur de la couche suivante est déterminée par un calcul de stabilité en fonction de la résistance du sol acquise par consolidation à la fin de l'étape précédente. (figure 1.2). Sous chaque charge on atteint la fin (ou souvent 80%) de la consolidation. Cette méthode nécessite des délais importants si le sol compressible est épais et peu perméable. Elle est souvent associée à des drains verticaux.

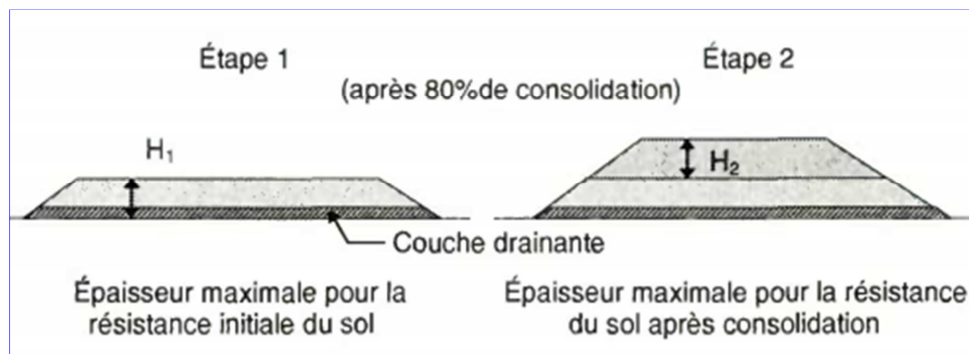


Figure (1.2) : exemple pour la construction du remblai par étapes

### ▪ Domaines d'applications :

Cette technique est utilisée pour tous types de remblais sur sols argileux mous quand le projet définitif est fixé longtemps avant le début de l'exploitation.

### ▪ Avantages et inconvénients :

- technique économique mais demandant du temps et un contrôle précis des vitesses de consolidation.
- technique adaptée aux sols dont la consolidation est rapide (faible épaisseur).
- doit être combinée à des drains verticaux si la consolidation du matériau est lente.
- délais de réalisation importants

### 2.1.2- Banquettes latérales :

#### ▪ Description et principe de fonctionnement :

Cette technique améliore la stabilité du remblai en l'élargissant par des banquettes de plus faible hauteur ces banquettes servent de contrepoids vis à vis de ruptures circulaires (figure 1.3) et améliorent également la stabilité au poinçonnement (figure 1.4).

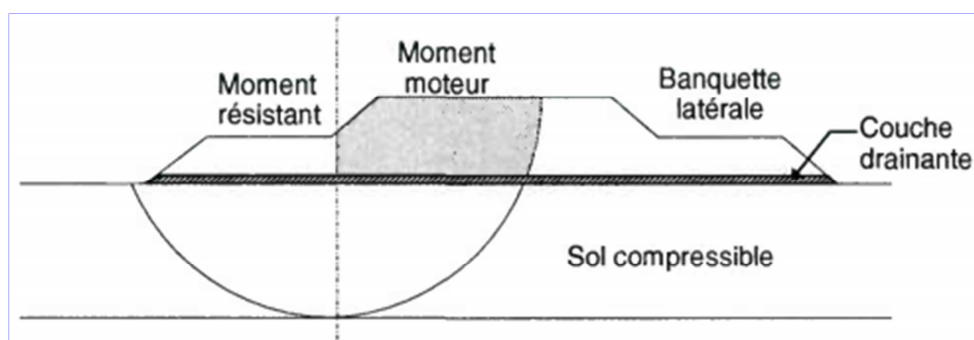


Figure (1.3) : ruptures circulaires.

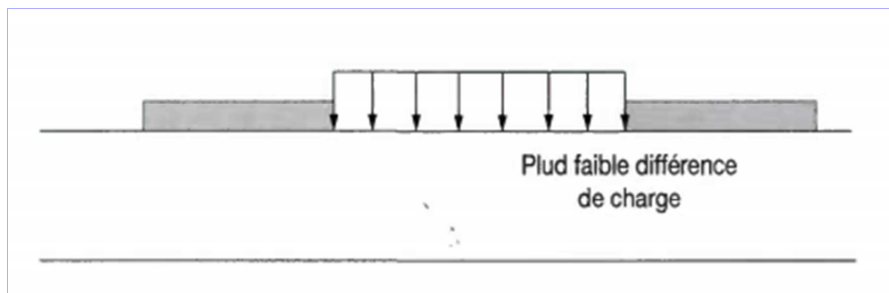


Figure (1.4) : poinçonnement.

▪**Domaine d'application :**

Sections courantes de remblais et remblais d'accès aux ouvrages d'art. Souvent combinées à d'autres techniques (drains verticaux, construction par étapes, surcharge temporaire).

▪**Avantages et inconvénients :**

Nécessite des emprises et volumes de remblais supplémentaires.

Pas d'effets directs sur les tassements.

**2.1. 3- Surcharge temporaire :**

▪**Description et principe de fonctionnement :**

L'application d'une surcharge temporaire permet de diminuer le tassement postérieur à la mise en service du remblai, mais au détriment de sa stabilité pendant la construction. En augmentant la charge appliquée au sol, on crée un tassement final plus important, dont 60 ou 80% peuvent représenter le tassement total du remblai à construire. Le temps nécessaire pour atteindre la déformation finale du sol sous le remblai est donc réduit.

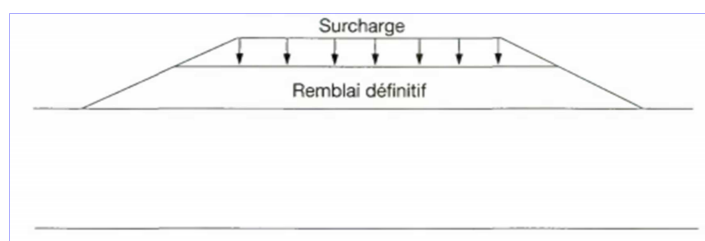


Figure (1.5) : surcharge temporaire.

▪**Domaine d'application :**

traitement des problèmes de tassement après la mise en service du remblai.

Souvent associé à des drains verticaux

**▪Avantages et inconvénients :**

coût des matériaux variables.

Durée comprise souvent entre quelques mois et un an.

**2.1.4- Remblais allégés :****▪Description et principe de fonctionnement :**

la réduction du poids du remblai permet de diminuer les tassements et d'améliorer la stabilité.

Les matériaux légers utilisables en remblai sont très variés :

- les buses, cadres et dalots,
- le polystyrène expansé et les matériaux alvéolaires.
- les blocs constitués de déchets agglomérés de matières plastiques (plastbioc),
- les schistes ou l'argile expansée.
- les pneus usagés (pneusol, pneurésil, etc.),
- le béton cellulaire léger,
- le bois (écorce, sciure),
- les cendres volantes et le laitier.

Le choix des matériaux est lié à l'allègement désiré, qui dépend de l'analyse géotechnique du site.

**▪Domaine d'application :**

Traitement localisé de problèmes de stabilité et/ou de tassements :

- remblai d'accès à un pont déjà construit,
- élargissement d'une route,
- réparation d'un glissement de terrain,
- limitation du poids du remblai sur une buse ou un ouvrage enterré.

**▪Avantages et inconvénients :**

certains procédés sont onéreux.

La mise en œuvre peut être très rapide.

**2.1.5 Renforcement par géotextiles :****▪Description et principe de fonctionnement :**

La mise en place d'une ou plusieurs nappes de géotextiles ou de géotextiles à la base du remblai permet d'augmenter sa résistance à la traction et d'améliorer sa stabilité vis-à-vis de ruptures circulaires. On peut donc augmenter la hauteur de remblai mise en œuvre à chaque phase de chargement, sous réserve des conditions de poinçonnement du sol. Le géotextile a

---

pour effet annexe de rendre plus uniformes les tassements du sol sous le remblai (figure 1.6). Le choix du géotextile et les calculs de dimensionnement (résistance, ancrage latéral, stabilité du remblai) doivent être confiés à un spécialiste.

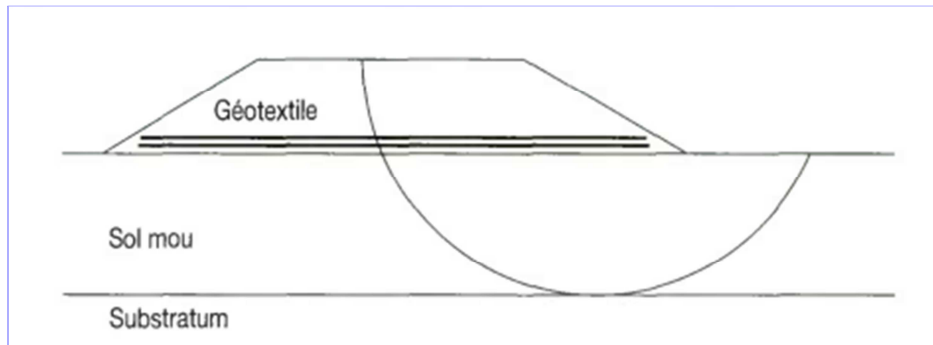


Figure (1.6) : renforcement par géotextiles

▪ **Domaine d'application :**

Traitement localisé de l'instabilité du remblai.

▪ **Avantages et inconvénients :**

- Optimisation délicate du renforcement.
- Amélioration de la résistance à la rupture circulaire, mais pas au poinçonnement.

## 2.2- Modifications du sol supportant le remblai :

### 2.2.1 - Substitution du mauvais sol :

▪ **Description et principe de fonctionnement :**

La substitution consiste simplement à excaver le mauvais sol et à le remplacer par de bons matériaux d'apport compactés. Elle est plus difficile à mettre en œuvre sous l'eau (cas fréquent dans les tourbes) et est limitée en pratique à des profondeurs de quelques mètres. D'autre part, elle est contraignante vis-à-vis de l'environnement (nécessité de trouver des emprunts et des lieux de dépôt).

Le remplacement de tout ou partie du sol compressible par un matériau plus résistant et moins déformable élimine tout ou partie des problèmes de tassement et de stabilité. (figure 1.7)

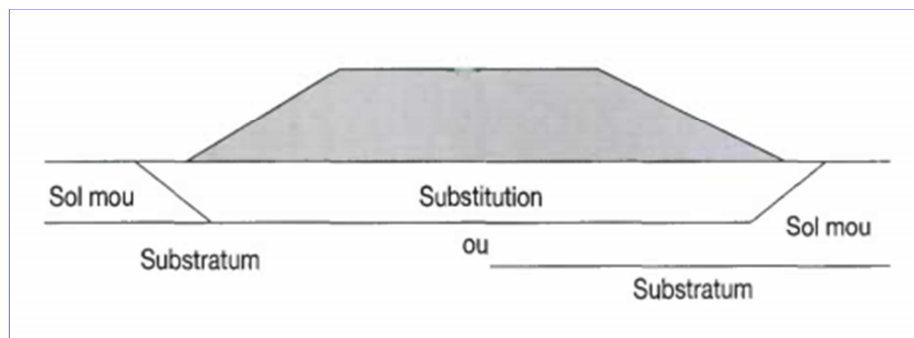


Figure (1.7) : substitution du mauvais sol.

▪**Domaine d'application:**

Sites où une couche proche de la surface est responsable d'une part importante des tassements et de l'instabilité. Le domaine privilégié d'application de cette technique dans le domaine routier est la présence en surface de sols organiques dont les déformations de fluage sont importantes et néfastes au niveau de la chaussée.

▪**Avantages et inconvénients :**

-Procédé efficace mais coûteux (volumes importants de sols à évacuer et de bons matériaux à apporter).

-Nécessité de trouver un emprunt et un lieu de dépôt

**2.2.2 - Drains verticaux :**

▪**Description et principe de fonctionnement :**

Cette technique est utilisée pour accélérer les tassements de consolidation des sols fins saturés de faible perméabilité. La durée de la consolidation des sols est proportionnelle au carré de la distance de drainage. L'introduction de colonnes verticales drainantes dans un massif de forte épaisseur permet de raccourcir fortement cette distance de drainage et de contrôler ainsi les vitesses de consolidation. Les drains verticaux ont été initialement exécutés en sable. Les drains plats préfabriqués sont en général moins onéreux actuellement. L'eau sortant des drains doit être évacuée sous le remblai (couche drainante). Cette technique n'a d'effet que sur la vitesse de tassement. (figure 1.8)

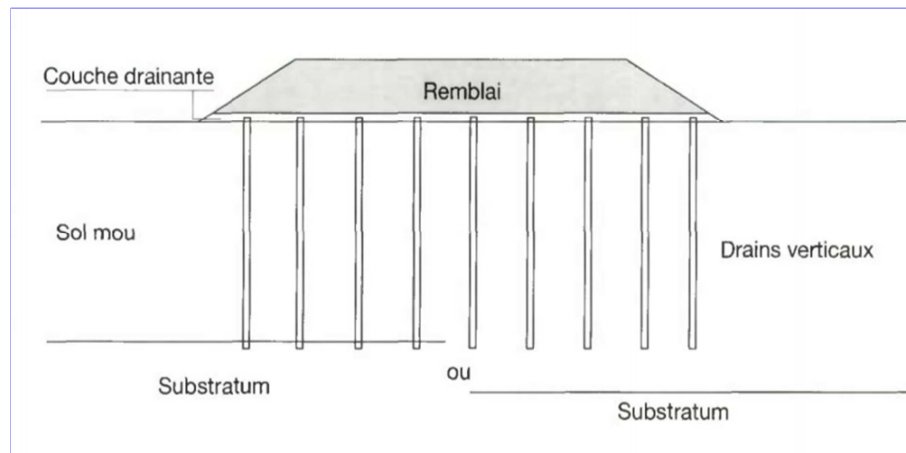


Figure (1.8) : drains verticaux.

▪**Domaine d'application :**

Couches d'argile ou de limons compressibles de 3 à 50 m de profondeur. Pour les sols organiques, le fluage doit être pris en compte spécifiquement dans les études de faisabilité. Les drains verticaux sont souvent associés à des surcharges provisoires. Ils sont en pratique toujours considérés comme indispensables à la consolidation atmosphérique.

▪**Avantages et inconvénients :**

Les drains doivent être mis en place par une entreprise spécialisée.

**2.2.3 - Consolidation atmosphérique :**

▪**Description et principe de fonctionnement :**

Un vide partiel est appliqué par pompage sous une membrane posée à la surface du sol. Les pompes sont connectées à un réseau de drainage horizontal et à un réseau de drains verticaux. La réduction progressive de la pression interstitielle à contrainte totale constante augmente les contraintes effectives dans le sol. Ce chargement est équivalent à 4 mètres de remblai, au maximum. On réduit ainsi les délais de consolidation sans risque d'instabilité du sol sous la charge appliquée. (figure 1.9)

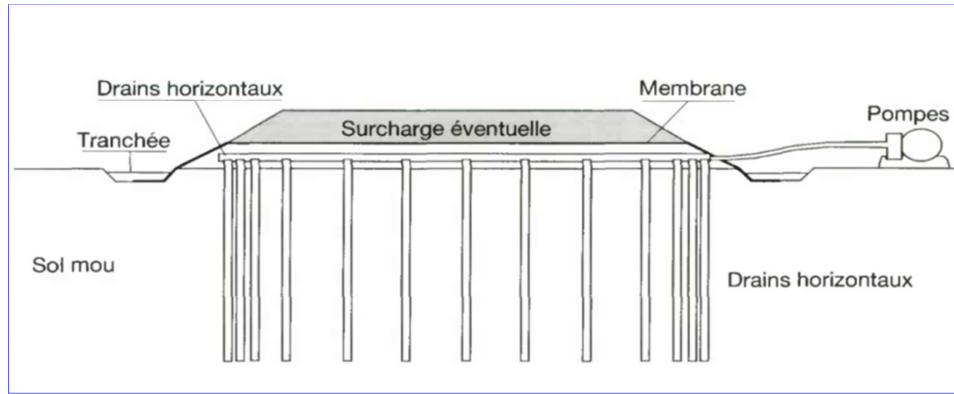


Figure (1.9) : consolidation atmosphérique

▪**Domaine d'application :**

Traitement localisé dans des zones de sols très mous interdisant le chargement par remblai. Peut-être combiné à un chargement classique par remblai.

▪**Avantages et inconvénients :**

- Pas de risque d'instabilité sous le seul chargement atmosphérique.
- Peut être combiné à un chargement par remblai.
- Charge limitée à 80 kpa.
- Adaptable aux propriétés des sols sur le site (densité du maillage de drains verticaux).

**2.2.4 - Colonnes ballastées :**

▪**Description et principe de fonctionnement :**

Un réseau de colonnes de ballast compacté est constitué dans le sol au moyen d'une aiguille vibrante ou d'un tube battu pilonné. Ces colonnes n'agissent comme points de renforcement du sol mou. Elles améliorent la stabilité et diminuent les tassements en reportant une partie de la charge sur le substratum. Elles servent aussi de drains verticaux. (figure 1.10).

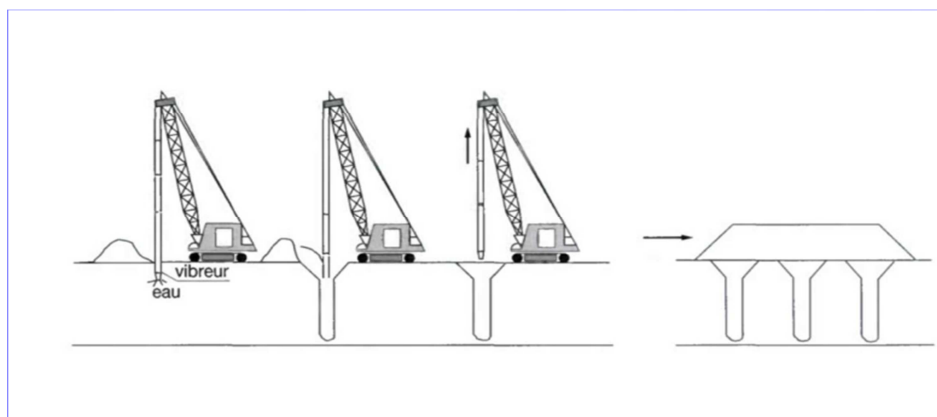


Figure (1.10) : colonnes ballastées

▪**Domaine d'application :**

Fondations de bâtiments et de réservoirs.

Zones de transition entre points durs (ouvrages fondés sur pieux) et sections courantes de remblai.

▪**Avantages et inconvénients :**

-Profondeur de traitement limitée à 15 mètres environ.

-Technique assez onéreuse (ballast et exécution).

**2.2.5 - Plots ballastés pilonnés :**

▪**Description et principe de fonctionnement :**

La création de larges inclusions de bon matériau compacté à travers la couche molle permet de limiter les tassements et d'améliorer la stabilité. Les colonnes servent aussi de drains. Ces colonnes sont créées par pilonnage. (figure 1.11)

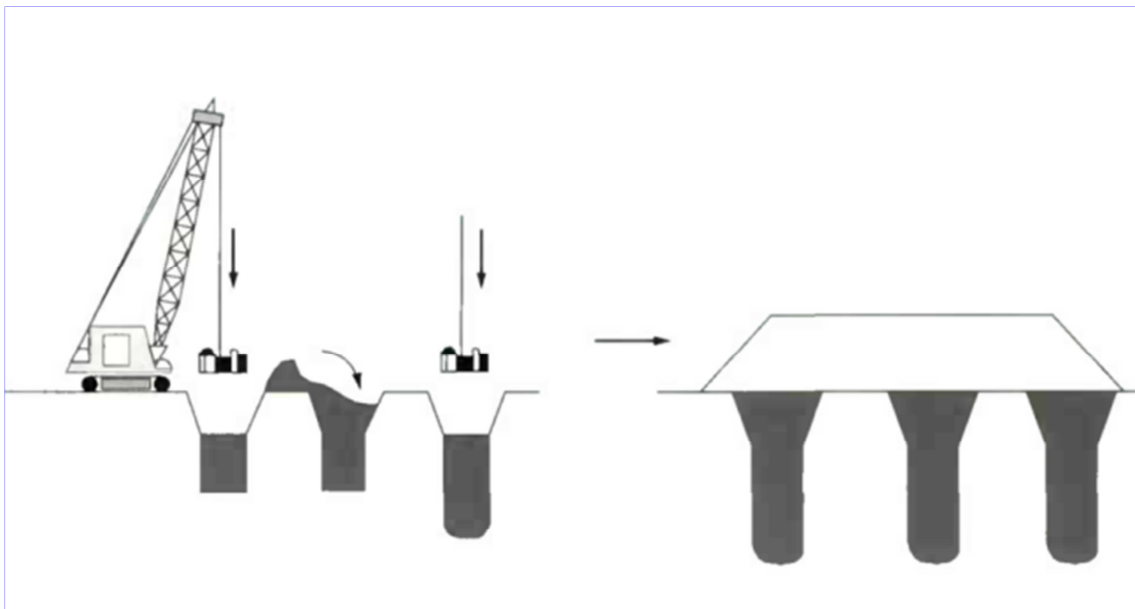


Figure (1.11) : plots ballastés pilonnés

▪**Domaine d'application :**

Remblais en environnement dégagé, sur des sols mous de 6 à 7 m de profondeur.

▪**Avantages et inconvénients :**

- Méthode économique sur des surfaces importantes seulement (coût de mobilisation du matériel).

-Nécessite un environnement peu sensible aux vibrations.

-Profondeur de traitement limitée à 6 ou 7 mètres.

-Emploi possible d'un matériau de récupération : matériaux de démolition triés, découverte de carrière, etc.

### 2.2.6 - Injection solide :

#### ▪Description et principe de fonctionnement :

Le procédé consiste à introduire en force dans le sol, par injection sous pression dans un forage tube de petit diamètre, un mortier très visqueux. Par sa consistance, ce mortier ne peut imprégner le sol ni claquer le terrain. Le sol va donc être refoulé et comprimé latéralement. La prise du mortier crée ensuite des colonnes verticales plus rigides. On combine donc un effet de renforcement au droit de chaque colonne avec une compression de la masse du sol. Les taux d'incorporation ne dépassent en général pas 5 à 6% du volume traité (figure 1.12).

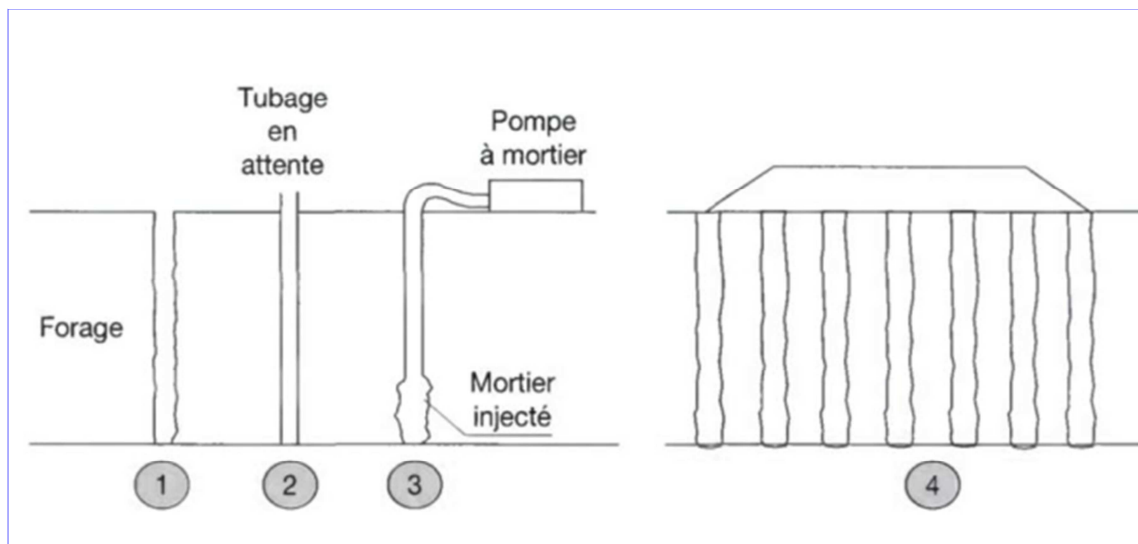


Figure (1.12) : injection solide.

#### ▪Domaine d'application :

Renforcement des sols sous les bâtiments et les ouvrages.

Traitement localisé sous les remblais linéaires.

#### ▪Avantages et inconvénients :

Technique onéreuse pour les remblais.

Entreprise spécialisée.

### 2.2.7 - Colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet «jet grouting» :

#### ▪Description et principe de fonctionnement :

Ce procédé utilise un jet de fluide à haute pression pour déstructurer le terrain et le mélanger à un coulis de ciment. La prise du ciment dans le sol injecté crée des colonnes de mortier sol-ciment à fortes caractéristiques mécaniques. Ces colonnes reportent en profondeur une partie des charges dues au remblai, ce qui améliore la stabilité et diminue le tassement final. (figure 1.13).

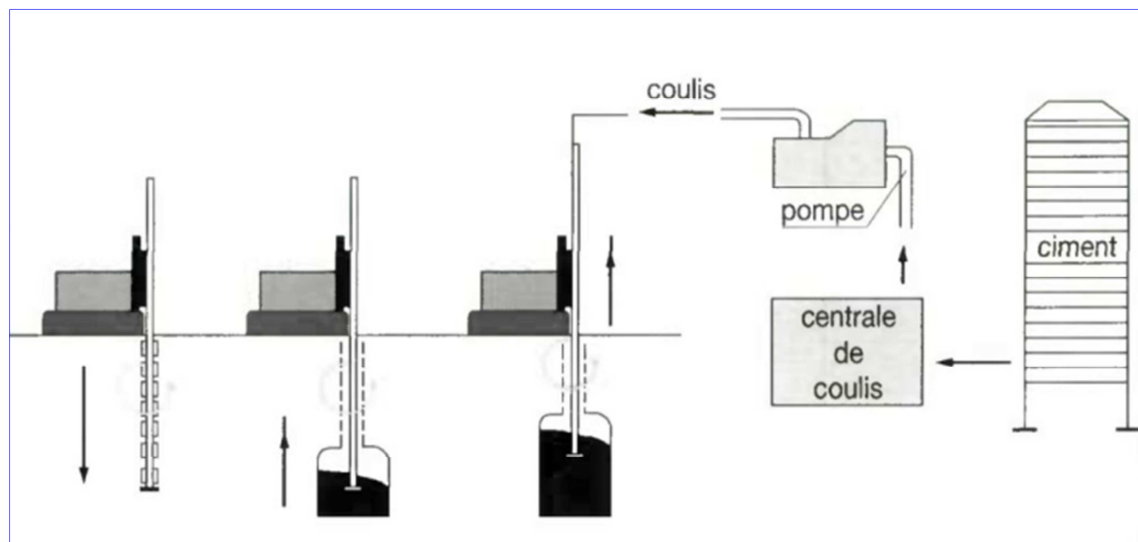


Figure (1.13): colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet.

#### ▪Domaine d'application :

Sols compressibles de toutes granulométries.

Toutefois, emploi limité par le coût.

#### ▪Avantages et inconvénients :

- Technique onéreuse et de mise en œuvre délicate.
- Entreprise spécialisée.

### 2.2.8 - Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment :

#### ▪Description et principe de fonctionnement:

Cette technique, applicable aux argiles molles peu consistantes (cohésion de l'ordre de 10 à 20 kpa), consiste à mélanger le sol en place avec de la chaux vive ou du ciment au moyen d'une machine de forage à tarière adaptée. On obtient ainsi des colonnes dont la résistance permet d'améliorer la stabilité et de réduire les tassements (figure 1.14).

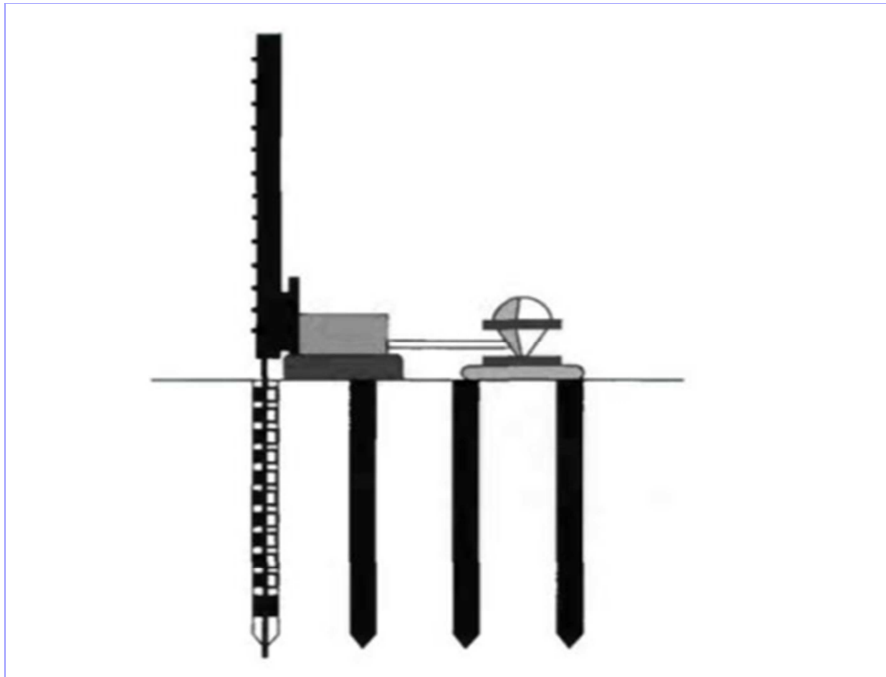


Figure (1.14) : colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment.

#### ▪Domaine d'application :

Fondations de bâtiments.

Zones de transition entre points durs et sections courantes de remblai.

Soutènements d'excavations.

#### ▪Avantages et inconvénients :

Technique peu courante.

Entreprise spécialisée.

### 2.2.9 - Remblai sur inclusions rigides :

#### ▪Description et principe de fonctionnement

Les charges apportées par le remblai sont transmises au niveau du substratum rigide, par

l'intermédiaire de pieux disjoints, surmontés chacun d'une dalle destinée à reporter sur le pieu le poids d'une partie du remblai. Cette technique permet ainsi d'améliorer la stabilité et de réduire les tassements (figure 1.15).

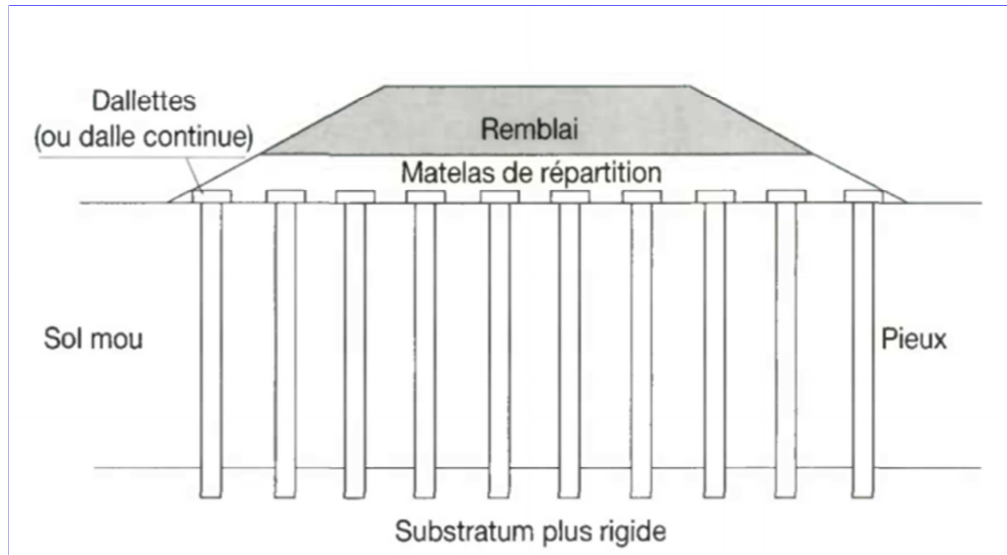


Figure (1.15) : remblai sur inclusions rigides.

▪**Domaine d'application :**

Remblais d'accès à des ouvrages fondés sur pieux.

Zones localisées où les tassements doivent être strictement limités à quelques centimètres.

▪**Avantages et inconvénients :**

-Procédé facile à mettre en œuvre et efficace.

-Calcul complexe mais fiable.

-Technique onéreuse.

**2.2.10 - Electro-osmose :**

▪**Description et principe de fonctionnement :**

Un réseau d'anodes et de cathodes (tubes creux) est placé selon un maillage régulier dans le massif de sol à traiter (figure 1.16). Une différence de potentiel est appliquée entre les anodes et les cathodes et provoque un écoulement de l'eau vers les cathodes, où elle est évacuée. Cet écoulement produit une diminution de la teneur en eau moyenne dans le sol et donc un tassement et une augmentation de la résistance au cisaillement.

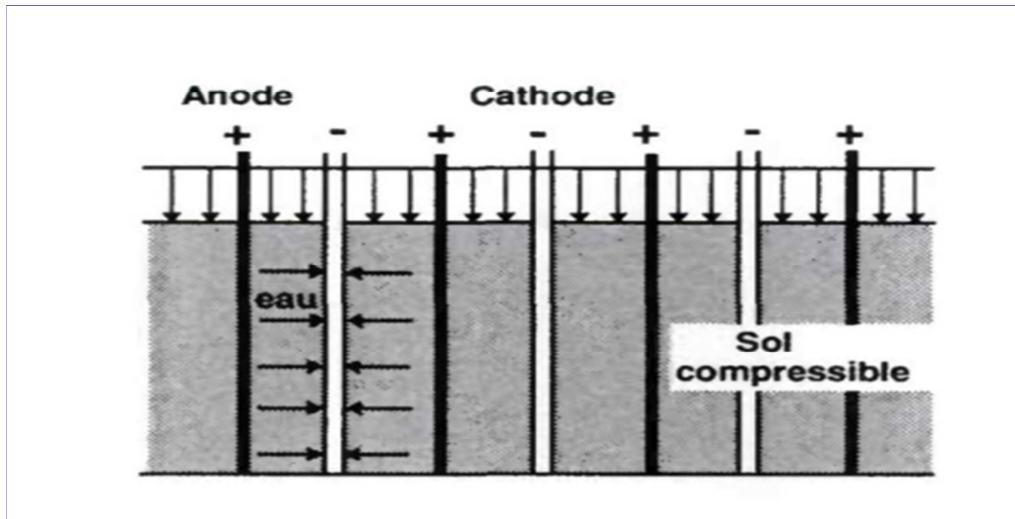


Figure (1.16) : principe de l'électro-osmose.

▪**Domaine d'application :**

L'électro-osmose et l'électro-injection ont été utilisées sur quelques chantiers pour stabiliser des fondations ou des remblais difficiles d'accès et que l'on ne pouvait traiter par des méthodes classiques. L'expérience montre que l'électro-osmose n'a d'effet significatif que sur des sols de perméabilité suffisamment faible ( $10^{-6}$ m/s), dont les particules sont majoritairement limoneuses.

▪**Avantages et inconvénients :**

- La méthode est efficace mais coûteuse.
- Les paramètres et les effets du traitement sont difficiles à prévoir avant le chantier.

**3. Conclusion:**

Les techniques d'amélioration de sols sont très importantes. L'application d'une de ces méthodes nécessite une bonne connaissance du sol à traiter (granulométrie, composition, teneur en eau). Il existe un grand nombre de procédés différents, le but est de trouver la solution la plus efficace et la plus économique.

Les traitements peuvent avoir un caractère définitif ou provisoire pendant la phase chantier. Ces techniques restent assez onéreuses car il faut des entreprises spécialisées.

# Chapitre 2

## Renforcement des sols par géosynthétiques

## 1. Introduction

L'une des techniques de construction des remblais sur sols compressibles consiste en une solution de renforcement par des nappes géosynthétiques placées à la base du remblai. Cette technique représente une alternative économiquement et techniquement intéressante. Holtz [3] 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. La consommation annuelle mondiale de géosynthétiques est de près de 1 milliards de m<sup>2</sup>. En moins de 30 ans, 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 de 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.

## 2. Définitions des géosynthétiques

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 de 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 un remblai sur sol mou. [3]

Les polymères les plus couramment rencontrés dans les nappes géosynthétiques sont les suivants :

- Les vinyliques tels que le chlorure de polyvinyle (pvc), très résistants à l'eau et à l'attaque de nombreux produits chimiques ou micro-organismes ; ils sont très utilisés comme drains.
- Les acryliques sont utilisés dans les géosynthétiques sous forme de résine ou d'émulsion pour les consolider.
- Les polyamides (pm ex : nylon) sont très sensibles à l'eau et donc peu utilisés.
- Les polyesters (ps) possèdent des propriétés mécaniques élevées et une inertie aux acides et aux micro-organismes qui les rendent très intéressants. Ils sont cependant attaqués en surface par les bases.
- Les polyoléfinés telles que le polyéthylène (pe) ou le polypropylène (pp) sont également très

utilisés du fait de leur forte insensibilité chimique et de leurs bonnes propriétés mécaniques et de leur faible coût.

### 3. Classifications des géosynthétiques

Les géosynthétiques peuvent être généralement classés en catégories selon le mode de fabrication. Les dénominations courantes et de brèves descriptions des géosynthétiques sont présentées ci-dessous. [4]

#### 3.1. Les géotextiles:

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.

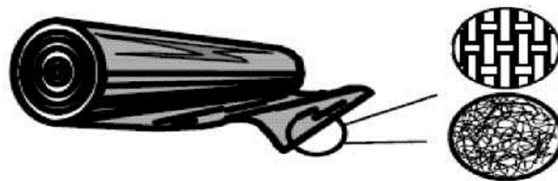
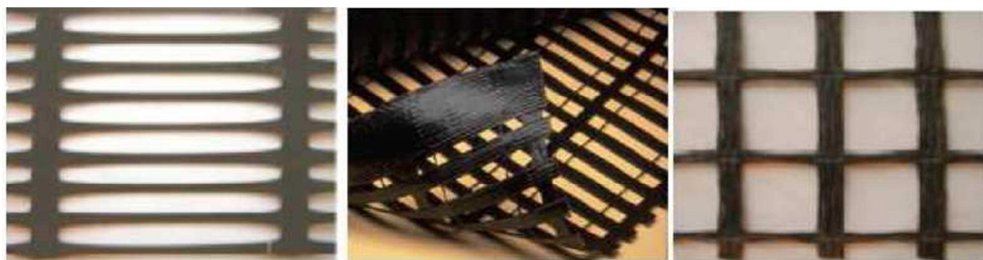


Figure (2. 1) : Les géotextiles

#### 3.2. Les géogrilles:

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



Géogrille extrudé

géogrille uniaxiale

géogrille biaxiale

Figure (2.2) : Différent types de géogrilles.

### 3.3. 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.

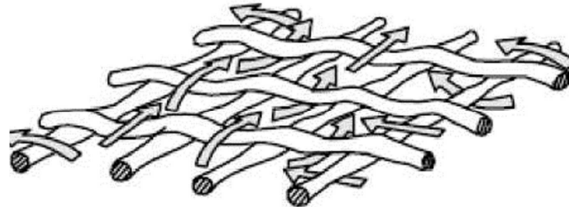


Figure (2.3) : Géofilet

### 3.4. 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) : Géomembrane

### 3.5 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.

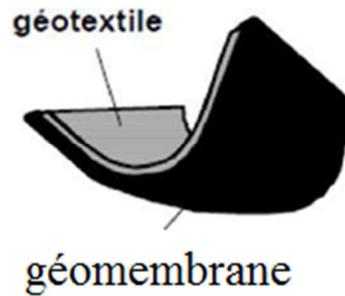


Figure (2.5) : Géocomposite.

### 3.6. 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.

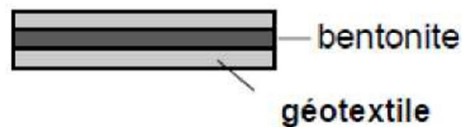


Figure (2.6) : Géosynthétique bentonitiques.

### 3.7. 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.

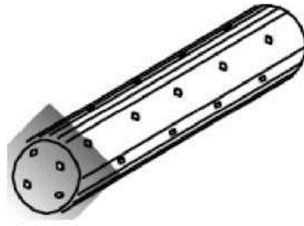


Figure (2.7) : Les géotuyaux.

### 3.8. 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 polyolé fines larges de 0,5 m à 1 m ont été attachées ensemble avec des barres en polymères verticales et utilisées pour former des couches épaisses de géosynthétiques alvéolaires appelées géomatelas.

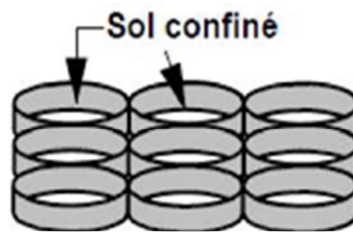


Figure (2.8) : Les géosynthétiques alvéolaires

### 3.9 Les blocs ou plaques de 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.

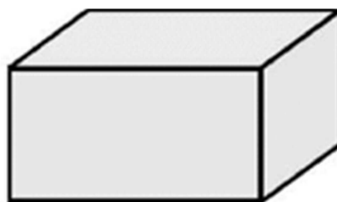


Figure (2.9) : Les blocs ou plaques de géomousses

## 4. Les fonctions des géosynthétiques

### 4.1 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. [5]

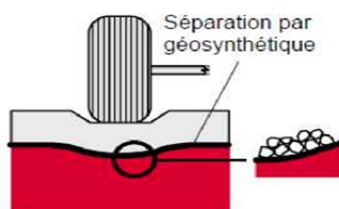


Figure (2.10) : l'utilisation des géosynthétiques dans la séparation



Figure (2.11) : pose des géogrilles de séparation.

### 4.2 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 subverticales (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 stockages de déchets. [5]

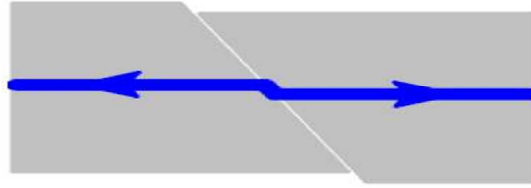


Figure (2.12) : l'utilisation des géosynthétiques dans le renforcement.



Figure (2.13) : Pose des géotextiles de renforcement.

### 4.3 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. [5]

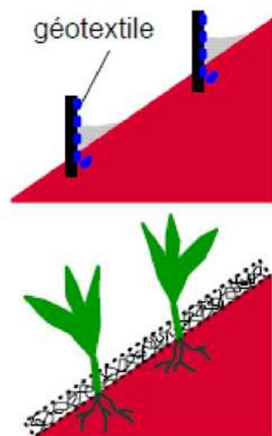


Figure (2.14) : Utilisation contre l'érosion.

#### 4.4 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. [5]

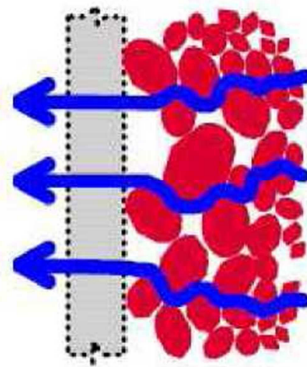


Figure (2.15) : L'utilisation des géosynthétiques dans la filtration.



Figure (2.16) : Utilisation pour filtration.

#### 4.5 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 pré-chargés. [5]

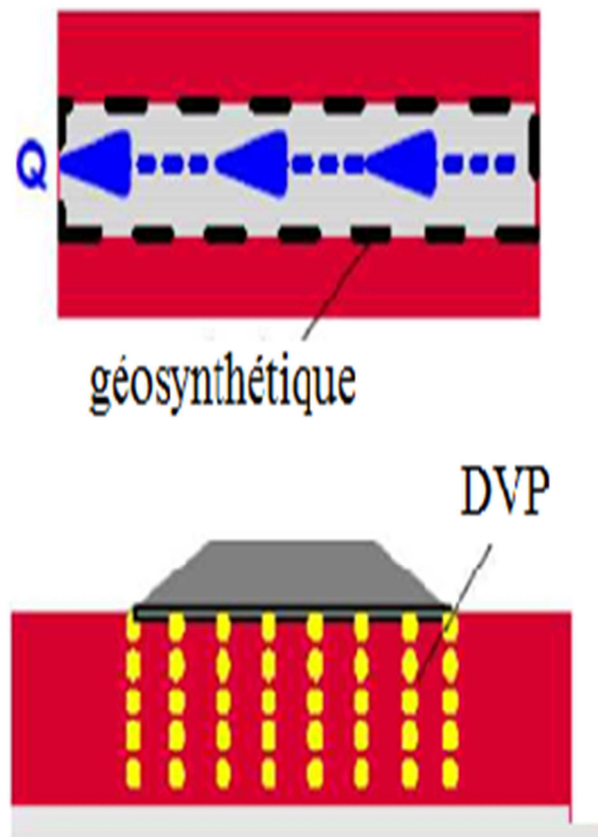


Figure (2.17) : Géosynthétiques en drainage

#### 4.6 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 encapsulage de sols gonflats et confinement de déchets. [5]

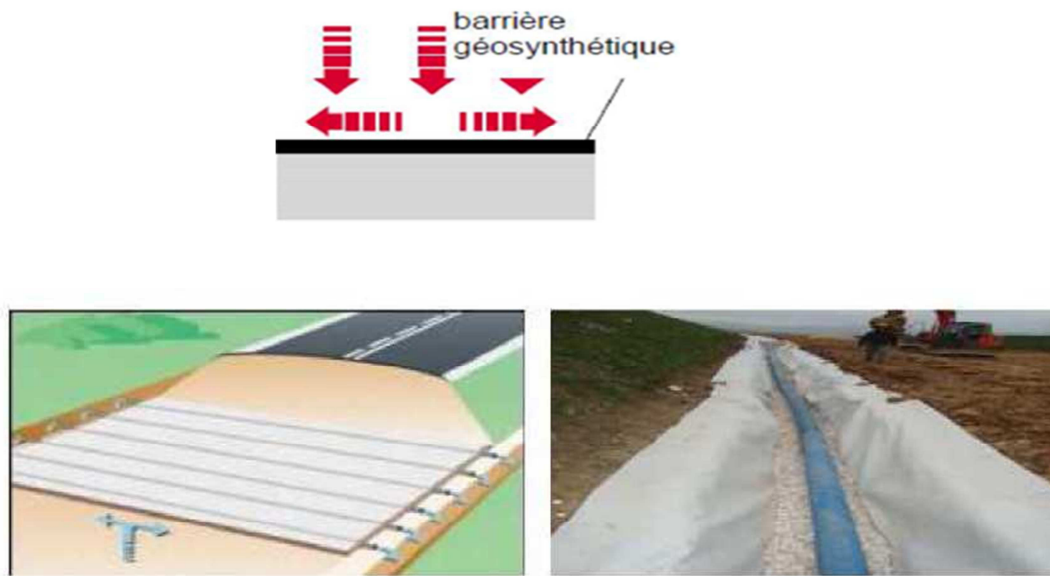


Figure (2.18) : Utilisation des géotextiles pour le drainage.

#### 4.7 Principe de renforcement de géogrilles:

Les inclusions (nappes de géotextiles, grilles, etc.) ne possèdent pas en général de rigidité à la flexion. Dans le cas des géogrilles, qui sont classées comme produits apparentés aux géotextiles, l'interaction entre le sol et le renforcement est de deux types : frottement latéral le long des éléments longitudinaux, c'est-à-dire des éléments orientés dans le sens de la traction, et résistance en butée le long des éléments transversaux. Il est à noter que, la mise en place dans un remblai s'accompagne d'une mise en traction partielle sous l'effet du compactage, dont il faut tenir compte dans le dimensionnement, ce mécanisme est bien défini dans la figure 2.18. [1]

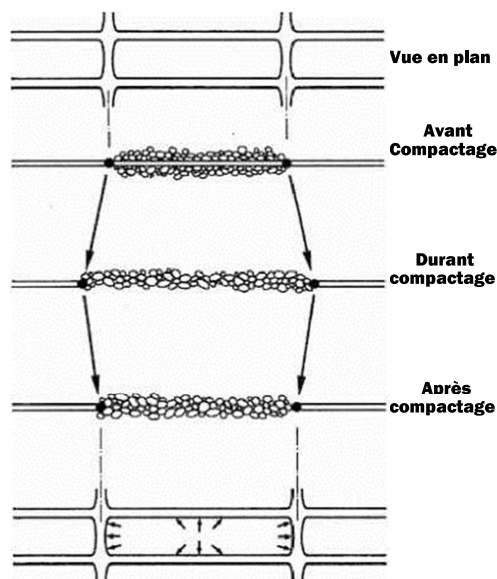


Figure (2.19.a): Mécanisme de mise en tension des treillis et géogrilles durant le compactage.



Figure (2.19.b) : Utilisation du géogrille dans le renforcement.

#### 4.8 Géosynthétiques dans les routes non revêtues

La présence du géosynthétique de renforcement peut apporter les bénéfices suivants :

- Réduction de l'épaisseur du remblai ;
- Séparation des agrégats et du sol mou ;
- Augmentation de la capacité portante du sol mou ;
- Réduction de la déformation latérale du remblai ;
- Amélioration de la distribution des contraintes ;
- Amélioration de la propagation des efforts verticaux ;
- Réduction de la déformation verticale due à l'effet de membrane ;
- Augmentation de la durée de vie de la route ;
- Réduction des besoins d'entretien ;
- Réduction des coûts de construction et d'entretien de la route. [7]

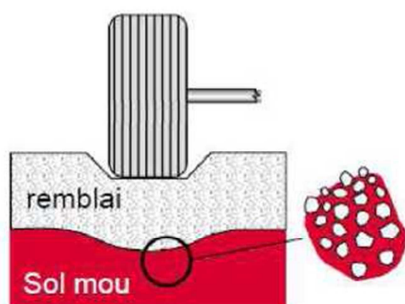


Figure (2.20) : Mécanismes typiques de dégradation des routes non revêtues et non renforcées sur les sols mous.

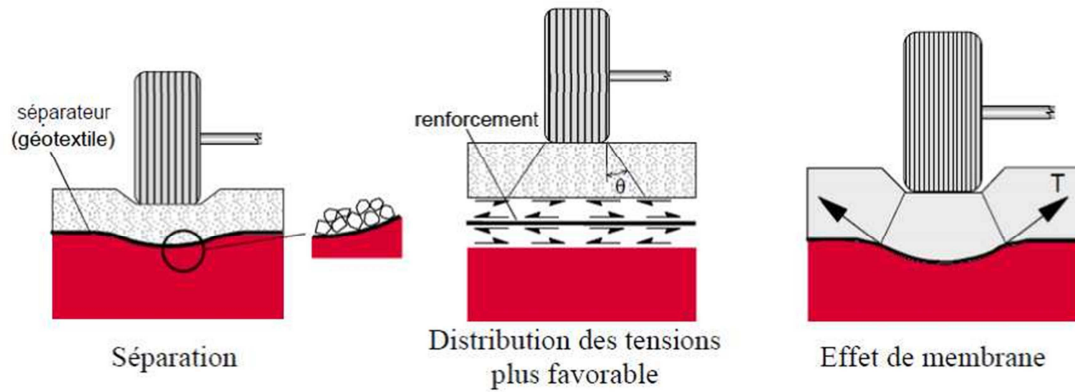


Figure (2.21) : Apport des géosynthétiques sur le comportement des routes non revêtues.

À mesure que la profondeur des ornières augmente, la déformation du géosynthétique fournit davantage de renforcement grâce à l'effet de membrane. La composante verticale de la force de tension du renforcement réduit les incréments de déformation verticale du remblai.

Plusieurs recherches dans la littérature ont montré que dans une route renforcée une profondeur d'orniérage donnée sera atteinte pour un nombre de répétitions de charge (intensité du trafic) plus grande que dans le cas non renforcé. Ceci engendrera une plus Grande durée de vie et demandera une moindre maintenance.

Un drainage accélérera également la consolidation du sol mou, augmentant sa résistance. Le drainage du sol mou peut être réalisé en employant un géotextile, une géogrille et un géotextile ou un géocomposite. La stabilisation de la partie supérieure du sol mou sera bénéfique si la route doit être revêtue par la suite en réduisant les coûts de construction et en réduisant au minimum les déformations de la chaussée.

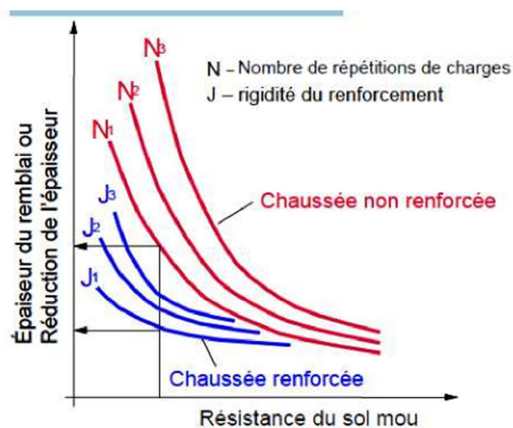


Figure (2.22) : Diagramme typique de conception.



Figure (2.23) : Construction d'une route non revêtue sur une argile organique molle.

Des méthodes de conception sont disponibles dans la littérature, y compris des méthodes simples qui comportent l'utilisation de diagrammes pour les analyses préliminaires. Ces méthodes exigent des paramètres conventionnels des sols et des géosynthétiques pour la conception dans des conditions courantes. Quelques diagrammes de conception ont été également développés par quelques producteurs de géosynthétiques spécifiquement pour la conception préliminaire en utilisant leurs produits.

## 5. Les principaux domaines d'application de géosynthétique

### 5.1 Le renforcement

Le rôle de géosynthétique dans le renforcement est d'ajouter les propriétés de résistance à la traction au sol (qui est un matériau de bonne caractéristique à la compression) pour produire un matériau qui a à la fois les caractéristiques de résistance à la traction et à la compression. Le renforcement est le résultat de transfert des contraintes de traction du sol vers le géosynthétique à l'aide du frottement développé entre les deux. Flut (1988) a devisé la fonction de renforcement en deux catégories :

- Le géosynthétique travail comme élément de traction qui supporte les efforts dans son plan ;
- Le géosynthétique travail comme membrane qui reprend, en plus des efforts dans son plan, les efforts normaux. [8]

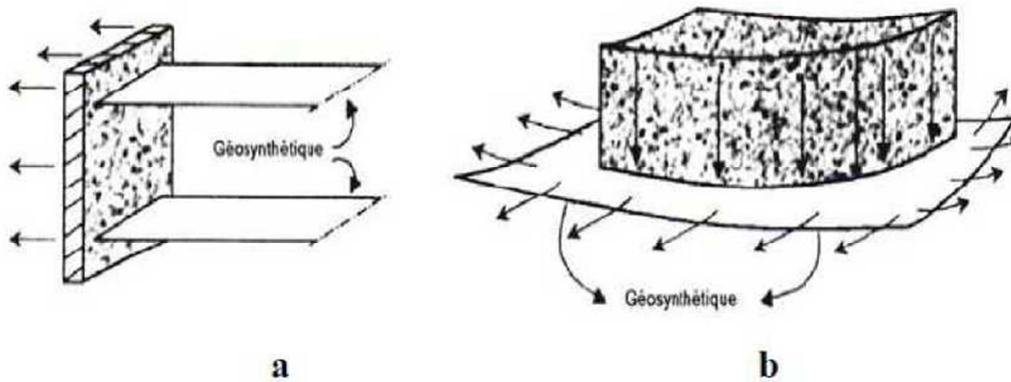


Figure (2.24) : La fonction de renforcement.

### 5.2. Les routes et les chemins de fer :

Les routes et le chemin de fer sont souvent construits à travers des couches de sols faibles et compressibles. Pour distribuer les charges du trafic afin de diminuer les contraintes sur le sol d'assise, on place une couche d'agrégats avec de bonnes propriétés mécaniques. À long terme l'interaction entre les agrégats et le sol de fondation sous chargement dynamique, va causer l'érosion de sol porteur et la pénétration des agrégats qui donne à la fin des déflexions et éventuellement la rupture.

Pour réduire les déflexions et obtenir une meilleure performance du système on introduit une couche de géosynthétique entre la couche d'agrégat et sol support. Cette couche de géosynthétique ne joue pas seulement le rôle de séparation entre les deux matériaux mais aussi un rôle de renforcement. [8]

### 5.3. Les fondations

Les fondations superficielles qui sont construites sur un mauvais sol ont une capacité portante très basse et enregistrent des tassements importants. Pour améliorer cette situation, ces fondations peuvent être placées dans un sol granulaire de bonne caractéristique et séparées du mauvais sol par une nappe de géosynthétique qui bien répartir les efforts venant de la superstructure. [8]

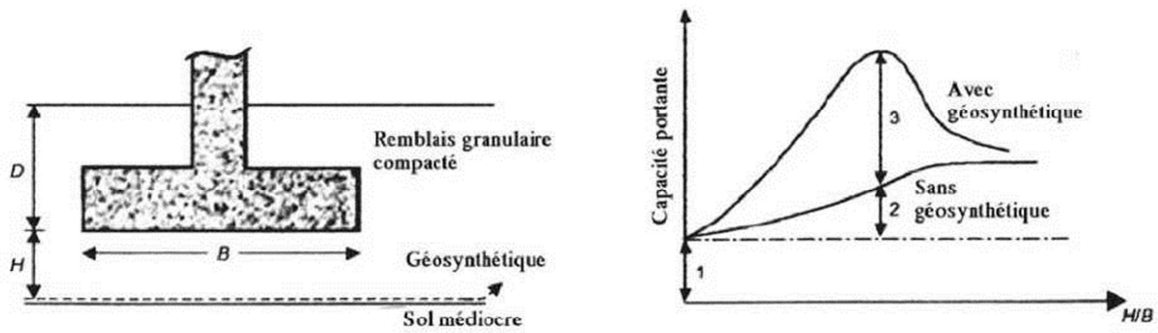


Figure (2.25) : Variation de la capacité portante après utilisation de géosynthétique (das, 1988).

**5.4. Autres application**

Les géosynthétiques peuvent aussi être utilisé pour :

- La stabilité des murs des remblais ;
- La stabilité de la pente raide ;
- La stabilité des murs de soutènement. [8]

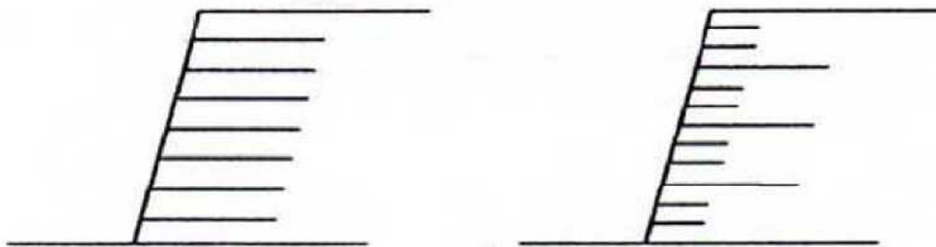


Figure (2.26) : Renforcement des pentes par géosynthétiques.

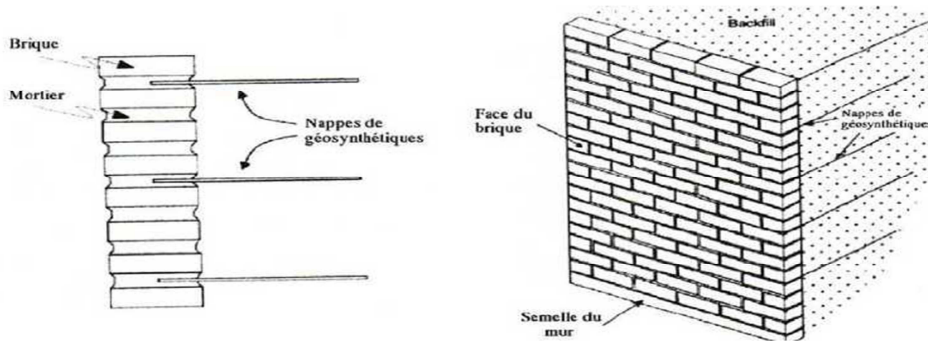


Figure (2.27) : Utilisation des nappes de géosynthétiques pour le renforcement des murs de soutènement.

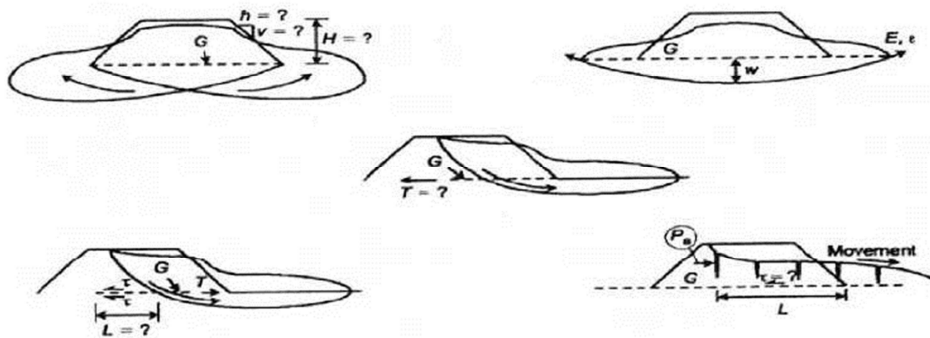


Figure (2.28) : Rôle des géosynthétiques pour stabiliser les remblais selon différents modes de rupture.

## 6. 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 terres et diminution des exigences de transfert 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. [1]

## 7. Conclusion :

Nous avons exposé dans ce chapitre les techniques les plus utilisés en pratique pour l'amélioration des sols. Le renforcement par des nappes géosynthétiques représente une alternative économiquement et techniquement intéressante.

Chapitre 3 :  
Présentation l'outil  
numérique. Plaxis 8.02

## 1. Introduction

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Pour réaliser ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques de la résistance des matériaux, l'ingénieur a recours aux méthodes qui lui permettent de simuler le comportement des systèmes physiques complexes. Conditionnée par les progrès effectués dans le domaine informatique et les acquis des mathématiques dans la théorie de l'énergie, des méthodes de projection et des méthodes d'approximation, la méthode des éléments finis est devenue éventuellement la plus performante des méthodes numériques vu son grand champ d'application où elle est utilisée dans de nombreux secteurs de l'industrie : aérospatiale, nucléaire, génie civile, construction navale, mécanique, technique offshore, (etc...).

La méthode des éléments finis est donc une technique récente à caractère pluridisciplinaire car elle met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base :

La mécanique des structures : élasticité, résistance des matériaux, dynamique, plasticité.

L'analyse numérique : méthodes d'approximations, résolution des systèmes linéaires, des problèmes aux valeurs propres.

L'informatique appliquée : techniques de développement et de maintenance de grands logiciels.

## 2. Bref historique:

L'histoire de la MEF a commencé en 1819, quand Navier définit une méthode d'étude des systèmes hyperstatiques basés sur l'application des conditions d'équilibre et de compatibilité, puis Maxwell en 1864 et Castigliano en 1878 établissent d'une façon complète les théorèmes de l'énergie. Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, des résultats fondamentaux dans le domaine des méthodes d'approximation ont été établis les bases en effectuant une discrétisation spatiale du domaine tout en utilisant les méthodes d'approximation variationnelles. En 1955, Argyris présente une approche unifiée des méthodes des déplacements et des forces, l'année suivante Turner et Clough publient une présentation systématique de la méthode des déplacements. Ces deux publications sont particulièrement importantes et représentent véritablement le début de la MEF comme technique de calcul des structures complexes.

## 3. Concepts de base:

La MEF consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre finis d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie

---

indépendante, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements réels de la structure en tant qu'objet continu.

La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées. Elle nécessite un grand nombre de calculs qui, cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique.

#### **4. Calculs par la MEF:**

La méthode aux éléments finis est théoriquement, la plus satisfaisante puisqu'elle permet la modélisation des problèmes géotechniques complexes.

Elle nécessite

- La définition de la géométrie du problème, pour que les frontières du calcul n'influence pas sur les résultats.
- Le choix d'une loi de comportement du sol, de type Mohr-Coulomb, Duncan, Cam-Clay.
- Les caractéristiques des ouvrages et des éléments d'interface pour introduire l'interaction sol-structures et les conditions hydrauliques.
- Les caractéristiques des butons ou des tirants d'ancrage.
- L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.

Elle permet

- d'effectuer les calculs d'écoulement ;
- de simuler toutes les phases de travaux ;
- de prendre en compte les variations des caractéristiques : des ouvrages, des couches de terrain et des lits de butons ou de tirants ;
- de calculer un coefficient de sécurité.
- Les sorties fournissent pour les ouvrages sont :
  - les déplacements des ouvrages ;
  - les sollicitations internes des ouvrages ;
  - les efforts dans les butons ou tirants.

Et pour le sol :

- les déplacements du sol ;
- les déformations du sol ;
- les contraintes totales et effectives dans le sol ;
- les pressions interstitielles ;
- de calculer un coefficient de sécurité.

Et donc la possibilité d'étudier l'interaction de l'exécution d'un écran sur des ouvrages existants. Pour notre problème, en utilise PLAXIS.

## 5. Présentation de PLAXIS:

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux codes éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettent le passage de la réalité au modèle est difficile à évaluer. Il sait que le jargon éléments finis est parfois rebutant-il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des noeuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer du code sur le PC gérant sa bureautique et sa technique quotidiennes, afin de faire une étude paramétrique des problèmes délicats. Il exige avant tout que ses journées ne soient pas encombrées par de laborieuses entrées de données et interprétations de fichiers

### 5.1. Le code éléments finis PLAXIS:

Conçu par des géotechniciens numériciens, le code éléments finis PLAXIS représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en l'analyse pseudo statique 2D. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité non standard (4 paramètres), avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangles à 15 noeuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc). Du point de vue pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit outre mesure. Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volumes réduits, faciles à consulter. L'ensemble des options par défaut (condition aux limites) rend la mise en données aisée et rapide. Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné.

L'utilisation de PLAXIS consiste en quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output, Curves) :

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

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



**b) Le programme de calcul (Calculations)**

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

**c) Le programme de résultats (Output)**

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

**d) Le programme courbes (Curves)**

Ce programme contient tout le nécessaire pour générer des courbes charges-déplacements, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.

**5.2. Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS :**

Les modèles de comportement de sols sont très nombreux : depuis le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées permettant de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-viscoplastiques des sols, aussi bien sous sollicitation monotone que cyclique. Ces modèles ont été développés dans le but d'être intégrés dans des calculs par éléments finis. Dans ce schéma, la modélisation par éléments finis permet de résoudre le problème aux limites en tenant compte, par une loi de comportement réaliste, du comportement réel du sol. Deux difficultés majeures ont empêché la réalisation complète de ce schéma : d'une part les lois de comportement qui décrivent bien le comportement des sols sont complexes et demandent, pour la détermination des paramètres qu'elles contiennent, des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie. La validation des lois de comportement a fait l'objet, dans les années 80 de plusieurs ateliers pour comparer les réponses des différents modèles sur différents chemins de sollicitation. La seconde difficulté a été l'intégration de ces lois de comportement dans des codes par éléments finis, biotridimensionnels. Peu de codes sont opérationnels actuellement, avec des lois sophistiquées. Le coût de ces calculs est généralement important.

Pour traiter un problème de soutènement (paroi moulée, palplanche, ( etc...)), il est tout à fait adapté de considérer le sol comme élastoplastique et le modèle de Mohr-Coulomb sera bien adapté dans ce cas. Mais pour traiter un remblai sur sols mous, avec chargement par étapes et consolidation, il faut tenir compte de l'écroutissement. Le matériau se consolide et il est plus adapté d'utiliser le Soft Soil Model qui prend en compte cette évolution du matériau. Pour un

calcul d'écoulement, il suffit de prendre un matériau élastique, mais on peut avoir à coupler écoulement et déformation ; dans ce cas un modèle élastoplastique peut être justifié.

Les règles d'or dans le domaine de la simulation du comportement d'un ouvrage sont :

- Quel est le comportement principal à modéliser ?
- Utiliser un modèle qui décrit ce comportement ;
- Interpréter les résultats, notamment en fonction des paramètres de la modélisation. En ce sens, la modélisation numérique ne fournit sous une autre forme que les données du problème posé.

### 5.2.1. Comportement élastoplastique

Le comportement élastoplastique peut être représenté par un modèle monodimensionnel, en série un ressort de raideur  $K$ , pour symboliser l'élasticité du matériau, à un pat in de seuil  $S_0$  (Figure 3.1).

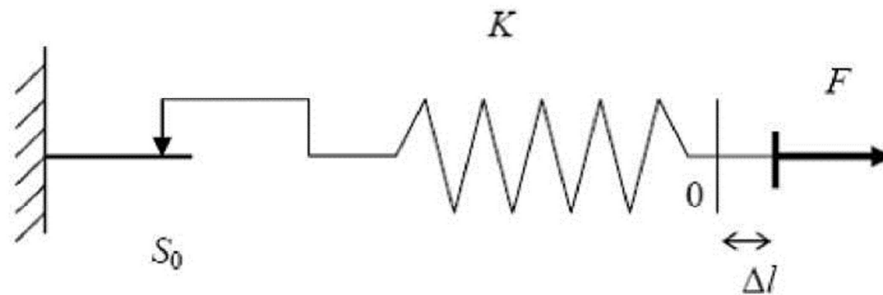


Figure (3.1) : Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique.

Le modèle élastique linéaire utilisé dans PLAXIS est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module de cisaillement et le coefficient de Poisson  $\nu$ . l'avantage de  $G$  est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ( $G_u = G'$ ), ce qui n'est pas le cas des modules d'Young : le module d'Young non drainé est supérieur au module d'Young drainé.

Il aurait pu sembler logique, si  $G$  est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser  $K$  comme second paramètre. D'une part  $K_u$  est infini (correspondant à  $\nu_u = 0.5$ ) et il est moins courant d'emploi.  $G$  est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques.

La relation entre le module d'Young  $E$  et les autres modules sont données par les équations :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$$K = \frac{E}{3(1 + \nu)}$$

$$E_{oed} = \frac{E(1 - \nu)}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}$$

### 5.2.2. Modèle de Mohr-Coulomb

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

Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c$$

Où  $\tau$  et  $\sigma_n$  sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, et  $c$  et  $\varphi$  respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau (Figure 3.2).

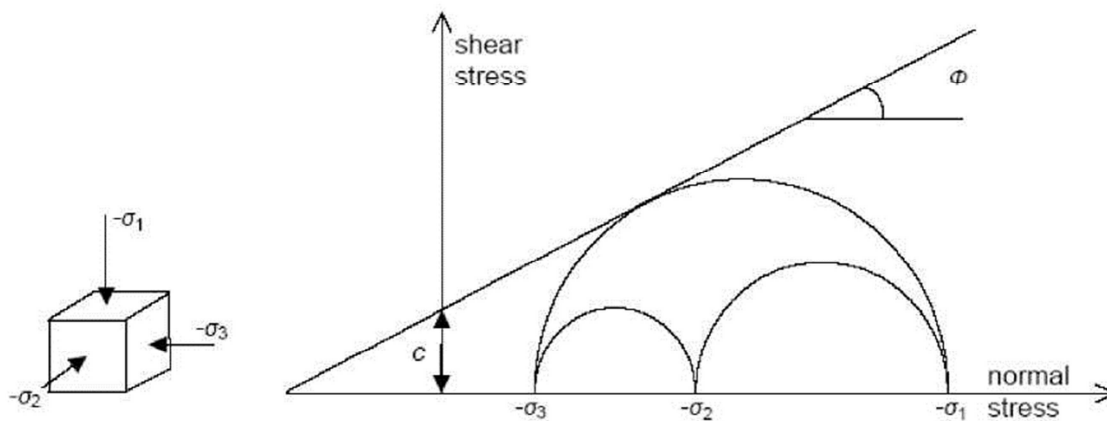


Figure (3.2) : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

### 5.2.3 Modèle de sol avec écoulement (*Hardening Soil Model*)

Le modèle *HSM* a pour objet d'améliorer le modèle de Mohr-Coulomb sur différents points, il s'agit essentiellement :

- de prendre en compte l'évolution du module de déformation lorsque la contrainte augmente : les courbes oedométriques en contrainte-déformation ne sont pas des droites.

### Les paramètres du HSM :

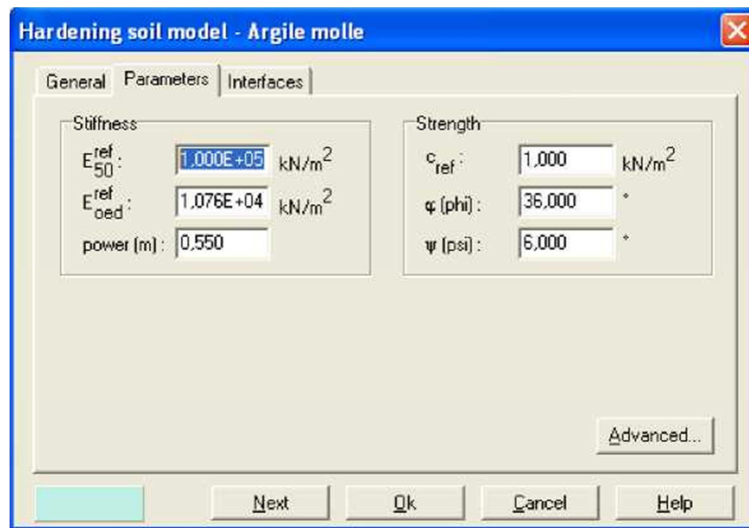


Figure (3.3) : Fenêtre des paramètres du Hardening Soil Model.

#### Paramètres de Mohr-Coulomb :

- $c$  : cohésion (effective) ; [kN/m<sup>2</sup>]  
 $P$  : angle de frottement effectif ; [°]  
 $w$  : angle de dilataance. [°]

#### Paramètres rigidité

- $E_{50}^{ref}$  : module sécant dans un essai triaxial ; [kN/m<sup>2</sup>]  
 $E_{oed}^{ref}$  : module tangent dans un essai oedométrique ; [kN/m<sup>2</sup>]  
 $m$  : Puissance (environ 0,58 pour les sables) [-]

Janbu (1963) rapporte des valeurs de  $m$  autour de 0.5 pour les sables et les silts norvégiens,

Von Soos (1980) rapporte de diverses différentes valeurs dans la gamme  $0,5 < m < 1,0$ .

#### Paramètres avancés :

- $E_{ur}^{ref}$  : module en décharge (par défaut  $E_{ur}^{ref} = 3$  à  $4 E_{ur}^{ref}$ ) [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\nu_{ur}$  : Coefficient de Poisson en charge décharge (par défaut  $\nu_{ur} = 0,2$ ) [-]  
 $p^{ref}$  : Contraintes de référence (par défaut  $p^{ref} = 100$ ) [kN/m<sup>2</sup>]  
 $K_0^{NC}$  :  $K_0$  consolidation (par défaut  $K_0 = 1 - \sin \varphi$ ) [-]  
 $c_{increment}$  : Cf modèle de Mohr-Coulomb (par défaut  $c_{increment}=0$ ) [kN/m<sup>3</sup>]  
 $y_{ref}$  : Unité de profondeur [m]

$R_f$	: Coefficient à la rupture $q/q_a$ (par défaut $R_f = 0,9$ )	[-]
$\sigma_{tension}$	: Résistance à la traction (par défaut ( $Jtmwn = 0$ ))	[kN/m <sup>2</sup> ]

Les paramètres avancés sont représentés sur la (Figure 3.4).

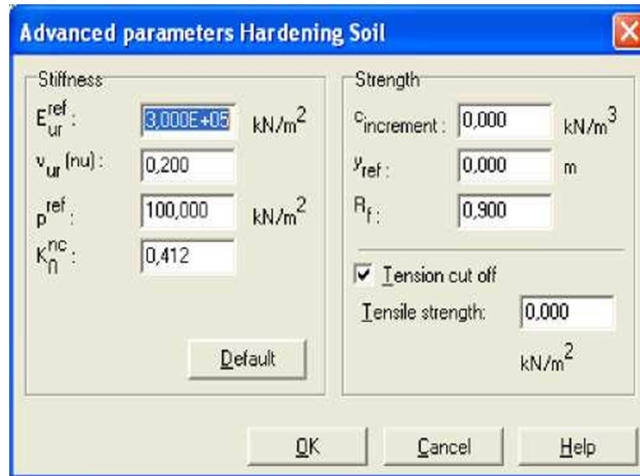


Figure (3.4) : Fenêtre des paramètres avancés du Hardening Soil Model.

#### 5.2.4 Modèle pour sols mous (*Soft Soil Model*)

Ce modèle (*SSM*) est un modèle dérivé du Cam-Clay. Historiquement le modèle Cam-Clay a été développé à Cambridge dans les années 60 par Roscoe, Schofield et al.. L'idée de base de ce modèle est de prendre en compte l'effet d'érouissage que provoque sur les argiles la pression moyenne. Sous l'effet d'une pression moyenne, la teneur en eau diminue et l'argile devient plus résistante. Il s'agit d'un modèle élasto-plastique avec une surface de charge. Sous la surface de charge, le matériau reste élastique, tandis que si le point représentatif de l'état de contrainte effectif atteint non réversible. Une surface de plasticité, associée, limite l'espace entre les états admissibles et non admissibles.

Les paramètres de compressibilité :

Les deux paramètres  $C_c$  et  $C_s$  décrivent le comportement oedométrique ou isotrope observé dans des essais de laboratoires : ce seront les deux paramètres de base réglant la position des lignes de consolidation vierge ou des lignes de gonflement. L'axe des contraintes est tracé en logarithme naturel, ce qui conduit à modifier la définition de  $C_c$  et  $C_s$  en  $A$  et  $K$ . dans ce cas, l'axe des ordonnées est l'indice des vides. Il peut être judicieux de remplacer l'indice des vides par la déformation volumique (identique à la déformation axiale dans l'essai oedométrique).

On utilise alors  $A^*$  et  $K^*$ . Dans ce cas, l'indice des vides, variable, apparaît dans les expressions du tableau 2.1. Il peut dans la majorité des cas être pris constant, et égal à la valeur initiale.

Les relations avec les paramètres du modèle de Cam-Clay sont indiquées sur le Tableau (3.1).

Relation avec l'indice des vides	(1) $\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e}$	$K^* = \frac{K}{1+e}$
Relation avec les paramètres « Hollondais »	(3) $\lambda^* = \frac{1}{c_p}$	$K^* \approx \frac{1 - v_{ur}}{1 - v_{ur}} \frac{3}{c_p}$
Relation avec les indices de compressibilités et de gonflement	(5) $\lambda^* = \frac{c_c}{2,3(1+e)}$	(6) $K^* \approx 1,3 \frac{1 - v_{ur}}{1 - v_{ur}} \frac{c_s}{(1+e)}$

Tableaux (3.1) : SSM Valeurs des paramètres de compressibilité et de gonflement  $\lambda$  et  $k$  [9]

## 6. Conclusion

Ce rapide tour d'horizon des différents modèles utilisés dans PLAXIS montre qu'il s'agit de modèles suffisamment simples pour qu'il soit possible d'en déterminer les paramètres avec une étude géotechnique classique ou avec des corrélations. Il n'y a dans ces modèles aucun paramètre de calage ou sans signification physique comme on en rencontre souvent dans des modèles sophistiqués. Souvent la détermination des paramètres nécessite des techniques d'optimisation. Ces modèles appartiennent au domaine de recherche.

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

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

# Chapitre 4:

Etude numérique  
d'un sable renforcé  
par géosynthétique  
sur sol compressible

## 1. Introduction:

La technique de remblai en sol renforcé par géosynthétique est utilisée de nos jours en solution pour beaucoup d'applications comme les murs de soutènement, les remblais sur sols compressibles, les culées porteuses, les barrages...

Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi d'étudier les comportements d'un remblai en sable renforcé par géosynthétique sur sol compressible.

La construction des remblais sur sols compressibles pose de nombreux problèmes, qui sont associés d'une part à la faible résistance de ces sols, qui entraîne des difficultés à assurer la stabilité des remblais, et d'autre part à leur forte compressibilité, qui se traduit par des tassements et déformations importants des ouvrages. Pour construire tout de même les ouvrages désirés, on peut procéder au renforcement ou à l'amélioration du sol de fondation ou du remblai. Les techniques employées permettent soit d'améliorer la stabilité du remblai, soit d'accélérer le processus de consolidation, ou encore de diminuer le tassement final ou de résoudre les deux problèmes à la fois. Dans ce chapitre, nous présentons la définition les méthodes de calcul de la stabilité d'un remblai renforcé par géosynthétiques et le simulation numérique par élément finis le remblai sur sol compressible non renforcé et renforce par des nappes géotextiles et géogrilles.

## 2. Méthodes de calcul de la stabilité d'un remblai renforcé par géosynthétiques

### 2.1. Stabilité au poinçonnement:

Lorsque l'épaisseur du sol mou est beaucoup plus grande que la largeur du remblai, on utilise la théorie classique de la capacité portante :

$$q_{ult} = \gamma_R H = C_U N_U \quad (1.1)$$

où :

$N_c = 5.14$  : facteur de capacité portante ;

$C_U$  : cohésion non drainée du sol de fondation.

### 2.2. La méthode de cercle de glissement :

C'est le mécanisme de rupture le plus généralement considéré, où il est caractérisé par une surface de rupture bien définie coupant le remblai, la nappe de géosynthétique et le sol de fondation (figure 4.1b)

$$\Delta M_R = T_g y \quad (1.2)$$

$$\Delta M_R = T_g y [R \cos(\theta - \beta)] \quad (1.3)$$

où :

$\beta$ : orientation de la force de renforcement par rapport à l'horizontale ;

$\theta$ : angle entre la tangente à la surface de glissement et l'horizontale.

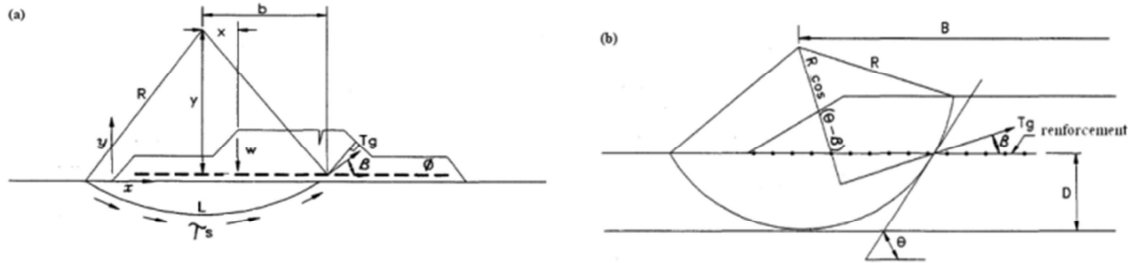


Figure ( 4.1 ) Renforcement nécessaire pour assurer la stabilité au glissement circulaire : (a) modèle de rupture rotationnelle [11] ; (b) modèle de rupture rotationnelle pour le cas où le renforcement n'augmente pas la résistance du sol [12]

- $\beta = 0$  pour les sols de fondation fragiles et sensibles aux déformations (par exemple, des argiles marines) ;
- $\beta = \theta/2$  pour  $D/B < 0.4$  et les sols moyennement à très compressibles (par exemple, argiles molles, tourbes) ;
- $\beta = \theta$  pour  $D/B \geq 0.4$  et les sols très compressibles (par exemple, argiles molles, tourbes) ; et renforcement avec allongement potentiel élevé ( $\epsilon_{conception} \geq 10\%$ ), et grandes déformations tolérables ; et
- $\beta = 0$  dans les autres cas

Le facteur de sécurité pour assurer la stabilité au glissement circulaire est donné par la formule suivant:

avec :

$$F_s = \frac{\sum \text{moments résistants}}{\sum \text{moments moteurs}} \quad (1.4)$$

$$F_s = \frac{M_R + \Delta M_R}{M_D} \geq F_{smin} = 1.3 \quad (1.5)$$

$M_D$ :  $Wx$  moment moteur ;

$M_R$ :  $(\sum \tau_s L)R$  : moment résistant de sol ;

$\Delta M_R$ : moment résistant additionnel de renforcement.

**2.2.1. Stabilité au glissement latéral:** Une analyse simplifiée pour calculer le renforcement nécessaire pour limiter le glissement

latéral du remblai est illustrée dans la figure 4.2. Pour les remblais non renforcés aussi bien que renforcés.

- Le remblai glisse sur le renforcement (figure 4.2a) ; ou
- Le remblai glisse sur le sol de fondation en raison de la rupture par traction du renforcement (figure 4.2b).

le facteur de sécurité est donné

par :

$$F_S = \frac{btg\varphi_{sg}}{K_a H} \quad (1.5)$$

avec :

$\varphi_{sg}$  : angle de frottement sol-géosynthétique.

La résistance au glissement latéral de renforcement nécessaire  $T_{ls}$  est donnée selon la figure 2.4b par :

$$F_S = \frac{(bC_a + T_{ls})}{P_a} \geq F_{Smin} = 1.5 \quad (1.6)$$

$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$  : résultante des pressions des terres ;

$K_a = tg^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi'}{2} \right)$  : résultante des pressions des terres ;

$C_a$  : cohésion sol-géosynthétique, doit être supposée égale à 0 pour les sols très compressibles et les remblais de faible hauteur.

avec:

$$T_{ls} = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 F_{Smin} \quad (1.7)$$

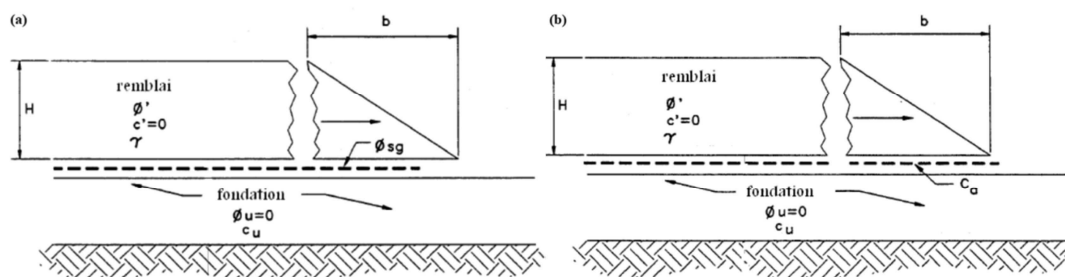


Figure (4.2) : Renforcement nécessaire pour assurer la stabilité au glissement latéral [12] : (a) glissement du remblai au-dessus de renforcement ; (b) rupture de renforcement et glissement du remblai sur le sol de fondation

Généralement, il y a une résistance de frottement suffisante entre les géotextiles et les géogrilles couramment utilisés pour le renforcement et le matériau granulaire utilisé dans la construction du remblai. Si c'est le cas, alors la résultante des pressions latérales des terres doit être résistée par la résistance à la traction du renforcement.

### 2.3. Étude des tassements d'un remblai sur sol compressible

Si les problèmes de stabilité des remblais sur sols compressibles entraînent surtout des incidents spectaculaires (ruptures circulaires ou poinçonnement du sol de fondation), les problèmes de tassement, ou plus généralement de déformation et de consolidation des sols de fondation ont une influence plus discrète mais aussi importante sur le comportement et par suite, le coût de construction et d'entretien des remblais sur sols compressibles.

#### 2.3.1. Décomposition du tassement en quatre termes

$$S = S_i + S_c + S_f + S_{lat} \quad (1.8)$$

avec les notations suivantes :

$S_i$  : tassement immédiat ;

$S_c$  : tassement de consolidation ;

$S_f$  : tassement de fluage ;

$S_{lat}$  : tassement dû aux déplacements latéraux.

#### 2.3.2. Calcul du tassement instantané

Le calcul du tassement instantané des sols fins de fondation se fait classiquement dans l'hypothèse d'un sol complètement saturé, et de liquide incompressible. Comme nous supposons qu'il n'y a pas d'écoulement dans le sol, le tassement instantané se produit à volume constant. Le sol est supposé isotrope, homogène et qu'il est à un comportement élastique linéaire caractérisé par un module d'élasticité  $E$  et un coefficient de Poisson  $\nu = 0.5$ . Il est aussi considéré comme un demi-espace élastique, ou comme une couche d'épaisseur finie reposant sur un substratum indéformable.

Divers recueils de tables et d'abaques, ont été publiés pour la détermination des déformations élastiques des sols de fondation. La solution de Giroud [83], pour les sols de fondation monocouches, permet le calcul du tassement immédiat de la surface du sol, au point  $M$  distant de  $x$  de l'axe du remblai (figure 2.5). Il est donné par la formule suivante :

$$S_i = \frac{\gamma_R H}{E} \frac{a^2}{a-a'} \left[ r_H - \left( \frac{a'}{a} \right)^2 r'_H \right] \quad (1.9)$$

Dans laquelle nous donnons à  $r_H$  et  $r'_H$ , les valeurs lues sur la figure 2.5 en fonction de  $\left( \frac{H}{a}, \frac{x}{a} \right)$  et  $\left( \frac{H}{a'}, \frac{x}{a'} \right)$  respectivement.

Le choix du module d'élasticité  $E$  à utiliser dans le calcul du tassement immédiat est simple dans le cas d'un sol homogène. Pour les sols nettement stratifiés, le module d'élasticité  $E$  est remplacé par un module moyen  $E_m$  [13] tel que :

$$E_m = \frac{\Delta\sigma_m \sum h_i}{\sum \frac{h_i \Delta\sigma_i}{E_i}} \quad (1.10)$$

avec les notations suivantes :

$\Delta\sigma_m$ : augmentation moyenne de la contrainte verticale dans la couche compressible sous l'axe du remblai ;

$\Delta\sigma_i$ : augmentation moyenne de la contrainte verticale dans la sous couche  $i$  sous l'axe du remblai ;

$h_i$  : épaisseur de la sous couche  $i$  ;

$E_i$  : module d'Young de la sous couche  $i$ .

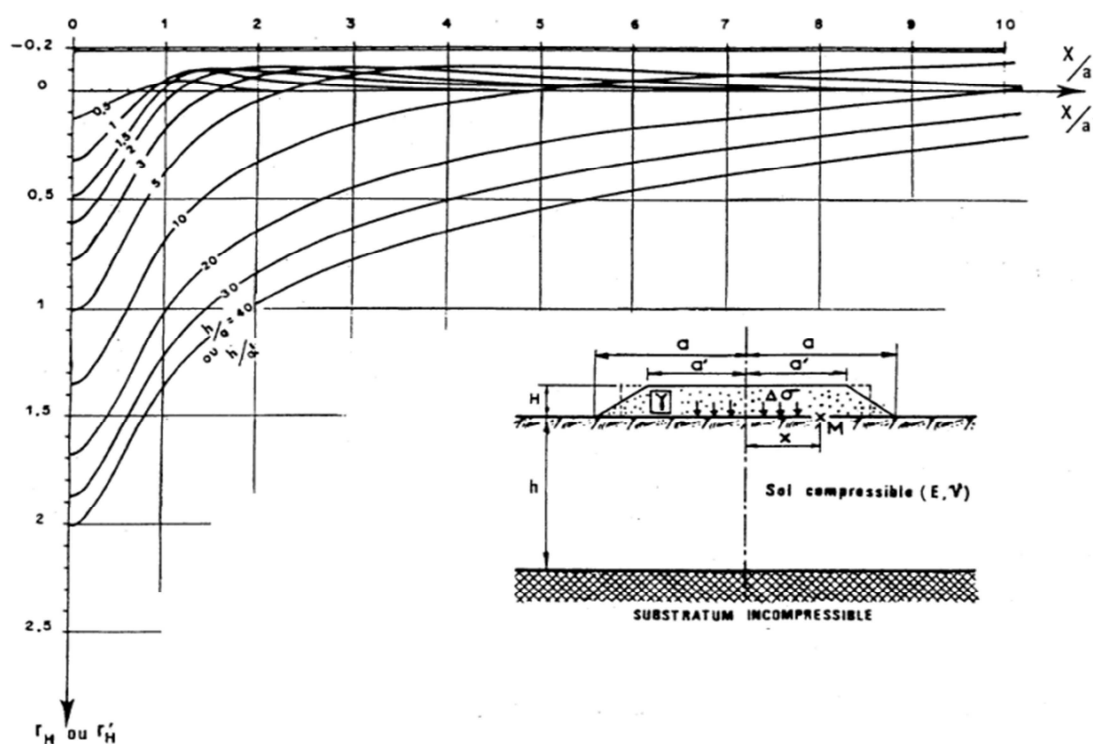


Figure (4.3) : Notation et abaque de Giroud [14] pour le calcul du tassement élastique immédiat

( $\nu = 0.5$ )

### 2.3.3. Calcul du tassement de consolidation

La méthode de calcul du tassement de consolidation est basée sur les principes de Terzaghi

[84,85]. La prévision de ce tassement s'opère généralement en deux temps à savoir, le calcul de l'amplitude des déformations et la détermination des vitesses de tassements.

### 2.3.3.1. Amplitude des déformations

Le calcul de l'amplitude du tassement de consolidation nécessite deux étapes qui consistent, pour la première, à déterminer le champ des contraintes dans le sol et, pour la seconde, à calculer le tassement à partir de ces contraintes et des résultats des essais en laboratoire. Pour un sol multicouche, le tassement de chaque couche est calculé à partir des valeurs sur le plan moyen de chaque couche et le tassement total est obtenu par sommation des tassements élémentaires. En présence d'une couche homogène de forte épaisseur, on améliore la précision des calculs en subdivisant la couche en sous-couches et en procédant comme pour un multicouche.

#### a) Calcul des contraintes

L'épaisseur de la couche compressible est suffisamment importante par rapport aux dimensions du remblai. Il est donc préférable de tenir compte de la distribution réelle des contraintes. Dans ce cas, nous utilisons généralement l'abaque d'Osterberg [86] qui donne la distribution de la contrainte verticale due à une charge en forme de trapèze rectangle infiniment longue. La surcharge verticale en un point  $M$ , à la profondeur  $Z$ , causée par le remblai est :

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_R I_z \quad (1.11)$$

$$\Delta\sigma_R = \gamma_R H \quad (1.12)$$

Avec où  $l_z = 2l$  est le coefficient d'influence lu sur l'abaque d'Osterberg [15] en fonction des paramètres  $\frac{a}{z}$  et  $\frac{b}{z}$  (figure 4.4).

Le coefficient d'influence  $I$  peut être aussi déterminé par la formule suivante, établie par Osterberg [86] avec les notations de la figure 4.5 :

$$I = \frac{1}{\pi} \left[ \left( \frac{a+b}{a} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \alpha_2 \right] \quad (1.13)$$

avec :

$$\alpha_1 = \arctan \left( \frac{a+b}{z} \right) - \arctan \left( \frac{b}{z} \right) \quad (1.14)$$

$$\alpha_2 = \arctan \left( \frac{b}{z} \right) \quad (1.15)$$

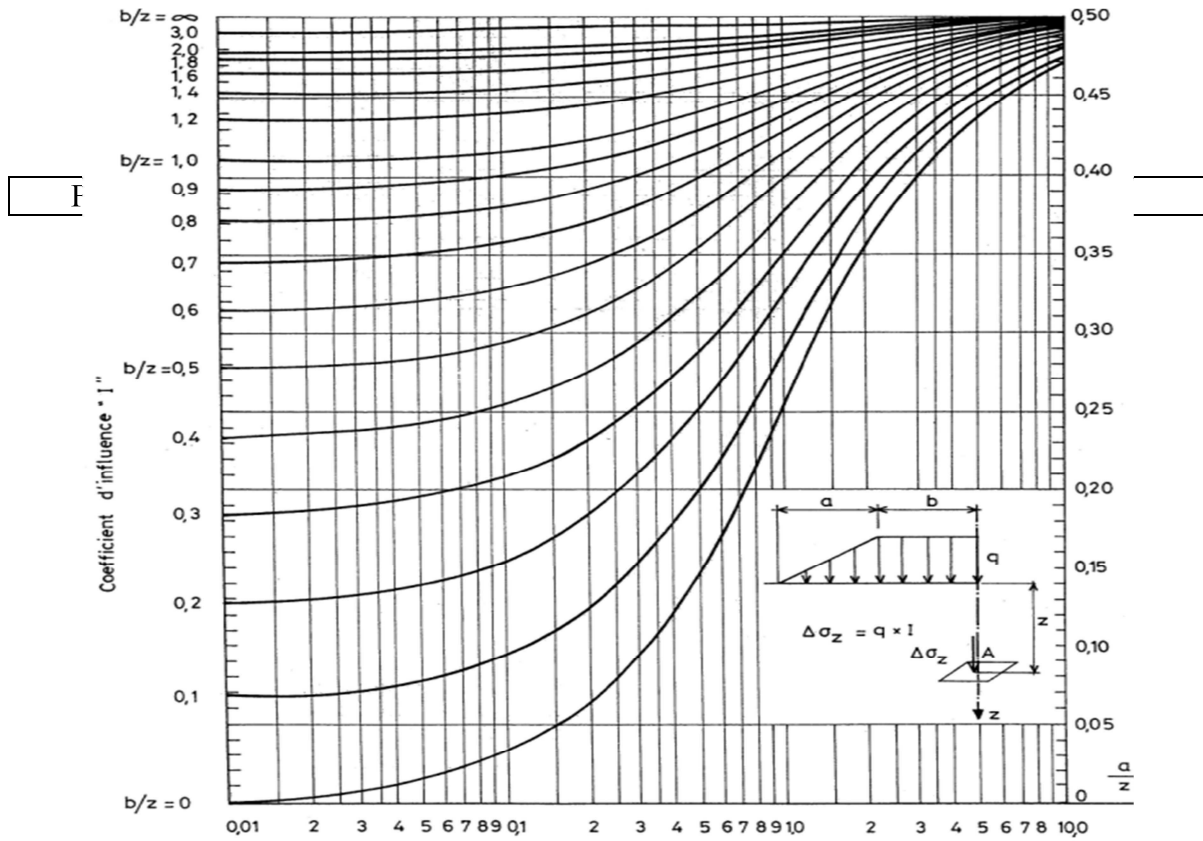


Figure (4.4) : Abaque d'Osterberg [15] pour le calcul du coefficient d'influence sous une charge en forme de demi-remblai

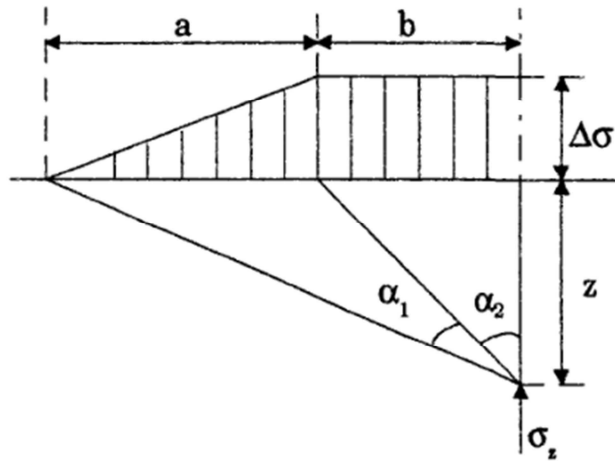


Figure (4.5) : Notations utilisées dans l'abaque et la formule d'Osterberg .

### b) Amplitude des déformations

Le calcul du tassement de consolidation s'effectue à partir des caractéristiques de compressibilité mesurées à l'oedomètre (sans déformation latérale du sol). Le sol de fondation est supposé être formé de plusieurs sous couches qui se tassent sous l'effet des contraintes  $\Delta\sigma_z$ . Le tassement  $S_{oed}$  d'une tranche verticale de sol se calcule à l'aide de la formule oedométrique. Deux cas peuvent se présenter :

$$\text{Si } \sigma'_{vf} > \sigma'_p : S_{oed} = \frac{H}{1+e_0} \left( C_s \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} + C_c \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p} \right) \quad (1.16)$$

$$\text{Si } \sigma'_{vf} \leq \sigma'_p : S_{oed} = \frac{H}{1+e_0} C_s \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} \quad (1.17)$$

Dans laquelle  $H, e_0, C_s, C_c, \sigma'_{v0}$  et  $\sigma'_p$  sont respectivement la hauteur, l'indice des vides, l'indice de gonflement, l'indice de compressibilité, la contrainte verticale initiale et la contrainte de préconsolidation dans la sous couche de sol. La contrainte effective verticale à mi-couche, notée  $\sigma'_{vf}$ , est égale à la contrainte verticale initiale plus l'accroissement de contrainte induit par le l'ouvrage ( $\sigma'_{vf} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma_z$ ).

#### 2.3.4. Calcul du tassement de fluage

Plusieurs méthodes de calcul permettent la détermination du tassement secondaire du sol. La méthode la plus couramment utilisée est celle de Buisman et Koppejan [88]. Il est admis que le tassement supplémentaire  $S_f$  dû à la compression secondaire s'applique au-delà de , fin de la consolidation primaire . Pour  $t \leq t_{100}$ , le tassement suit une loi où intervient en particulier, la théorie de la consolidation.

La méthode est basée sur l'hypothèse fondamentale que le tassement relatif d'une couche de sol dû à la compression secondaire, suit une fonction du logarithme du temps, une loi linéaire, indépendante de l'épaisseur de la couche considérée (figure 4.6).

Pour  $t > t_{100}$ , la loi de tassement s'écrit :

$$S_f = \Delta\sigma h \alpha \log \frac{t}{t_{100}} \quad (1.20)$$

avec les notations :

$\Delta\sigma$  : charge due au remblai ;

$h$  : épaisseur initiale de la couche compressible ;

$\alpha$  : coefficient de proportionnalité déterminé à l'oedomètre (essai de longue durée) ;

$t_{100}$  : temps correspondant à la fin de la consolidation primaire.

Cette relation a l'inconvénient de ne pas présenter de limite finie : on admet généralement que le maximum du tassement du fluage est atteint au bout de dix ans. D'autres théories,

basées sur des descriptions plus complexes, donnent des tassements secondaires d'amplitude finie. Le plus connu de ces modèles est celui de Gibson et Lo [89], qui donne pour tassement de fluage :

$$S_f = \Delta\sigma'_z H_0 b \quad (1.21)$$

où  $b$ , qui représente la compression secondaire, est déterminé par un essai oedométrique de longue durée.

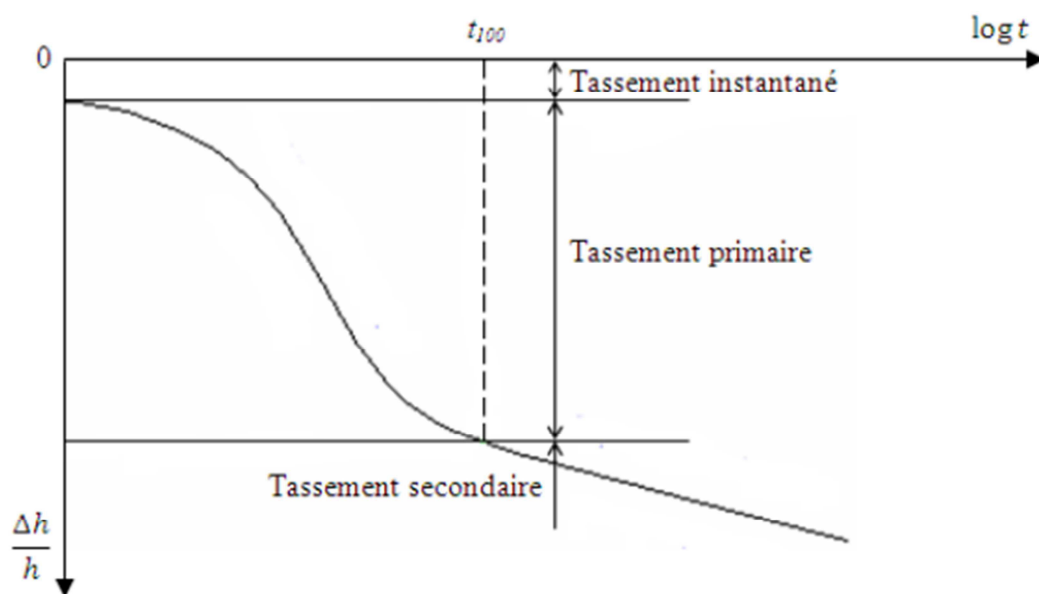


Figure (4.6) : Tassement secondaire. Méthode de Buisman-Koppejan [16]

### 2.3.5. Calcul du tassement dû aux déplacements latéraux

En l'état actuel des connaissances, il n'existe pas de méthode de calcul analytique pour la détermination de ce terme. Toutefois, on peut utiliser les résultats de Bourges et Mieussens [90] sur les déplacements latéraux sous les remblais, qui permettent de convertir le volume correspondant à ces déplacements en un tassement supplémentaire du sol (figure 4.7).

L'Aire  $A$  est égale à  $0.11 D S_{oed}$ ; le déplacement dû aux déplacements latéraux prend alors la valeur :

$$S_{lat} = \frac{0.11 D S_{oed}}{B} \quad (1.22)$$

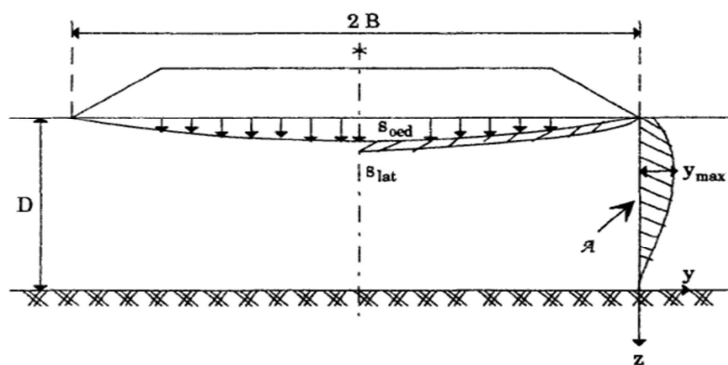


Figure (4.7): Méthode de calcul du tassement dû aux déplacements latéraux [17]

### 3. Cas d'un ouvrage réalisé en Algérie (Remblai routier traversant la sebkha du Chott El Hodna)

Le cas étudié concerne la réalisation du remblai routier d'environ 11 km traversant la sebkha du Chott El Hodna en Algérie (figure 4.1 a). Les observations in-situ du sol de sebkha ont montré que, en été la surface du sol est partiellement sèche et assez forte pour que les véhicules de poids très légers traversent la sebkha. Cependant, en hiver, la sebkha est inondée où la nappe phréatique peut surgir jusqu'à 60 cm au-dessus de la surface du sol. La faible portance du sol et la présence d'eau en surface ont posé de sérieuses difficultés de reconnaissance géotechnique. Par conséquent, la reconnaissance du sol a été accomplie seulement après la construction des deux premières couches du remblai séparées par un géotextile et renforcées par une géogrille. L'ouvrage a été présenté en détails dans la thèse de BERRABAH Fouad ([10]).

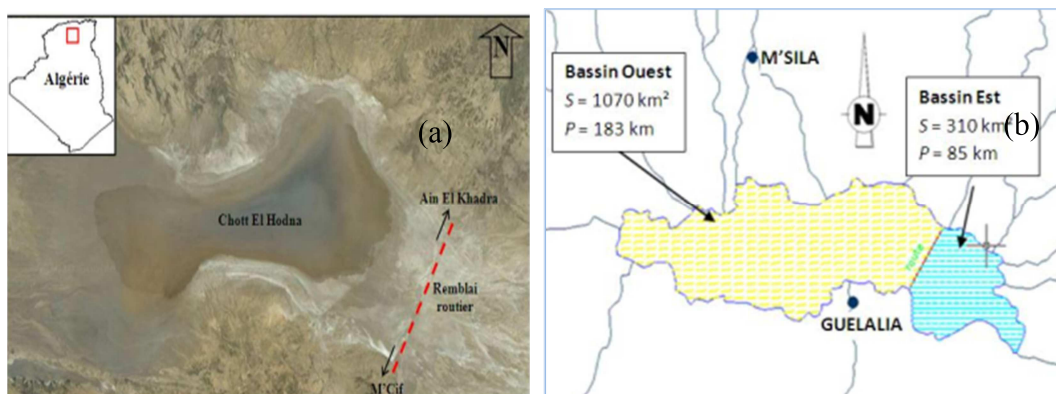


Figure (4.8) : (a) Situation du projet (b) Division du Chott en deux bassins

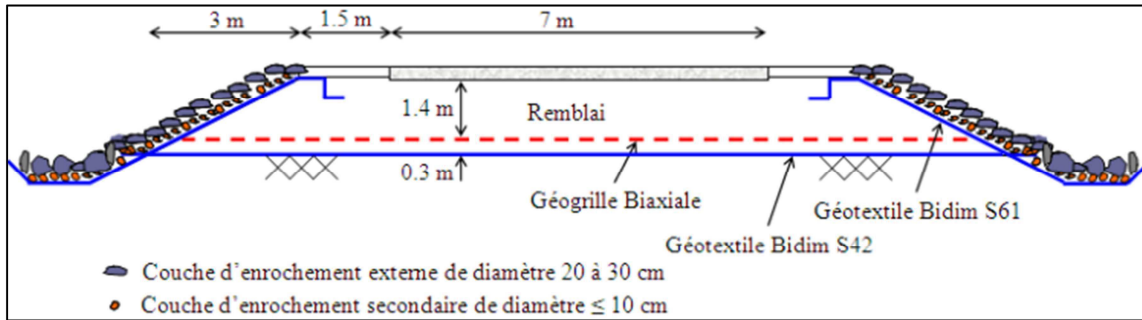


Figure (4.9) : Renforcement et protection du remblai [10]

Ces photos ci-dessous représentent l'ouvrage en phase de construction :

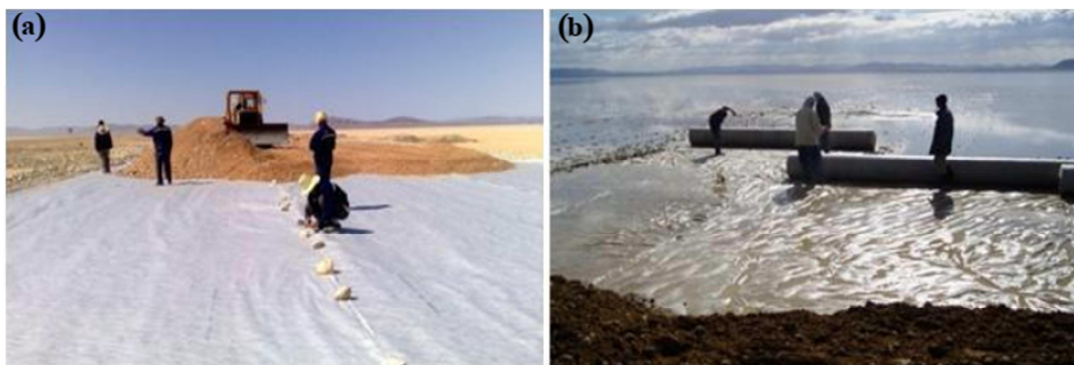


Figure (4.10): Pose de nappe de géotextile directement sur le sol de sebka : (a) état sec ; (b) état inondé[10]



Figure (4.11) : (a) Illustration de la surface plane avant la pose de géogrille (b) Mise en place de nappe de géogrille [10]

#### 4. Procédure de la simulation numérique

Afin d'étudier les comportements d'un remblai en sable renforcé par géosynthétique sur sol compressible, nous avons proposé un modèle numérique en éléments finis réalisé avec Plaxis 2D dans l'hypothèse d'un comportement bidimensionnel en déformations planes pour décrire

le comportement de cet ouvrage. Le modèle choisi a la même géométrie du remblai routier traversant la sebkha du Chott El Hodna, mais avec des autres paramètres pour les matériaux constitutifs. Ces paramètres se trouvent dans les exemples de la base de données de plaxis. Le maillage utilisé dans les calculs représente la moitié du remblai et du sol de fondation car le problème est symétrique (figure.4.12).

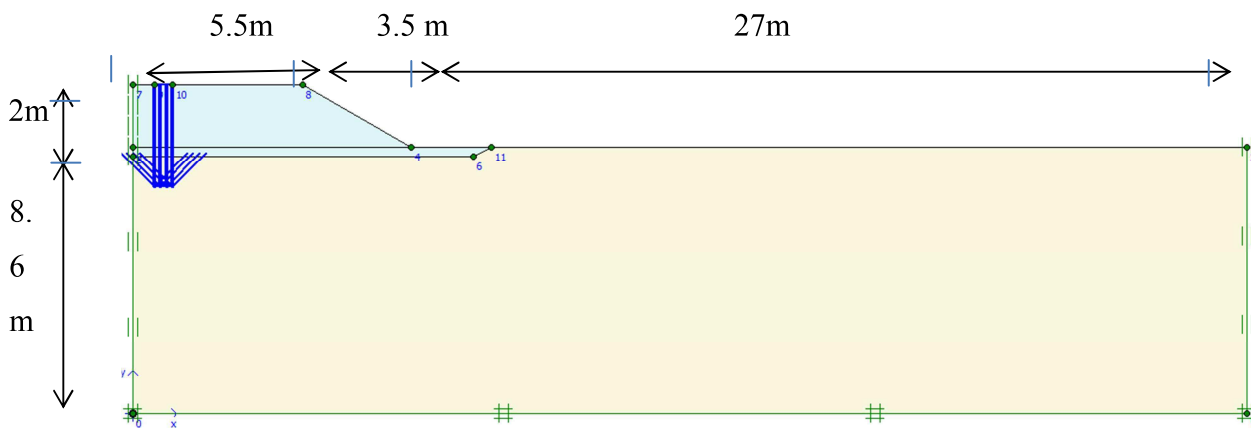


Figure (4.12): Géométrie du problème pour le sol non renforcé.

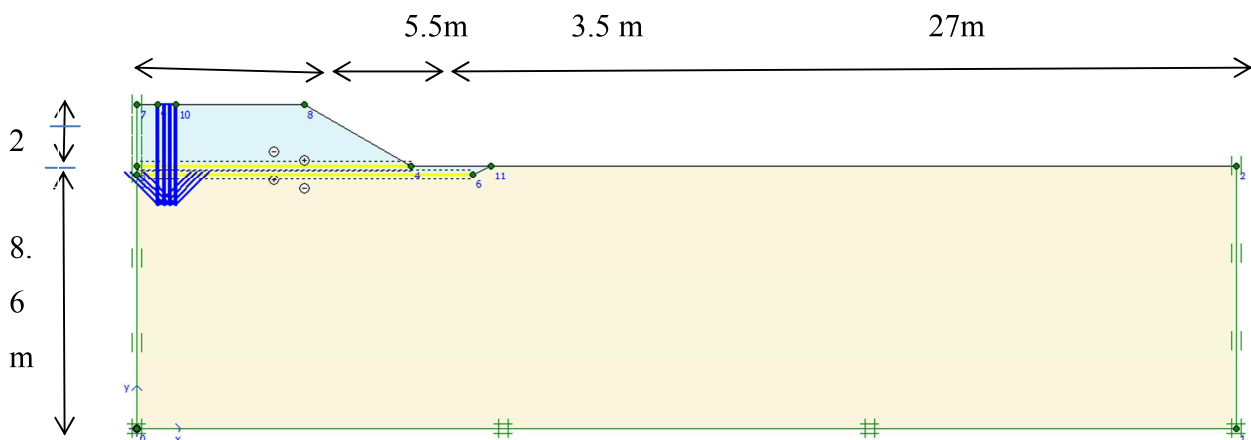


Figure (4.13) : Géométrie du problème pour le sol renforcé.

## 4.1. Les caractéristiques générales du modèle

### 4.1.1. Matériaux constitutifs

#### a)-Caractéristique de sol

La procédure d'entrée des caractéristiques générales se fait en suivant les étapes suivantes :

Paramètre	Remblai sable	Argile vaseuse
Modèle de matériau	M-C	M-C
Type de comportement de matériau	Drainée	Non drainée
Poids volumique $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	18
Module d'Young effectif $E'$ (kN/m <sup>2</sup> )	3000	1000
Coefficient de Poisson effectif $\nu'$	0.3	0.33
Cohésion effective $C'$ (kN/m <sup>2</sup> )	1	4
Angle de frottement effectif $\phi'$ (°)	30	24
Angle de dilatance effectif $\psi'$ (°)	0	0

Tableau (4.1) : Paramètres du modèle de Mohr-Coulomb utilisés dans l'analyse par éléments finis

#### b)- Caractéristiques des géosynthétiques :

La seule propriété des géosynthétiques est la rigidité axiale élastique  $EA$  fournie par le fabricant des produits. Les valeurs  $EA$  utilisées dans cette analyse sont 1000 kN/m et 500kN/m pour la géogrille et le géotextile, respectivement. Le contact sol-géosynthétique est régi par des éléments d'interface ayant un comportement élastique parfaitement plastique de Mohr-Coulomb.

## 4.2. Géométrie

La génération du modèle d'éléments finis commence par la création du modèle géométrique, qui est à représentation du problème réel à étudier. Un modèle géométrique consiste en des points, des lignes et des couches.

### 4.2.1 Conditions aux limites

On a choisi les conditions aux limites par défaut, libres en vertical et bloquées au fond.

### 4.2.2 Conditions en déplacement

On a choisi dans ce problème d'imposer un déplacement vertical égal à 0,1 m correspondant à l'ornièrre admissible dans ce projet et la largeur moyenne de paires des roues de véhicule ont

été prises pour être de 0.6 m.

### 4.2.3 Génération de Maillage

L'icône "maillage" permet d'effectuer automatiquement le maillage du problème. Le maillage est présenté sur (Figure 4.13)

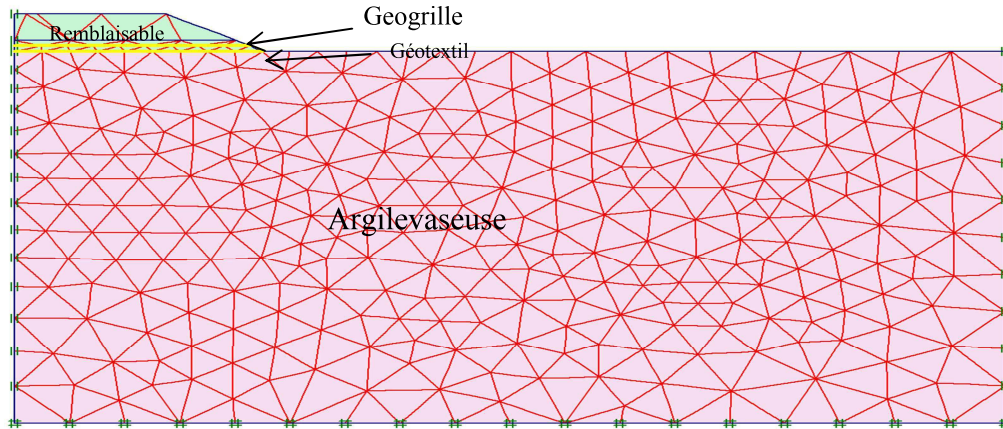
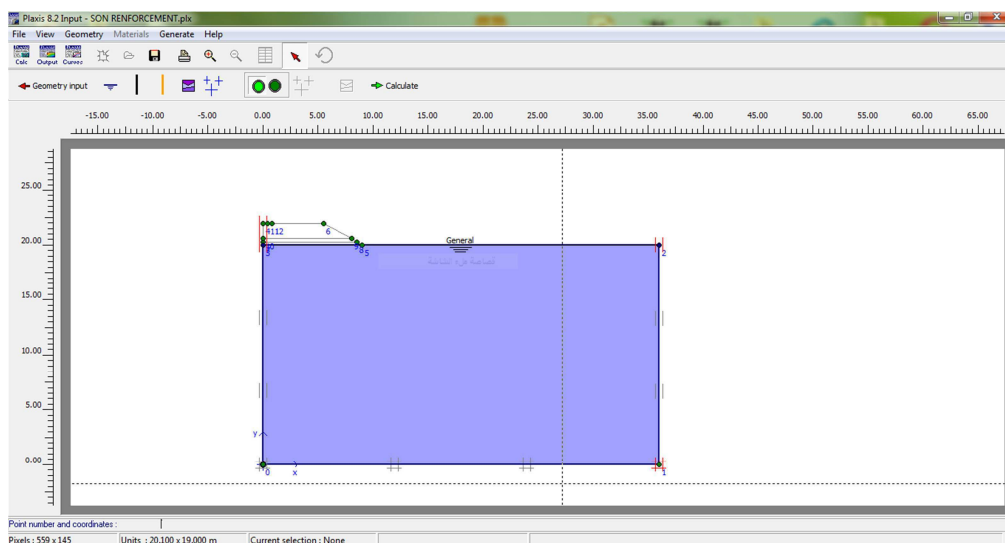


Figure (4.14) Maillage et conditions aux limites du remblai renforcé sur sol mou

### 4.3 Conditions initiales

Une fois le modèle géométrique créé et le maillage d'éléments finis généré, l'état de contraintes initiales et la configuration initiale doivent être spécifiés. Les conditions initiales sont constituées de deux modes différents, l'un pour générer les pressions interstitielles initiales (modèles conditions hydrauliques) et l'autre pour spécifier la configuration géométrique initiale et générer le champ des contraintes effectives initiales (mode de configuration géométrique).



Figure( 4.15) : Initialisation des contraintes initiales avec la procédure K0.

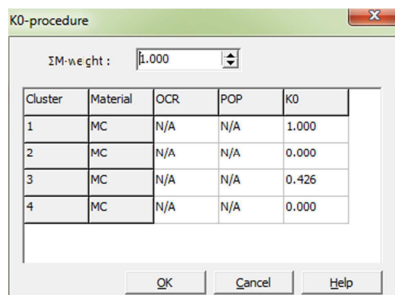


Figure (4.16) : Choix deK0.

Les contraintes initiales sont alors calculées.

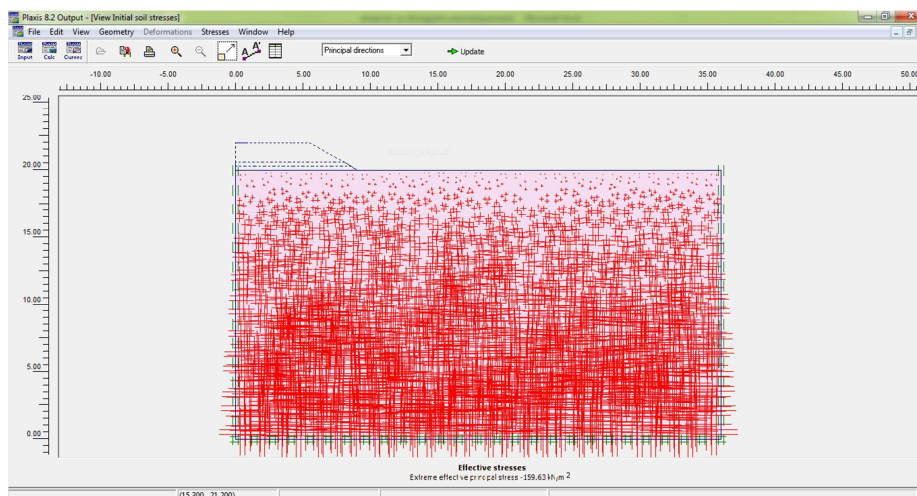


Figure (4.17) : Valeurs des contraintes initiales.

#### 4.4. Les calculs

Après la définition d'un modèle aux éléments finis, les calculs proprement dits peuvent être effectués.

##### a)- Général

On choisit un calcul plastique

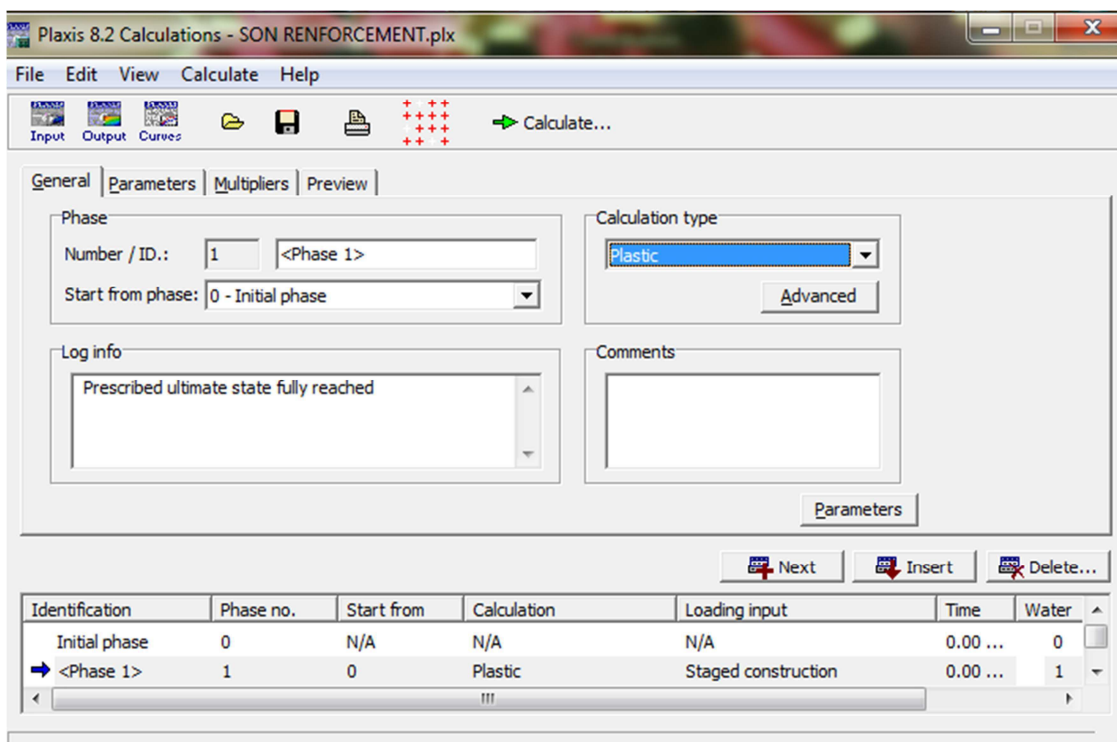


Figure (4.18) Menu général de calcul.

### b) - Paramètres

On choisit la construction par étape (staged construction) qui va permettre de revenir sur les écrans de dessin en cliquant sur le bouton « Define » : on va alors activer :

-Le déplacement prescrit et donner sa valeur de 0,1m vers le bas en double cliquant sur le déplacement imposé.

La nappe de géotextil.

-Les nappes de géogrilles selon le nombre désiré.

Puis on valide la définition de la phase par « Update ».

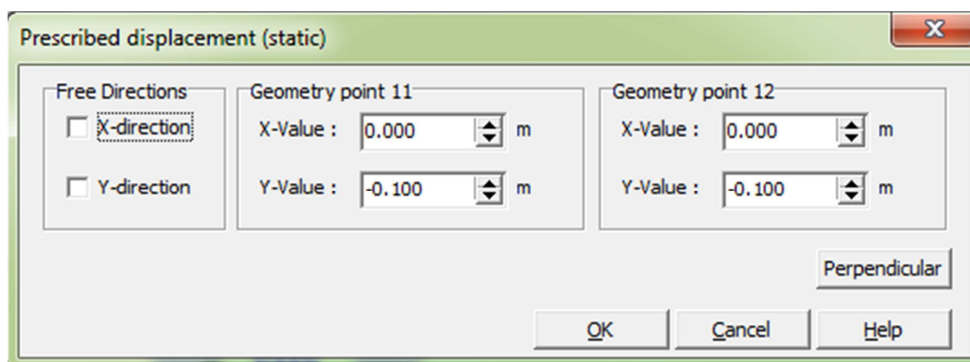


Figure (4.19) : Valeurs de déplacement imposé.

### c) - Points de contrôle

Il, ou est nécessaire de définir les points où l'on souhaite enregistrer au cours du calcul les contraintes, les déformations des déplacements.

Ces points sont importants à définir car on ne pourra tracer des courbes que pour ces points. Il est à noter que l'on peut choisir des points de déplacement et des points de contraintes. Pour notre cas ces points sont situés au centre au-dessus de la couche géogrilles A (0 ; 8.9) et B (0 ; 8.9)

### d) - Calcul

On peut alors lancer le calcul. Pendant celui-ci, une fenêtre d'information apparaît donnant l'évolution du calcul (**Figure 4.19**).

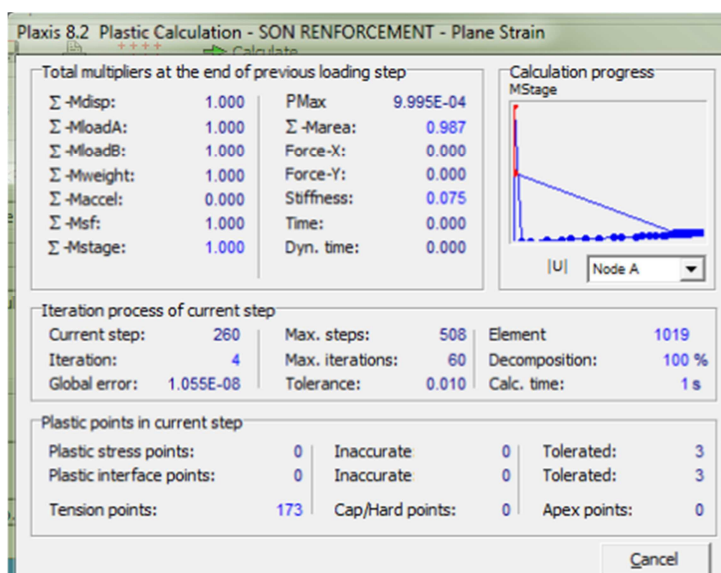


Figure (4.20) : Fenêtre d'évolution de calcul.

## 5. Résultats de l'étude:

### 5.1. Effet du renforcement sur le tassement absolu

Les vecteurs de déplacement à la fin de la construction sont indiqués sur la figure 4.20 pour le remblai renforcé et non renforcé. Les vecteurs de déplacement donnent bien l'allure des ruptures observées en remblais sur sols mous pour les deux cas. On peut observer que l'intensité des vecteurs de déplacement dans le remblai non renforcé est évidemment très significative comparée au remblai renforcé.

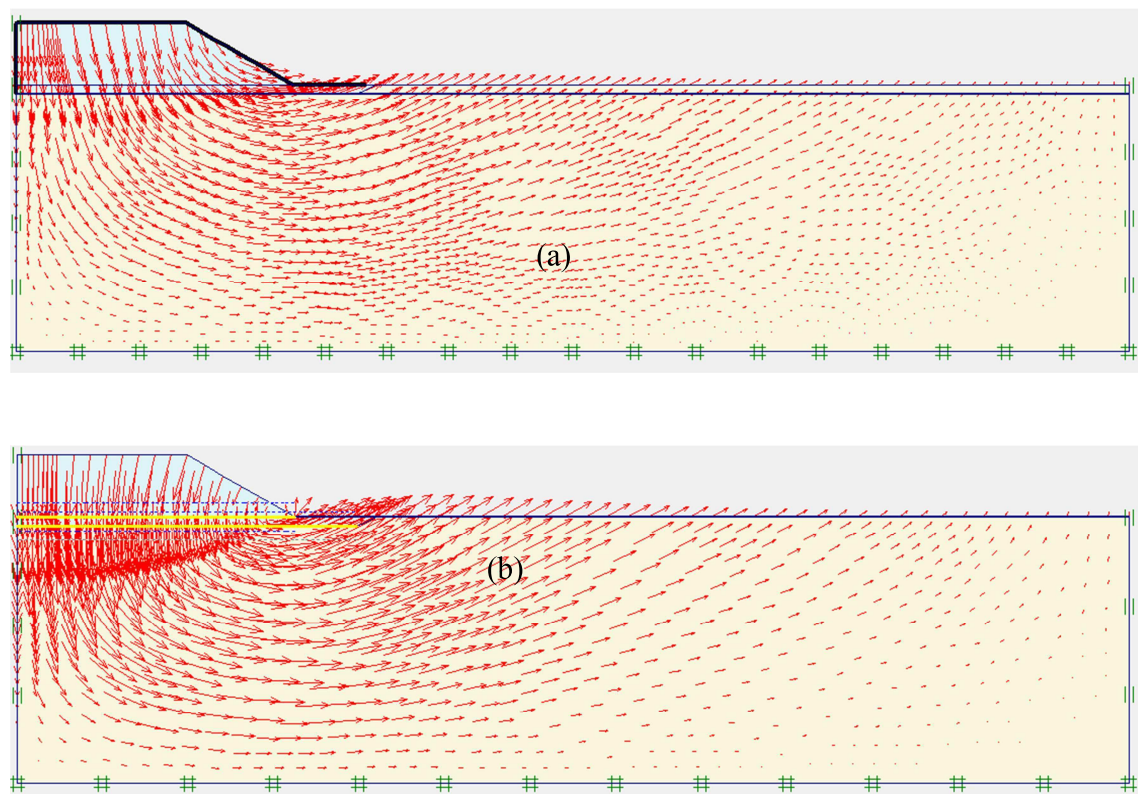


Figure (4.21) : Vecteurs de déplacement (même échelle) après la construction du remblai : (a) remblai non renforcé ; (b) remblai renforcé

En ce qui concerne l'effet du renforcement par des géosynthétiques sur le tassement absolu est faible, le tassement maximal calculé sous l'effet du poids propre de remblai diminué de 13 cm (sans renforcement) à 9.60 cm (avec renforcement) une diminution de 26%.

## 5.2. Effet du renforcement sur la stabilité du remblai

La figure 4.21 montre l'effet du renforcement par des géosynthétiques sur l'amélioration de la stabilité du remblai après la construction. Dans le cas d'un remblai renforcé, la stabilité globale augmente de manière significative, qui est principalement due à la résistance du renforcement elle-même. L'augmentation de la résistance de sol causée par la présence du géosynthétique n'étant pas significative. Comme le montre la figure 4. 21, le coefficient de sécurité augmente de 1.27 (sans renforcement) à 1.60 (avec renforcement). Ces résultats montrent que l'amélioration de la stabilité vis-à-vis de la rupture du remblai en fin de construction, apportée par le renforcement, est de 26 %

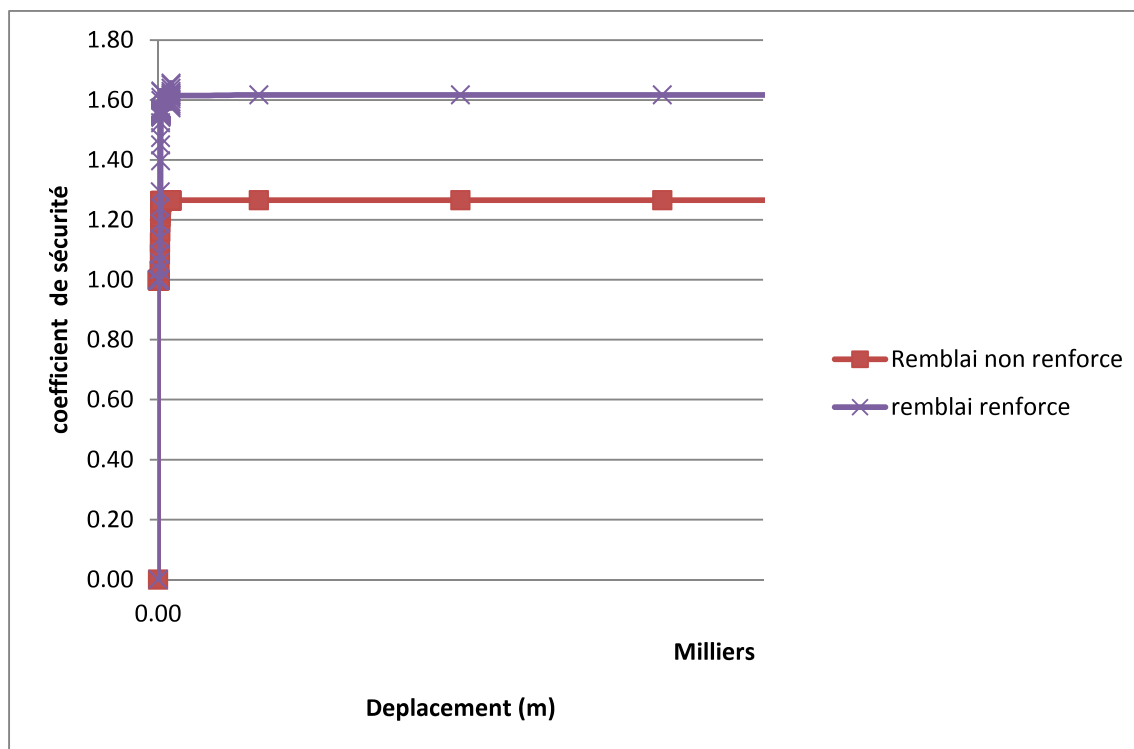


Figure (4.22) : Comparaison entre le coefficient de sécurité d'un remblai non renforcé et renforcé

## 6. Etude paramétrique

### 6.1. Effet de nombre des nappes de géogrilles

Afin d'étudier l'influence de nombre des nappes de géogrilles, on a fait varier le nombre des couches.

La figure 4.22 montre l'effet de nombre des nappes de géogrilles sur l'amélioration de la stabilité du remblai. L'augmentation de la stabilité globale causée par L'augmentation nombre des nappes de géogrilles n'étant pas significative. Comme le montre la figure 4.39, le coefficient de sécurité augmente de 1.56 (une nappe) à 1.72 (quatre nappes).

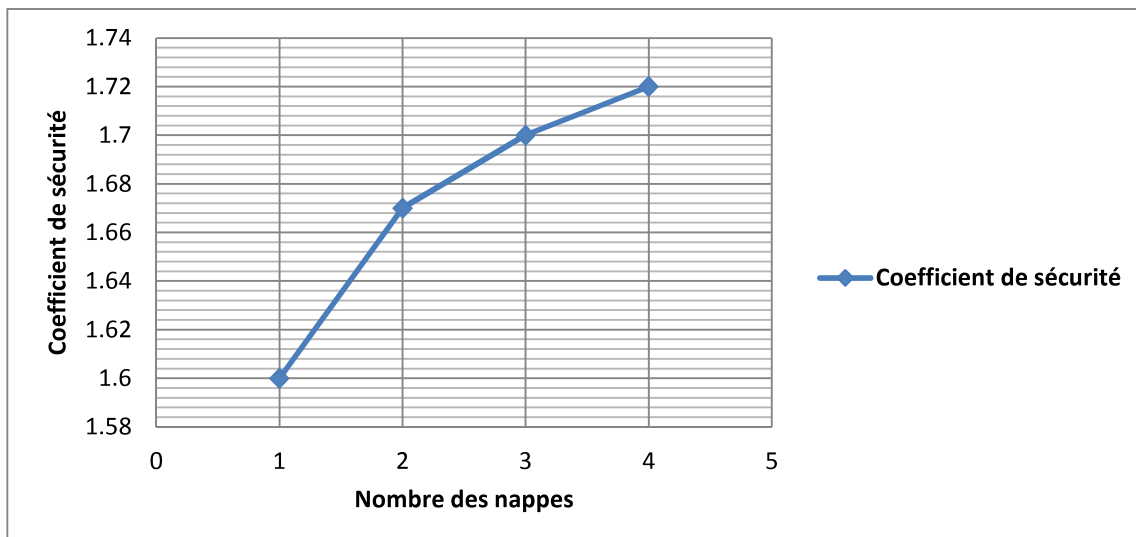


Figure (4.23): Effet du nombre des nappes de géogrilles sur l'amélioration de la stabilité du remblai

## 6.2. Effet de la variation de l'espacement entre les nappes de géogrilles

Pour étudier l'influence de l'espacement entre les nappes de géogrilles nous proposons d'étudier les valeurs suivantes de  $e$  (0.30 ; 0.40 ; 0.50 ; 0.60 et 0.70m) pour un remblai renforcé par trois nappes.

La figure 4.23 montre l'effet l'espacement entre les nappes sur le facteur de sécurité de remblai renforcé avec trois nappes des géogrilles.

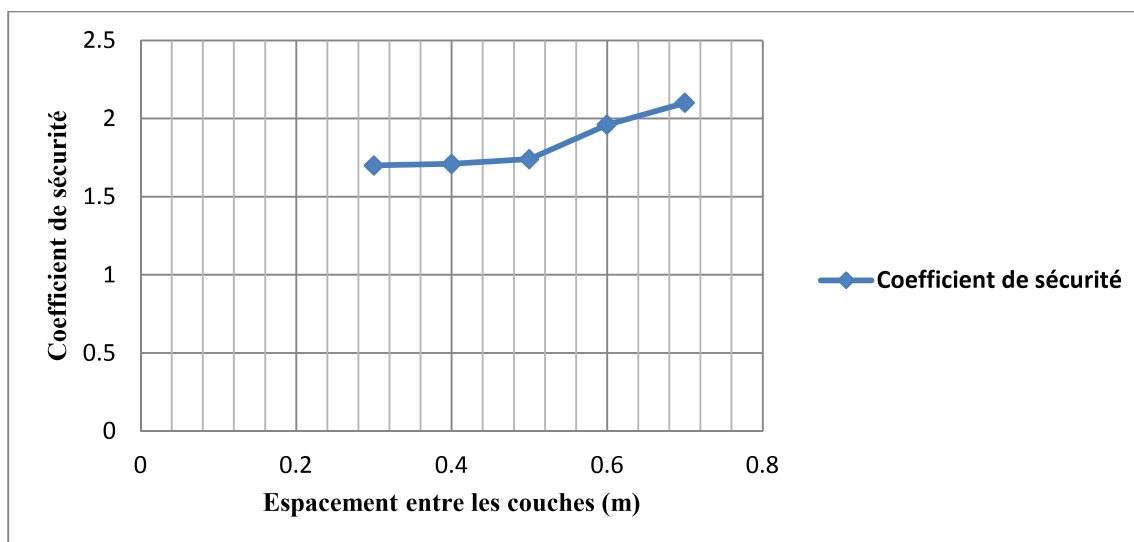


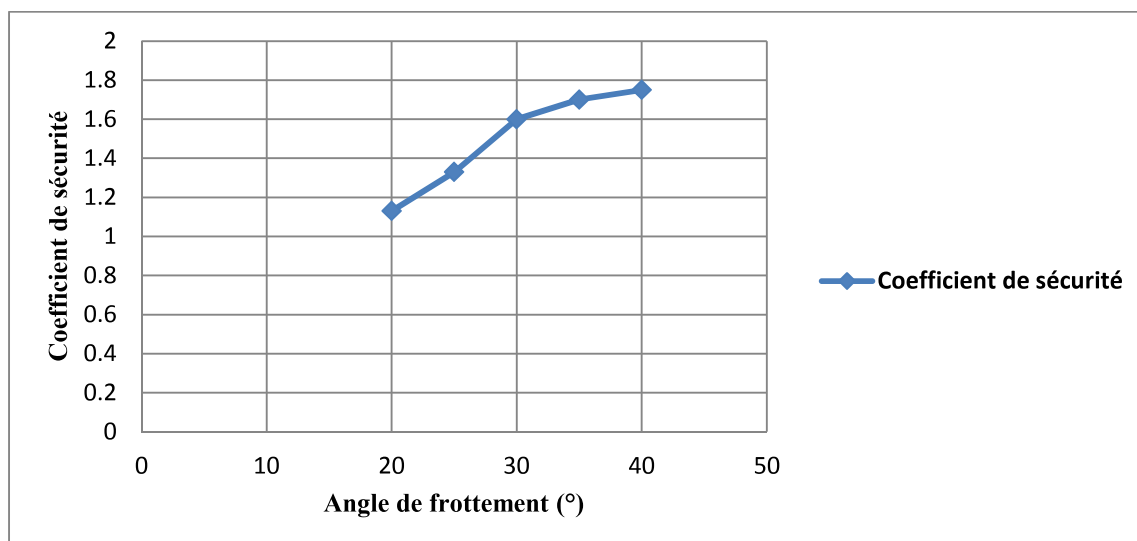
Figure (4.24): Effet de l'espacement entre les couches des sur le coefficient de sécurité d'un remblai

Comme le montre la figure 4.23, le facteur de sécurité augmente de 1.7 (espacement de 30cm) à 2.1 (espacement de 70cm). Cette amélioration du facteur de sécurité est expliquée par l'augmentation de l'espacement entre les nappes permet de distribuer les nappes sur toute la hauteur de remblai.

### 6.3. Effet de la variation de l'angle de frottement du sable

Afin d'étudier l'influence de l'angle de frottement du sable  $\phi$ , on a fait varier l'angle avec plusieurs valeurs ( $20^\circ$  ;  $25^\circ$  ;  $30^\circ$  et  $40^\circ$ ). Les résultats sont présentés sur la Figure 4.24.

À partir de ces résultats on peut constater que le changement de l'angle de frottement conduit à une influence importante sur la stabilité du remblai. En effet, l'augmentation de l'angle de frottement en passant d'une valeur de  $20^\circ$  à  $40^\circ$  augmente le coefficient de sécurité de 1.13 à 1.75 une augmentation de 55%.



**Figure (4.25):** Effet de l'angle de frottement du sable  $\phi$  sur l'amélioration de la stabilité du remblai

## 7. Conclusion:

L'observation du déroulement des travaux et l'analyse des résultats de reconnaissance géotechnique et les résultats des simulations numériques permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La présence du renforcement à la base du remblai améliore la stabilité du remblai après la construction ;
- La présence du renforcement à la base du remblai diminue le tassement du remblai ;

- L'augmentation du nombre des nappes géosynthétiques améliore la stabilité du remblai ;
- En cas de renforcement par plusieurs nappes de géosynthétiques la position des nappes elle est très importante ;
- L'angle de frottement présente une influence très importante la stabilité du remblai.

## Conclusion

L'étude présentée dans ce mémoire avait pour finalité étude numérique du comportement d'un sable renforcée par géosynthétique. Avec une étude d'un cas du remblai routier en sable renforcé par géosynthétique sur sol compressible.

Cette étude a permis dans une première étape d'exposer les différents type de renforcement de sol et différents type de géosynthétique. Dans une seconde étape, cette étude a permis de mettre en œuvre outils numériques le code de calcul en éléments finis PLAXIS pour l'analyse en déformations. Le code d'éléments finis PLAXIS a été utilisé dans cette mémoire pour évaluer l'effet du renforcement par géosynthétiques sur la stabilité et le tassement du remblai routier. L'analyse numérique a été faite en petite déformation avec l'hypothèse d'un comportement bidimensionnel en déformation plane. Le modèle de comportement adopté pour les sols de fondation et le massif de remblai est le modèle Mohr-Coulomb (MC) encodé dans PLAXIS.

les résultats des simulations numériques permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La présence du renforcement à la base du remblai améliore la stabilité du remblai après la construction ;
- La présence du renforcement à la base du remblai diminue le tassement du remblai ;
- L'augmentation du nombre des nappes géosynthétiques améliore la stabilité du remblai ;
- En cas de renforcement par plusieurs nappes de géosynthétiques la position des nappes elle est très importante ;
- L'angle de frottement présente une influence très importante la stabilité du remblai.

En conclusion, il est évident que les formulations numériques sont mieux placées pour aborder de tels problèmes complexes et le recours à des essais expérimentaux complète utilement les résultats numériques.

## Références bibliographiques

- [1] Haouam Houda, Etude numerique d'un mur de soutènement en sol stabilise renforce avec fibres et géogrilles, mémoire de Magistère, Université D'Annaba, 2010.p 4
- [2] Jean-Pierre MAGNAN (LCPC) et Yves GUIDOUX (SETRA).Etude et réalisation des remblais sur sols compressibles. Guide technique. Novembre 2000
- [3] Holtz R.D. Geosynthetics for soil reinforcement. The 9th Spencer J. Buchanan Lecture, University of Washington Department of Civil & Environmental Engineering, November 2001.
- [4] <http://www.geosyntheticssociety.org/wp-content/plugins/resources/documents/Classification/french.pdf>
- [5] <http://www.geosyntheticssociety.org/wp-content/plugins/resources/documents/Functions/french.pdf>
- [6] <http://www.geosyntheticssociety.org/wp-content/plugins/resources/documents/Embankment/french.pdf>
- [7] <http://www.cfg.asso.fr/sites/all/ligs/route-non-revetue.pdf>.
- [8] M.I.M.PINTO, applications of geosynthetics for soil reinforcement, ground improvement N° 2, (2003),61-72.
- [9] R. Al-Khoury and All.“Plaxis“. *Delft University of Technology & PLAXIS bv, PaysBas.2003.*
- [10] Berrabah Fouad. Évaluation numérique de l'effet du renforcement par nappes de géosynthétique sur la stabilité et le tassement des remblais sur sol compressible. Thèse Doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra. 2015
- [11] Christopher B.R., Holtz R.R. Geotextile engineering manuel. Report No. FHWA-TS 86/203, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1985.
- [12] Bonaparte R., Christopher B.R. Design and construction of reinforced embankments over weak foundations. Proceedings of the Symposium on Reinforced Layered Systems, Transportation Research Record 1153, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1987, 26-39.
- [13] Bourges F. Cours de mécanique des sols II. Cha. 2 : Remblais sur sols compressibles, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1976.
- [14] Giroud J.P. Tables pour le calcul des fondations. Tome II, Dunod, Paris, 1973
- [15] Osterberg J.O. Influence values for vertical stresses in a semi-infinite mass due to embankment loading. In: Proceedings of 4th ICSMFE, Londres, 1957, 393-394.

- [16] Koppejan A.W. A formule combining the Terzaghi load compression relationship and the Buisman secular time effect. In: Proceedings of 2th. Int. Conf. Soil Mech. Found. Engerg., Rotterdam, 1948
- [17] ourges F., Mieussens C. Déplacements latéraux à proximité des remblais sur sols compressibles, Méthodes de prévision. Bulletin de liaison des L.P.C., Paris, N° 101, 1979; 73-100