

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'obtention du diplôme de master
de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Thème

**Modélisation numérique du comportement
d'un sol renforcé par des inclusions rigides
sous des fondations superficielles**

Présenté par :

M^r IDDIR L'hadi

Devant le jury composé de :

Mr DEHMOUS Hocine	Maitre de conférences à l'UMMTO	Président.
Mr MERAKEB Seddik	Maitre de conférences à l'UMMTO	Examinateur.
Mr KAHIL Amar	Professeur à l'UMMTO	Encadrant.
Mme MEZIANI Faroudja	Maitre de conférences à l'UMMTO	Invitée.

Promotion : 2024/2025

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur KAHIL Amar, professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour la qualité de son encadrement, sa disponibilité, ses conseils pertinents et son accompagnement constant tout au long de ce travail. Ses qualités humaines, son sérieux, son écoute, sa bienveillance et son exigence ont constitué une véritable source de motivation et d'apprentissage. Je lui en suis sincèrement reconnaissant.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur DEHMOUS Hocine maître de conférences à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de cette soutenance. Sa présence témoigne de l'intérêt qu'il porte à mon travail, ce qui m'honore profondément.

Je remercie aussi Monsieur MERAKEB Seddik maître de conférences à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour le temps qu'il a consacré à son analyse.

Je tiens à remercier Madame MEZIANI Faroudja maître de conférences à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour son soutien et sa présence.

Mes remerciements les plus sincères vont à mes parents, qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours universitaire, tant moralement que matériellement. J'exprime également ma profonde reconnaissance à toute ma famille pour leur soutien, leur présence et leurs encouragements constants.

Je souhaite également remercier tous mes amis, ainsi que mes camarades de la spécialité géotechnique, pour les échanges, l'entraide et les bons moments partagés durant cette formation.

Enfin, je remercie toutes les personnes, de près ou de loin, ayant contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma famille, à mes
proches et à mes amis.

Résumé

Le sol constitue un élément fondamental en génie civil, servant de support essentiel aux infrastructures tout en garantissant leur stabilité à long terme. Cependant, lorsque ses caractéristiques mécaniques présentent des insuffisances, notamment en termes de portance ou de compressibilité, des techniques d'amélioration deviennent indispensables. Cette étude se concentre sur l'efficacité des inclusions rigides combinées à un matelas de transfert de charge, une technique éprouvée pour réduire les tassements et mieux répartir les charges vers les zones plus rigide du sol. À travers une modélisation numérique réalisée avec PLAXIS 2D, nous analysons l'impact de cette technique sur les tassements et les déplacements horizontaux sous des fondations superficielles. Les résultats montrent une réduction notable des déformations, confirmant son utilité pour les projets réalisés sur des sols compressibles.

Mots clés

Fondations superficielles, amélioration des sols, inclusions rigides, matelas de transfert de charge, tassements, déplacements horizontaux, Plaxis.

Abstract

Soil is a fundamental component in civil engineering, serving as the essential support for infrastructure while ensuring its long-term stability. However, when its mechanical properties are insufficient—particularly in terms of bearing capacity or compressibility—soil improvement techniques become necessary. This study focuses on the effectiveness of rigid inclusions combined with a load transfer platform, a proven method for reducing settlements and redistributing loads toward the stiffer zones of the soil. Through numerical modeling performed with PLAXIS 2D, we analyze the impact of this technique on settlements and horizontal displacements beneath shallow foundations. The results demonstrate a significant reduction in deformations, confirming the relevance of this method for projects built on compressible soils.

Keywords

Shallow foundations, soil improvement, rigid inclusions, load transfer platform, settlements, horizontal displacements, PLAXIS.

Liste des figures

Chapitre 1 : Généralités sur les fondations superficielles

Figure 1.1.	Semelle isolée.	4
Figure 1.2.	Semelle filante.	4
Figure 1.3.	Radier.	5
Figure 1.4.	Béton.	6
Figure 1.5.	Barres à haute adhérence.	7
Figure 1.6.	Tassements admissibles.	8
Figure 1.7.	Fissures des structures sous l'effet du tassement causé par les sollicitations dynamiques.	9
Figure 1.8.	Fissures dues aux tassements.	9
Figure 1.9.	Affaissement causé par une faible capacité portante.	10
Figure 1.10.	Affaissement.	11
Figure 1.11.	Glissement de terrain.	11
Figure 1.12.	Effets d'un séisme sur les structures.	12
Figure 1.13.	Liquéfaction du sol.	12

Chapitre 2 : Techniques d'amélioration des sols

Figure 2.1.	Relations de phase : (a) squelette du sol, (b) diagramme de phase (Das, 2011).	14
Figure 2.2.	Altération de la roche.	15
Figure 2.3.	Cycle des roches (Knappett, 2012).	16
Figure 2.4.	Taille des particules du sol.	17
Figure 2.5.	Effets de l'érosion sur le sol.	18
Figure 2.6.	Comparaison du tassement avant et après amélioration du sol.	18
Figure 2.7.	Système de drainage des eaux autour des fondations.	20
Figure 2.8.	Traitement des sols à la chaux.	20
Figure 2.9.	Applicabilité des techniques d'amélioration des sols en place en fonction de leur granulométrie (Bouassida, 2015).	21
Figure 2.10.	Préchargement.	22
Figure 2.11.	Impact de la compaction sur le sol.	23
Figure 2.12.	Courbe de compactage Proctor.	24
Figure 2.13.	Matériel utilisé pour le compactage superficiel : a) Rouleau compacteur à impact, b) Plaque vibrante, c) Rouleau à jante lisse.	25
Figure 2.14.	Compactage des sols par explosion.	26
Figure 2.15.	Compactage dynamique.	26
Figure 2.16.	Vibrocompactage.	27
Figure 2.17.	Vibro-remplacement.	27
Figure 2.18.	Rabattement de la nappe.	29
Figure 2.19.	Drainage superficiel (puisard)	29
Figure 2.20.	Puits sec.	30
Figure 2.21.	Principes de l'électroosmose (Das, 2008).	31
Figure 2.22.	Amélioration des sols par ajout chimique sur chantier (Hausmann, 1990).	32
Figure 2.23.	Centrale de malaxage.	33
Figure 2.24.	Cycle de production de la chaux à partir du calcaire.	33
Figure 2.25.	Opération de malaxage de la chaux avec le sol in situ.	34
Figure 2.26.	Opération de malaxage du ciment avec le sol in situ.	35

Figure 2.27.	Principe de la désorption thermique.	36
--------------	--------------------------------------	----

Chapitre 3 : Amélioration des sols par des inclusions rigides

Figure 3.1.	Inclusions rigides.	38
Figure 3.2.	Domaine d'application de la technique de renforcement par inclusions rigide (Briançon, 2002).	40
Figure 3.3.	Colonnes ballastées.	41
Figure 3.4.	Mise en œuvre des colonnes ballastées.	41
Figure 3.5.	Pieux forés.	42
Figure 3.6.	Procédé de mise en œuvre des pieux forés.	43
Figure 3.7.	Technique de jet grouting.	43
Figure 3.8.	Procédé de mise en œuvre du Jet Grouting.	44
Figure 3.9.	Technique de soil mixing.	44
Figure 3.10.	Méthode deep soil mixing in situ (Raju & Valluri, 2008).	45
Figure 3.11.	Technique d'inclusions rigides préfabriquées.	45
Figure 3.12.	Processus de mise en place d'un pieu battu par battage.	46
Figure 3.13.	Principe du renforcement des sols par inclusions rigides (Ferber, Bourguet, Ouvry, Cibot, & Gautier-Bret, 2015).	46
Figure 3.14.	Schéma de la zone de confinement au-dessus d'une inclusion rigide.	47
Figure 3.15.	Différents types de maillages pour les réseaux d'inclusions rigides a) maillage carré, b) maillage triangulaire (Dinh, 2009).	48
Figure 3.16.	Matelas de transfert de charges.	48
Figure 3.17.	Mécanisme du transfert de charge dans matelas (Girout et al., 2013).	49
Figure 3.18.	Têtes d'inclusions.	50
Figure 3.19.	Dalettes des inclusions rigides.	50
Figure 3.20.	Frottements positif et négatif (ASIRI, 2012).	51
Figure 3.21.	Plate-forme de travail.	54

Chapitre 4 : Introduction à la méthode des éléments finis et présentation de PLAXIS 2D

Figure 4.1.	Éléments finis 2D typiques.	59
Figure 4.2.	Interface du module input PLAXIS 2D.	63
Figure 4.3.	Interface du module output PLAXIS 2D.	64
Figure 4.4.	Lois de comportement qui existent dans PLAXIS 2D.	65
Figure 4.5.	Loi contrainte-déformation du modèle Mohr-Coulomb (élasto-plastique parfait) (Lambert & Remeysen).	65
Figure 4.6.	Courbe contrainte-déformation en élasticité linéaire réversible.	66
Figure 4.7.	Relation contrainte-déformation hyperbolique dans le chargement primaire pour un essai triaxial drainé standard (Schanz, Vermeer, & Bonnier, 2019).	66
Figure 4.8.	Éléments structurels disponibles dans PLAXIS 2D.	67

Chapitre 5 : Présentation du modèle d'étude et analyse des résultats

Figure 5.1.	Géométrie du modèle dans PLAXIS 2D.	70
Figure 5.2.	Maillage et conditions aux limites du modèle.	72
Figure 5.3.	Conditions hydrauliques du modèle.	73
Figure 5.4.	Schéma des profils analysés.	73
Figure 5.5.	Evolution des tassements selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 1 (L = 21.5 m).	74

Figure 5.6.	Evolution des tassements selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 2 (L = 25.0 m).	74
Figure 5.7.	Evolution des tassements selon la longueur sous les fondations au profil horizontal 1 (H = 0.6 m).	75
Figure 5.8.	Evolution des tassements selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 1 (L = 21.5 m).	75
Figure 5.9.	Evolution des tassements selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 2 (L = 25.0 m).	76
Figure 5.10.	Evolution des tassements selon la longueur sous les fondations au profil horizontal 1 (H = 0.6 m).	77
Figure 5.11.	Evolution des tassements selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 1 (L = 21.5 m).	77
Figure 5.12.	Comparaison des tassements maximaux selon les types de renforcement au profil vertical 1 (21.5 m).	78
Figure 5.13.	Evolution des tassements selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 2 (L = 25.0 m).	79
Figure 5.14.	Comparaison des tassements maximaux selon les types de renforcement au profil vertical 2 (25 m).	80
Figure 5.15.	Evolution des tassements selon la longueur sous les fondations au profil horizontal 1 (H = 0.6 m).	80
Figure 5.16.	Comparaison des tassements maximaux selon les types de renforcement au profil horizontal 1 (H= 0.6 m).	81
Figure 5.17.	Evolution des déplacements horizontaux selon la longueur sous les fondations au profil horizontal 1 (H = 0.6 m).	82
Figure 5.18.	Evolution des déplacements horizontaux selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 1 (L = 21.5 m).	82
Figure 5.19.	Evolution des déplacements horizontaux selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 2 (L = 25.0 m).	83
Figure 5.20.	Evolution des déplacements horizontaux selon la longueur sous les fondations au profil horizontal 1 (H = 0.6 m).	84

Liste des tableaux

Chapitre 2 : Techniques d'amélioration des sols

Tableau 2.1	Exemples de critères techniques et environnementaux influençant le choix des méthodes d'amélioration des sols.	22
-------------	--	----

Chapitre 3 : Amélioration des sols par des inclusions rigides

Tableau 3.1	Quelques caractéristiques des principaux types d'inclusions répertoriées (ASIRI, 2012).	55
-------------	---	----

Chapitre 4 : Introduction à la méthode des éléments finis et présentation de PLAXIS 2D

Tableau 4.1	Types d'analyses géotechniques et leurs objectifs.	61
-------------	--	----

Chapitre 5 : Présentation du modèle d'étude et analyse des résultats

Tableau 5.1	Caractéristiques des couches de sol.	70
Tableau 5.2	Caractéristiques des fondations.	71
Tableau 5.3	Caractéristiques du matelas.	71
Tableau 5.4	Caractéristiques des inclusions.	72

Sommaire

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Résumé	iii
Listes des figures et tables	iv
Sommaire	viii
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur les fondations superficielles	
1.1. Introduction	3
1.2. Fondations en génie civil	3
1.3. Fondations superficielles	3
1.3.1. Types de fondations superficielles	4
A. Semelles isolées	4
B. Semelles filantes	4
C. Radier	5
1.3.2. Choix du type de fondation superficielle	5
1.3.3. Matériaux constitutifs des fondations superficielles	6
A. Matériaux cimentaires	6
B. Matériaux métalliques	7
1.3.4. Problèmes des fondations superficielles	7
A. Tassement	8
B. Capacité portante	9
C. Affaissement	10
D. Glissement	11
E. Sollicitations sismiques	12
1.4. Conclusion	13
Chapitre 2 : Techniques d'amélioration des sols	
2.1. Introduction	14
2.2. Sols	14
2.2.1. Origine des sols	15
A. Sols résiduels	16
B. Sols transportés	16
2.2.2. Rôle du sol dans la construction	16
2.2.3. Types de sols	17
2.2.4. Problèmes des sols	17
2.3. Amélioration des sols	18
2.3.1. But d'amélioration des sols	19
2.3.2. Techniques d'amélioration des sols	19
2.3.3. Choix de méthodes d'amélioration des sols	21
2.4. Amélioration des sols par préchargement	22
2.5. Amélioration des sols par modification mécanique	23
2.5.1. Compactage superficiel	24
2.5.2. Compactage en profondeur	25
A. Compactage des sols par explosion	26
B. Compactage dynamique	26

C. Vibrocompactage et vibro-remplacement	27
2.5.3. Compaction hydromécanique	28
2.6. Amélioration des sols par modification hydraulique	28
2.6.1. Méthodes de drainage superficiel	29
2.6.2. Méthodes de drainage profond	29
2.6.3. Drainage profond par injection	30
2.6.4. Électroosmose	31
2.7. Amélioration des sols par modification chimique et physique	32
2.7.1. Amélioration des sols par traitement à la chaux	33
2.7.2. Amélioration des sols par traitement au ciment	34
2.8. Amélioration des sols par modification thermique	35
2.8.1. Chauffage de surface du sol	36
2.8.2. Chauffage par forage	36
2.9. Amélioration des sols par inclusion	37
2.10. Conclusion	37
Chapitre 3 : Amélioration des sols par des inclusions rigides	
3.1. Introduction	38
3.2. Historique des inclusions rigides	39
3.3. Domaine d'application	3
3.4. Types d'inclusions	40
3.4.1. Inclusions semi-rigides / souples	40
A. Colonnes ballastées	40
3.4.2. Inclusions rigides	41
A. Pieux forés	42
B. Jet grouting	43
C. Soil mixing	44
D. Inclusions rigides préfabriquées	45
3.5. Principe de fonctionnement du renforcement par inclusions rigides	46
3.6. Mécanismes de transfert de charges	48
3.6.1. Matelas de transfert de charges	48
3.6.2. Têtes d'inclusions	49
3.6.3. Nappe de géosynthétique	50
3.6.4. Dalettes des inclusions rigides	50
3.6.5. Interaction sol-inclusion	54
3.7. Comportement des inclusions rigides	54
3.7.1. Comportement de l'inclusion rigide isolée	51
3.7.2. Comportement d'une inclusion rigide au sein d'un groupe	52
3.8. Dimensionnement du renforcement par inclusions rigides	52
3.8.1. Approches analytiques	52
3.8.2. Approches numériques	53
3.9. Mise en œuvre des inclusions rigides	53
3.9.1. Exécution de la plate-forme de travail	53
3.9.2. Exécution des inclusions rigides	54
3.9.3. Exécution des têtes d'inclusion et du dispositif de répartition	55
3.10. Avantages et inconvénients	55
3.11. Conclusion	5

Chapitre 4 : Introduction à la méthode des éléments finis et présentation de PLAXIS 2D

4.1. Introduction	57
4.2. Historique de la méthode des éléments finis	57
4.3. Domaine d'application	58
4.4. Application de la méthode des éléments finis	58
4.4.1. Discrétisation des éléments	58
4.4.2. Approximation de la variable principale	59
4.4.3. Équations d'élément	59
4.4.4. Équations globales	60
4.4.5. Conditions aux limites	60
4.4.6. Résoudre les équations globales	60
4.5. Avantages de la méthode des éléments finis	60
4.6. Limitations et optimisation de la méthode des éléments finis en géotechnique	61
4.7. Importance des logiciels en MEF	61
4.8. Présentation de Plaxis 2D	62
4.8.1. Origine et évolution du logiciel Plaxis	62
4.9. Modules et interfaces du logiciel Plaxis	62
4.9.1. Module input	63
4.9.2. Module calculs	63
4.9.3. Module output	64
4.10. Fonctionnalités et capacités de Plaxis	64
4.10.1. Lois de comportement des sols	64
A. Modelé Mohr-Coulomb	65
B. Modèle élastique linéaire	65
C. Modelé Hardening soil	66
D. Modelé Soft soil	66
4.10.2. Types d'analyses disponibles	67
4.10.3. Modélisation et maillage	68
4.11. Conclusion	68

Chapitre 5 : Présentation du modèle d'étude et analyse des résultats

5.1. Introduction	69
5.2. Prestation du cas d'étude	69
5.3. Caractéristiques géométriques du modèle étudié	69
5.4. Caractéristiques des matériaux	70
5.4.1. Caractéristiques du sol	70
5.4.2. Caractéristiques des fondations	71
5.4.3. Caractéristiques du matelas	71
5.4.4. Caractéristiques des inclusions rigides	71
5.5. Modélisation numérique	72
5.5.1. Paramètres généraux	72
5.5.2. Maillage et conditions aux limites	72
5.5.3. Conditions hydrauliques	72
5.6. Résultats et interprétations	73
A. Evolution des tassements	73
A.1. Sol naturel	73
A.2 Evolution des tassements sous le matelas	75

A.3 Influence des inclusions rigides et le matelas sur les tassements	77
B. Evolution des déplacements horizontaux	82
B.1. Analyse des tassements sous le matelas	82
B.2. Influence des inclusion rigides sur les déplacements horizontaux	82
5.7. Conclusion	85
Conclusion générale et perspectives	86
Références bibliographiques	87

Introduction générale

Dans tout projet de construction, la performance et la durabilité de l'ouvrage dépendent largement des caractéristiques géotechniques du site, qui conditionnent la réponse du sol aux charges imposées par la structure. La capacité du sol à supporter ces charges, ou sa portance, est un facteur déterminant pour garantir la stabilité des fondations et, par extension, celle de l'ensemble de l'ouvrage. Cette portance varie selon la nature du sol, sa compacité, son humidité, ainsi que la profondeur et la distribution des couches géologiques sous-jacentes. Un sol insuffisamment résistant peut entraîner des tassements excessifs, des déplacements horizontaux ou des déformations différentielles, compromettant ainsi la sécurité et la longévité de la structure.

Les fondations superficielles occupent une place centrale dans la construction, principalement en raison de leur simplicité de mise en œuvre et de leur coût relativement faible. Elles constituent souvent la solution idéale lorsque les conditions géotechniques du site sont favorables. Pourtant, la réalité du terrain est souvent plus complexe qu'il n'y paraît. Les sols peuvent manquer de portance, présenter une hétérogénéité marquée ou une compressibilité excessive. Dans ces cas, utiliser le sol naturel sans modification risquerait de menacer la stabilité de l'ouvrage.

Pour pallier ces insuffisances, plusieurs techniques de renforcement existent, adaptées aux caractéristiques du sol et aux besoins du projet. L'amélioration hydraulique, mécanique ou chimique reste une approche classique. Cependant, face aux exigences accrues de stabilité et de maîtrise des tassements, l'introduction d'inclusions rigides s'affirme comme une solution éprouvée. Elle renforce les sols médiocres en augmentant leur portance globale, tout en limitant les tassements et les déplacements horizontaux sous les fondations superficielles.

Cette méthode repose sur un principe astucieux. L'installation verticale d'éléments rigides dans le sol, permettant de transférer efficacement les charges vers des couches plus profondes et plus résistantes. Contrairement aux pieux classiques, ces inclusions ne sont pas directement liées à la structure. Elles agissent en interaction avec un matelas de répartition, placé entre les fondations et les têtes des inclusions. Ce matelas, souvent composé de granulats compactés, joue un rôle clé dans la répartition des charges et réduit les tassements différentiels en exploitant l'effet de voûte.

Analyser finement ces mécanismes complexes demande des outils performants. Les logiciels de modélisation, comme PLAXIS, permettent de simuler avec précision le comportement du système sol-fondation-renforts. Fondés sur la méthode des éléments finis, ils offrent une

analyse rigoureuse pour évaluer l'impact des inclusions rigides sur les tassements et la stabilité globale.

Ce mémoire présente une étude numérique approfondie réalisée à l'aide du logiciel PLAXIS, visant à analyser le comportement d'une fondation superficielle sur un sol renforcé par des inclusions rigides. L'objectif principal de cette étude est de mieux comprendre l'influence des inclusions rigides et du matelas de répartition des charges sur les tassements et les déplacements horizontaux sous les fondations superficielles.

Le mémoire est structuré comme suit :

- L'introduction générale expose le contexte, la problématique de l'étude, les objectifs poursuivis ainsi que la méthodologie adoptée.
- Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les fondations superficielles. Il présente les différents types de fondations ainsi que leurs principales problématiques.
- Le deuxième chapitre traite des différentes techniques d'amélioration des sols. Chaque méthode est expliquée en précisant son principe de fonctionnement.
- Le troisième chapitre porte sur les inclusions rigides. Il présente les différents types d'inclusions, leurs mécanismes de fonctionnement, ainsi que leurs avantages et limites dans le cadre de l'amélioration des sols sous fondations superficielles.
- Le quatrième chapitre expose les généralités sur la méthode des éléments finis et sur le logiciel PLAXIS. Ce chapitre décrit les bases de la modélisation numérique appliquée en géotechnique, ainsi que les principaux types d'analyses réalisables avec PLAXIS.
- Le cinquième chapitre est consacré à l'étude numérique. Une modélisation a été réalisée avec le logiciel PLAXIS pour analyser le comportement d'un sol renforcé par des inclusions rigides sous des fondations superficielles, permettant ainsi d'évaluer l'efficacité de cette solution.
- Enfin, une conclusion générale clôture ce mémoire en synthétisant les principaux résultats obtenus et en proposant des perspectives pour de futurs travaux.

Chapitre 1

Généralités sur les fondations superficielles

1.1. Introduction

En génie civil, assurer la stabilité des ouvrages est une priorité absolue pour garantir leur sécurité, leur durabilité et leur bon fonctionnement. Cette stabilité repose principalement sur la capacité des fondations à transmettre efficacement les charges des structures au sol tout en évitant des déformations excessives ou différenciées.

Parmi les différents types de fondations, les fondations superficielles sont largement utilisées, notamment en raison de leur simplicité de mise en œuvre et de leur coût économique. Elles sont particulièrement adaptées lorsque les sols proches de la surface offrent des caractéristiques mécaniques favorables. Cependant, ces fondations sont également associées à des défis importants dans le cas de sols compressibles ou hétérogènes, où les tassements peuvent entraîner des fissures, des désordres structurels, voire une instabilité globale des ouvrages.

1.2. Fondations en génie civil

Une fondation est un composant structurel qui transmet les charges d'une construction au sol qui la soutient (Budhu, 2010).

Elle doit permettre de répartir ces charges de manière uniforme tout en limitant les tassements et en assurant la stabilité de l'ouvrage, même en présence de conditions géotechniques variables.

On distingue deux principaux types de fondations : les fondations superficielles et les fondations profondes.

1.3. Fondations superficielles

Une fondation superficielle est un type de fondation qui repose directement sur les couches de sol proches de la surface, généralement à une faible profondeur. Elle est utilisée pour transmettre les charges d'une structure au sol sous-jacent lorsque celui-ci présente une résistance suffisante pour supporter ces charges.

Une semelle est qualifiée de superficielle lorsque le rapport $\frac{D}{B}$ est faible (< 0.5), et en particulier lorsque la justification de la fondation repose uniquement sur la résistance du sol situé sous le niveau d'assise. Lorsque ce rapport se situe entre 0.5 et 5, on parle alors de fondation semi-profonde (Philipponat, 1979).

Ces fondations sont choisies en fonction des caractéristiques du sol, des charges appliquées et de la configuration de la structure.

1.3.1. Types de fondations superficielles

A. Semelles isolées

Une semelle isolée (Figure 1.1) est un type de fondation superficielle placée sous une colonne ou un pilier afin de transférer les charges verticales de la structure vers le sol. Elle est généralement formée d'une plaque en béton armé, de forme carrée, rectangulaire ou circulaire, dont les dimensions dépendent à la fois des charges à supporter et de la capacité portante du sol.



Figure 1.1. Semelle isolée.

B. Semelles filantes

Les semelles filantes (Figure 1.2) sont des fondations continues positionnées sous les murs porteurs, répartissant les charges uniformément sur toute leur longueur. Leur large surface de contact les rend idéales pour des sols hétérogènes, car elles minimisent les risques de tassements différentiels. Essentielles pour garantir la stabilité d'un ouvrage, ces fondations sont couramment utilisées dans la construction de maisons pour assurer la transition entre le sol et la structure.



Figure 1.2. Semelle filante.

C. Radier

Un radier (Figure 1.3) est un type de fondation qui consiste en une dalle horizontale en béton armé, généralement de grande surface, destinée à supporter tout ou une partie d'un ouvrage, avec une largeur B pouvant atteindre plusieurs mètres. Ce type de fondation est utilisé dans des constructions telles que les bâtiments reposant sur du béton armé ou le fond d'un réservoir posé directement sur le sol (Philipponat, 1979). Agit comme une plaque rigide ou semi-rigide répartissant les charges de la superstructure sur l'ensemble de la surface de contact avec le sol.

Les radiers sont souvent préférés aux semelles lorsqu'il faut supporter plusieurs charges, ou lorsqu'il s'agit d'une fondation de grande envergure (Reese, Isenhower, & Wang, 2005).



Figure 1.3. Radier.

1.3.2. Choix du type de fondation superficielle

Pour choisir un type de fondation adapté, il est indispensable de commencer par recueillir des informations précises sur la superstructure et les charges qu'elle transmettra à la fondation. Il convient également d'analyser les caractéristiques du sol en place. À partir de ces données, on peut envisager l'implantation de différents types de fondations, en tenant compte de la capacité portante du sol, de sa stabilité, et des risques de tassements différentiels susceptibles d'affecter la structure. Cette première analyse permet d'écarter les solutions inappropriées en fonction des contraintes du projet.

Une fois un ou deux types de fondations présélectionnés, des études plus approfondies doivent être réalisées. Celles-ci consistent à affiner l'évaluation des charges, à caractériser plus précisément le sol, et à dimensionner les éléments de fondation comme les semelles. Elles incluent également des estimations du tassement pour anticiper le comportement réel de la structure en service. Enfin, une évaluation économique est nécessaire pour comparer

les différentes options, afin de retenir la solution la plus efficace et la plus rentable à long terme (Murthy, 2002).

1.3.3. Matériaux constitutifs des fondations superficielles

Afin d'assurer le rôle principal d'une fondation superficielle, la combinaison de plusieurs matériaux est essentielle pour garantir à la fois la résistance, la durabilité et l'adaptabilité aux conditions spécifiques du site. Chaque matériau utilisé dans la construction de ces fondations apporte des propriétés uniques qui contribuent au bon transfert des charges structurelles au sol. Par exemple, certains matériaux offrent une résistance mécanique élevée, tandis que d'autres améliorent la stabilité chimique ou protègent contre les agressions environnementales. Cette complémentarité permet d'optimiser les performances globales de la fondation en répondant aux exigences techniques, économiques et environnementales. Ainsi, la sélection et l'association judicieuse des matériaux jouent un rôle clé dans la construction de fondations superficielles robustes et pérennes.

Les principaux matériaux utilisés dans la composition des fondations sont les ajouts cimentaires et métallique

A. Matériaux cimentaires

Les matériaux cimentaires, incluant le béton (Figure 1.4) et ses dérivés, sont composés principalement de ciment, d'eau et de granulats. Ils sont utilisés pour leur capacité à résister à la compression et à transférer efficacement les charges des structures vers le sol.



Figure 1.4. Béton.

Dans le cadre des fondations superficielles, ces matériaux jouent un rôle fondamental en assurant la stabilité des fondations. Le béton, en particulier, est utilisé pour la réalisation de semelles isolées, filantes, ou encore de radiers, car il permet de répartir uniformément les charges et de prévenir les tassements excessifs. Leur résistance à la compression leur confère

une grande durabilité, bien que leur faible résistance à la traction nécessite l'ajout d'armatures métalliques pour renforcer leur efficacité. En résumé, les matériaux cimentaires sont essentiels pour assurer la stabilité et la sécurité des fondations superficielles dans de nombreux types de construction.

B. Matériaux métalliques

Les matériaux métalliques, tels que l'acier et l'aluminium, sont utilisés principalement en complément des matériaux cimentaires pour renforcer les fondations superficielles. Ces matériaux se distinguent par leur grande résistance à la traction, à la compression et à la flexion, ce qui en fait un choix idéal pour supporter les efforts mécaniques auxquels les fondations peuvent être soumises. Leur rôle principal consiste à renforcer la capacité portante des fondations en permettant de mieux répartir les charges et de limiter les déformations sous l'effet des sollicitations. Par exemple, l'acier est couramment utilisé sous forme d'armatures notamment sous forme de barres à haute adhérence (Figure 1.5), pour le béton armé, garantissant ainsi une structure combinée capable de résister efficacement aux contraintes de traction et de flexion. En somme, les matériaux métalliques sont indispensables pour renforcer et prolonger la durabilité des fondations superficielles.



Figure 1.5. Barres à haute adhérence.

1.3.4. Problèmes des fondations superficielles

Les fondations superficielles peuvent présenter plusieurs problèmes, ce qui peut compromettre la stabilité des ouvrages. Les problèmes principaux sont les suivants : Tassement, capacité portante, affaissement, glissement, sollicitations sismiques.

A. Tassement

Les tassements (Figure 1.6) désignent les déplacements verticaux vers le bas à la surface du sol ou d'une structure. Ils résultent généralement de l'application de charges structurelles sur la fondation, entraînant la compression du sol ou de la roche de support. Toutefois, en plus des tassements liés aux charges, d'autres causes, isolées ou combinées, peuvent également provoquer des tassements des fondations (Baban, 2016).

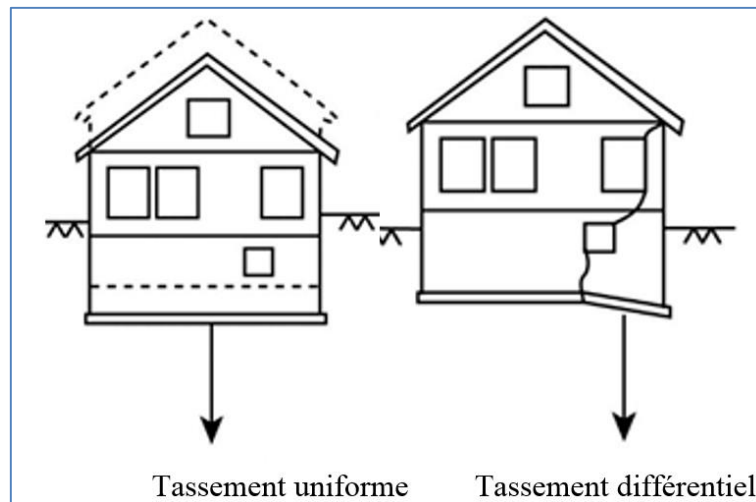


Figure 1.6. Tassements admissibles.

Les tassements des sols peuvent être causés par une multitude de facteurs. Parmi les plus courants, on retrouve les variations saisonnières qui affectent les sols expansifs : ceux-ci gonflent lorsqu'ils absorbent de l'eau et se rétractent en période de sécheresse. L'abaissement de la nappe phréatique joue également un rôle important, provoquant une consolidation dans les sols fins et une compaction dans les sols granulaires lâches, surtout lors de variations répétées. Par ailleurs, l'érosion souterraine peut créer des cavités dans le sous-sol, menant parfois à des affaissements ou effondrements brutaux.

D'autres facteurs liés aux activités humaines ou aux conditions naturelles peuvent aggraver les tassements. Les travaux comme les excavations, les sollicitation dynamique (figure 1.7), les remblais, la construction de bâtiments ou le creusement de tunnels modifient l'équilibre des sols en augmentant les contraintes exercées sur les terrains voisins. Les vibrations engendrées par le battage de pieux, les machines en fonctionnement, les explosions ou encore les séismes peuvent accentuer ces effets, surtout dans les sols granulaires. Enfin, les mouvements de terrain sur pentes, tels que les glissements de terrain, le fluage ou l'érosion en surface, sont également susceptibles de générer des tassements notables. (Baban, 2016).



Figure 1.7. Fissures des structures sous l'effet du tassement causé par les sollicitations dynamiques.

Le tassement des fondations superficielles peut entraîner des conséquences significatives sur la stabilité et la durabilité des structures. Cela peut entraîner une déformation de la fondation, provoquant des fissures dans les murs (Figure 1.8) et les planchers. Ces déformations peuvent perturber l'équilibre de la structure, entraînant une répartition inégale des efforts et une défaillance potentielle des éléments porteurs. De plus, les tassements différentiels peuvent accentuer ces effets, créant des tensions internes et des contraintes supplémentaires sur la structure, rendant les réparations plus complexes et coûteuses. À long terme, ces problèmes peuvent compromettre la sécurité de l'édifice.



Figure 1.8. Fissures dues aux tassements.

B. Capacité portante

La capacité portante est l'un des critères de performance essentiels des fondations superficielles et constitue un aspect clé du génie des sols. Les exigences géotechniques pour une fondation superficielle reposent sur deux critères principaux :

- Les contraintes de cisaillement transmises au matériau de support doivent être inférieures à la résistance au cisaillement d'un montant suffisant pour garantir un facteur de sécurité adéquat, généralement compris entre 2.5 et 3.0.
- Le tassement de la fondation doit être tolérable et, en particulier, le tassement différentiel ne doit pas entraîner de dommages inacceptables ni perturber le bon fonctionnement de la structure (Baban, 2016).

Une capacité portante insuffisante des fondations superficielles peut avoir de lourdes répercussions sur la stabilité et la sécurité d'une structure. Lorsqu'un sol ne parvient pas à supporter les charges transmises par la fondation, celle-ci peut s'enfoncer (Figure 1.9) ou se déformer, provoquant des tassements excessifs. Ces mouvements peuvent engendrer des fissures dans les murs et les planchers, des déplacements verticaux ou horizontaux de la structure, et compromettre son équilibre global.



Figure 1.9. Affaissement causé par une faible capacité portante.

Ce problème est d'autant plus critique lorsque le sol présente une hétérogénéité, car cela peut entraîner un enfoncement différentiel. Les conséquences peuvent aller de réparations structurelles coûteuses à une perte totale de fonctionnalité du bâtiment, voire à une menace directe pour la sécurité des occupants.

C. Affaissement

L'affaissement (Figure 1.10) est causé par le tassement des agrégats, ce qui conduit à une diminution de la porosité et à une réduction de l'épaisseur du sol (Hallaire, 1987).

Il est principalement causé par des facteurs tels que l'infiltration d'eau, qui lessive les particules fines, les surcharges dues aux constructions ou activités humaines, et le retrait des sols argileux en période de sécheresse. Ces processus affaiblissent la structure du sol,

provoquant des fissures dans les bâtiments, des dommages aux fondations, et augmentant les risques d'effondrement ou d'instabilité structurelle.



Figure 1.10. Affaissement.

D. Glissement

Le terme "glissement" (Figure 1.11) désigne généralement le déplacement en pente de sols, de roches sous l'influence de la gravité. Il fait également référence à la configuration du terrain qui en découle, résultant de ce déplacement. Un glissement de terrain est un mouvement en pente de roches ou de sols, ou des deux, qui se produit sur une surface de rupture, pouvant être courbée (glissement rotatif) ou plane (glissement translationnel). Dans ce processus, une grande partie du matériel se déplace souvent en masse cohérente ou semi-cohérente, avec peu de déformation interne (Highland & Bobrowsky, 2008).

Les glissements de terrain ont un impact direct sur les fondations des structures. Ils peuvent déstabiliser les fondations en les déplaçant ou en les détruisant complètement. Cela entraîne des fissures, des affaissements ou des ruptures qui compromettent la stabilité des bâtiments.



Figure 1.11. Glissement de terrain.

E. Sollicitations sismiques

Lors des sollicitations sismiques, le système superstructure-sol-fondation est soumis aux effets des ondes sismiques. L'excitation du sol génère des forces d'inertie qui affectent celui-ci, tandis que la réponse inertielle de la superstructure, en interaction avec le sol, modifie les efforts appliqués sur la fondation, tels que les forces verticales, horizontales et les moments. Cela entraîne une amplification des actions dans le système, créant ainsi des effets plus importants (Figure 1.12) que ceux rencontrés sous des chargements statiques.



Figure 1.12. Effets d'un séisme sur les structures.

Contrairement aux sollicitations statiques, une sollicitation sismique a également un impact sur la résistance du sol. Pour les sols cohérents, les cycles de chargement provoqués par le séisme peuvent réduire la résistance au cisaillement non drainée. Dans le cas des sols granulaires, l'augmentation de la pression interstitielle diminue la résistance, pouvant mener à la liquéfaction (Figure 1.13), un phénomène qui entraîne la perte totale de la capacité portante du sol. En conséquence, la fondation peut subir une rupture, car l'augmentation des charges, couplée à une réduction de la résistance, déséquilibre le système, contrairement aux chargements statiques où la résistance est généralement plus stable et prévisible (Chatzigogos, 2007).



Figure 1.13. Liquéfaction du sol.

1.4. Conclusion

En conclusion, les fondations jouent un rôle essentiel dans la stabilité et la pérennité des ouvrages en assurant la transmission des charges au sol de manière efficace. Parmi les différentes catégories, les fondations superficielles sont privilégiées en raison de leur simplicité de mise en œuvre et de leur coût réduit. Elles restent néanmoins adaptées uniquement aux sols offrant une portance suffisante et nécessitent parfois des techniques d'amélioration pour limiter les tassements et garantir une performance optimale. Ainsi, une bonne compréhension des propriétés du sol et des méthodes d'optimisation des fondations superficielles est primordiale pour assurer la sécurité et la durabilité des structures.

Chapitre 2

Techniques d'amélioration des sols

2.1. Introduction

Le sol est le support fondamental des ouvrages de génie civil. Sa nature variable influence directement la stabilité et la durabilité des structures. Une analyse précise de ses propriétés et de son comportement sous charge est essentielle pour concevoir des fondations sûres. Cependant, les sols en place sont souvent inadaptés aux exigences du projet en raison de leur faible portance ou de leur forte compressibilité.

Face à l'insuffisance des caractéristiques naturelles de certains sols, le recours aux techniques de traitement, d'amélioration ou de renforcement devient indispensable. Ces interventions visent notamment à accroître la portance, réduire la compressibilité ou limiter la perméabilité du sol.

Ce chapitre présente les bases théoriques, les buts recherchés et les principales utilisations de ces techniques dans le domaine de la construction.

2.2. Sols

Le sol est constitué de grains solides, d'eau et d'air (Figure 2.1), ce qui en fait un matériau à trois phases. Il peut être soit totalement sec, ne contenant alors que des particules solides et de l'air, soit complètement saturé, où l'eau occupe tout l'espace entre les grains. La répartition de ces trois phases influence directement le comportement du sol en ingénierie. En géotechnique, que ce soit pour les travaux de terrassement ou les essais en laboratoire, il est souvent nécessaire de calculer les poids et les volumes de chacune de ces phases (Das, 2011).

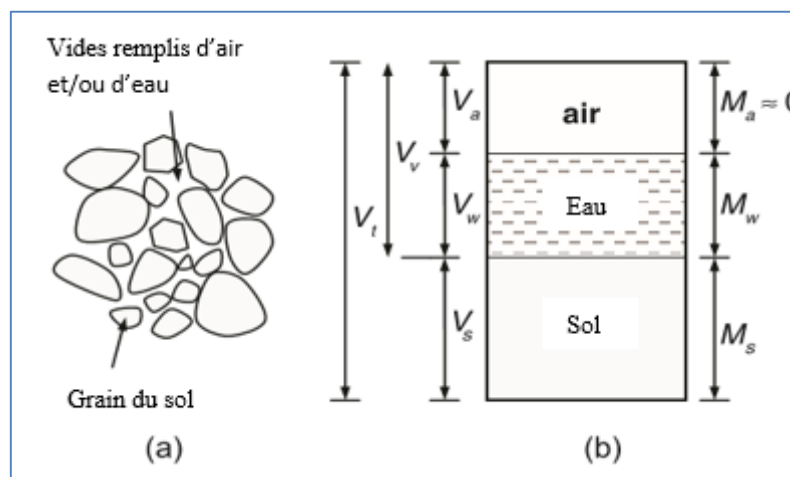


Figure 2.1. Relations de phase : (a) squelette du sol, (b) diagramme de phase (Das, 2011).

2.1.1. Origine des sols

Les sols qui recouvrent la terre résultent principalement de l'altération des roches (Figure 2.2), qui peut être mécanique ou chimique. L'altération mécanique fragmente les roches sans changer leur composition chimique. Elle est notamment provoquée par les variations de température, entraînant des expansions et contractions successives, ce qui génère des fissures et des éclats. L'altération chimique, quant à elle, modifie la structure des roches en transformant leurs minéraux d'origine en nouveaux composés.



Figure 2.2. Altération de la roche.

Le gel joue également un rôle important en augmentant le volume de l'eau infiltrée dans les pores des roches, ce qui crée une pression interne et entraîne leur fracture. D'autres agents tels que l'eau courante, le vent, les glaciers et les vagues contribuent aussi à cette désagrégation.

Ces deux types d'altération agissent souvent ensemble. Selon les conditions locales, les sols formés par ces processus (Figure 2.3) peuvent rester sur place, devenant des sols résiduels, ou être transportés par des agents naturels, formant ainsi des sols transportés (Das & Sivakugan, 2018).

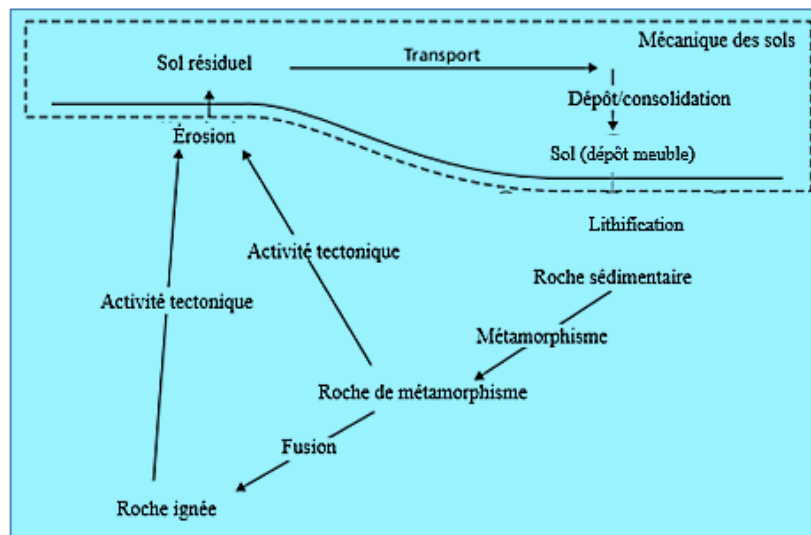


Figure 2.3. Cycle des roches (Knappett, 2012).

A. Sols résiduels

Les sols résiduels se forment sur place à la suite de l'altération des roches mères et y demeurent sans être transportés. Leur profondeur dépend principalement des conditions climatiques et de la durée d'exposition, pouvant être significative dans certaines régions. Dans les zones tempérées, ils sont généralement compacts et stables. Une caractéristique majeure de ces sols est l'absence de taille fixe des grains (Murthy, 2002).

B. Sols transportés

Les sols transportés se retrouvent à des emplacements éloignés de leur site de formation d'origine. Leur déplacement est assuré par divers agents naturels tels que les glaciers, le vent et l'eau. Ils sont classés en fonction du mode de transport. Les sols alluviaux sont acheminés par l'eau courante, tandis que les sols lacustres se déposent dans des lacs calmes.

Les sols colluviaux résultent principalement de l'action de la gravité, comme lors des glissements de terrain, et les sols glaciaires proviennent des dépôts laissés par les glaciers. De nombreux sols transportés sont meubles et peu cohérents sur plusieurs centaines de mètres de profondeur, ce qui peut engendrer des difficultés pour les fondations et d'autres ouvrages de construction (Murthy, 2002).

2.2.2. Rôle du sol dans la construction

Le sol supporte le poids des bâtiments et transmet les charges aux couches profondes, assurant la stabilité et la sécurité des constructions. Un sol bien adapté permet de répartir uniformément les charges et prévient les risques de tassement ou de mouvement des fondations. De plus, il influence directement la conception des fondations, qu'il s'agisse de fondations superficielles ou profondes, en fonction de sa capacité à supporter les charges.

2.2.3. Types de sols

Les particules de sol sont classées en fonction de leur taille en galets, gravier, sable, limon et argile (Figure 2.4). Les grains dont le diamètre varie entre 4.75 et 76.2 mm sont désignés comme du gravier. Lorsque les grains sont visibles à l'œil nu mais mesurent moins d'environ 4.75 mm, le sol est appelé sable. La plus petite taille de grains visible à l'œil nu est environ de 0.075 mm. Les grains de sol compris entre 0.075 et 0.002 mm sont qualifiés de limon, tandis que ceux dont le diamètre est inférieur à 0.002 mm sont considérés comme de l'argile (Murthy, 2002).

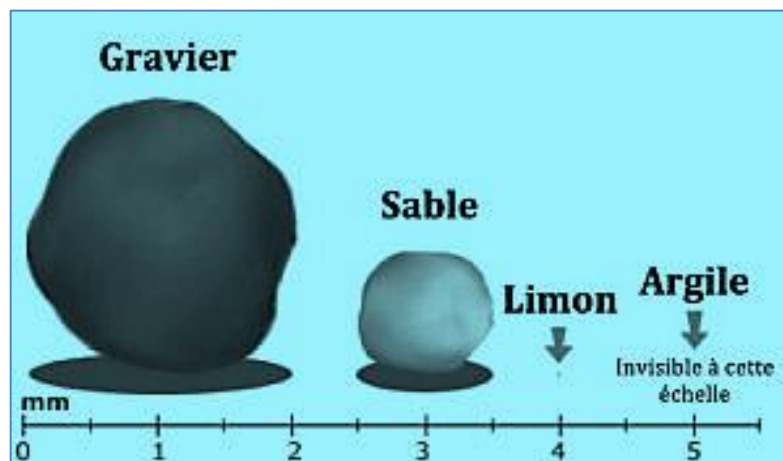


Figure 2.4. Taille des particules du sol.

2.2.4. Problèmes des sols

Les sols peuvent poser de nombreux problèmes lors de la construction, affectant directement la stabilité et la durabilité des structures. Parmi les défis les plus fréquents, les affaissements et les tassements figurent en tête. Ces phénomènes peuvent compromettre l'intégrité des fondations et nuire à la sécurité des bâtiments.

La présence d'eau souterraine est également un facteur problématique, car elle peut entraîner des érosions (Figure 2.5), détériorer les matériaux de construction et provoquer des infiltrations d'eau dans les bâtiments, compromettant ainsi leur structure. De plus, les sols expansifs, comme les argiles, qui se dilatent lorsqu'ils absorbent de l'eau et se contractent en séchant, peuvent engendrer des fissures dans les fondations. Les sols gelés représentent un autre défi, car lors du dégel, ils peuvent subir des mouvements imprévisibles, notamment le soulèvement du sol, ce qui affecte la stabilité des structures. En outre, la contamination des sols, qui peut inclure des substances polluantes ou toxiques, est un problème majeur. Ces sols nécessitent des traitements spécifiques avant de pouvoir accueillir une construction.



Figure 2.5. Effets de l'érosion sur le sol.

Les sols transportés, tels que les sables ou sols meubles, manquent souvent de cohésion, ce qui constitue un risque pour les fondations. Ces types de sols nécessitent des solutions adaptées pour garantir leur stabilité. Par ailleurs, les mouvements du sol, qu'ils soient dus à des changements dans sa composition ou à des facteurs climatiques, peuvent entraîner des fissures, affectant l'intégrité des structures.

Enfin, un sol non homogène, composé de couches ou de grains de tailles variées, complique les calculs de fondation et peut entraîner des problèmes dans la répartition des charges. Ce phénomène rend la conception des fondations plus complexe et nécessite une analyse approfondie des conditions du sol avant toute construction.

2.3. Amélioration des sols

L'amélioration des sols est une pratique essentielle en géotechnique, car les sols naturels ne présentent pas toujours les caractéristiques mécaniques, physiques ou chimiques nécessaires pour assurer la stabilité et la durabilité des ouvrages (Figure 2.6). Cette démarche permet d'optimiser des paramètres tels que la portance, la compressibilité ou encore la perméabilité du sol, afin de garantir la sécurité et la pérennité des infrastructures.

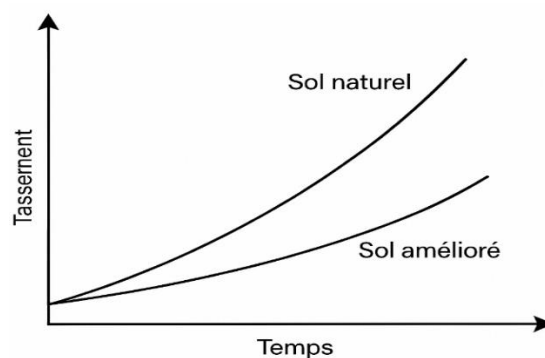


Figure 2.6. Comparaison du tassement avant et après amélioration du sol.

Historiquement, l'amélioration des sols était réalisée de manière empirique, à travers des méthodes rudimentaires adaptées aux besoins locaux. Aujourd'hui, elle repose sur des études approfondies et des techniques modernes qui permettent d'obtenir des performances contrôlées et adaptées aux différentes contraintes des projets de construction.

Face à des conditions de fondation complexes, plusieurs solutions sont envisageables : déplacer l'implantation de l'ouvrage, ou adapter la conception en choisissant un radier sur pieux, une structure rigide limitant les tassements ou une construction flexible tolérant les mouvements différentiels (Hausmann, 1990).

Il est essentiel que chaque projet soit précédé d'une analyse géotechnique approfondie afin d'évaluer la nature des sols et d'orienter les choix de conception et d'amélioration. De plus, il convient de prendre en compte les effets environnementaux des techniques d'amélioration, en particulier dans les zones écologiquement sensibles. L'objectif est d'assurer non seulement la stabilité et la durabilité de la structure, mais aussi la préservation de l'environnement à long terme.

2.3.1. But d'amélioration des sols

Les objectifs traditionnels de l'amélioration des sols en tant que matériaux de fondation ou de construction visent à renforcer leurs performances en modifiant certaines de leurs propriétés. Parmi ces objectifs figurent l'augmentation de la résistance et la réduction de la compressibilité, ainsi que l'amélioration de la capacité à supporter des contraintes sans se déformer excessivement. Cela inclut également la réduction de la compressibilité, en diminuant le volume par la réduction des vides d'air ou de la teneur en eau sous charge (Hausmann, 1990).

2.3.2. Techniques d'amélioration des sols

Les méthodes de modification des sols regroupent diverses techniques visant à améliorer leurs propriétés en fonction des exigences spécifiques des projets de construction.

La modification mécanique repose sur l'application de forces externes pour augmenter la densité du sol. Cela peut se faire par compaction des couches superficielles à l'aide de rouleaux ou de plaques vibrantes, ou encore par des procédés en profondeur tels que le pilonnage ou la vibration.

La modification hydraulique, quant à elle, consiste à éliminer l'eau contenue dans le sol (Figure 2.7), en particulier dans les sols grossiers, grâce à des drains ou des pompages. Pour les sols fins, des charges externes sont appliquées afin de renforcer leur stabilité. Par ailleurs,

l'utilisation de barrières imperméables, comme les parois de diaphragme et les géomembranes, permet de contrôler les infiltrations d'eau, bien que ces techniques ne relèvent pas directement de la modification du sol, mais du contrôle de l'humidité.

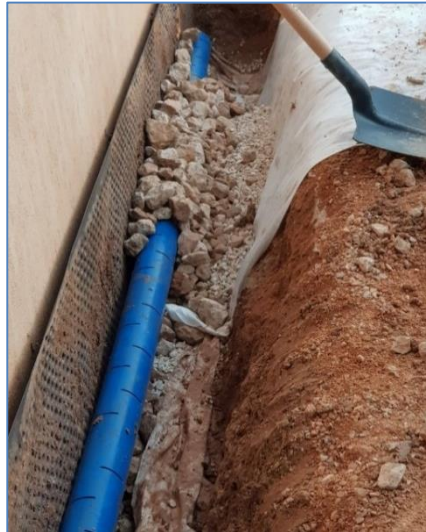


Figure 2.7. Système de drainage des eaux autour des fondations.

La modification physique et chimique inclut l'incorporation d'additifs dans le sol, tels que des produits chimiques (Figure 2.8) ou des déchets industriels, pour en améliorer la résistance et la stabilité. Cette approche englobe également des techniques comme l'injection de coulis sous pression, permettant de combler les vides dans le sol et de renforcer sa cohésion.



Figure 2.8. Traitement des sols à la chaux.

Enfin, la modification par inclusions et confinement consiste à insérer des fibres, des barres ou des mailles dans le sol, ou à le confiner dans des structures de soutien comme les murs de soutènement. Ces techniques offrent une large gamme de solutions pour améliorer la performance du sol et garantir la stabilité des fondations et des structures construites (Hausmann, 1990).

2.3.3. Choix de méthodes d'amélioration des sols

Le choix d'une méthode d'amélioration des sols (Figure 2.9) pour un projet donné dépend de nombreux critères techniques et contextuels. Il faut notamment tenir compte du type et du niveau d'amélioration requis, de la nature du sol, de la structure géologique du site, ainsi que des conditions d'infiltration. D'autres paramètres importants incluent le coût du projet, la disponibilité des équipements et des matériaux, la qualité de mise en œuvre attendue et le temps alloué à la construction. Des aspects tels que les risques pour les structures voisines, la contamination possible des nappes souterraines, ou encore la durabilité des matériaux dans des conditions environnementales spécifiques sont également à considérer.

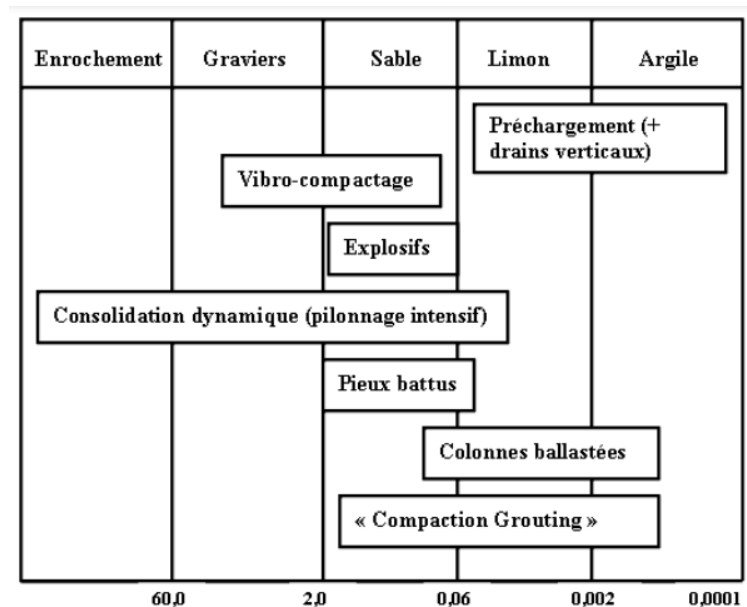


Figure 2.9. Applicabilité des techniques d'amélioration des sols en place en fonction de leur granulométrie (Bouassida, 2015).

Les caractéristiques des matériaux utilisés, comme leur toxicité, leur corrosivité, ou encore leur impact environnemental, doivent être évaluées avec soin, en tenant compte des réglementations en vigueur. La réversibilité du traitement, la possibilité de réutilisation des composants, ainsi que la fiabilité des outils de conception et d'analyse sont également des critères importants. Il est à noter que certaines techniques sont universelles, comme le gel du sol applicable aux sols humides, tandis que d'autres sont spécifiques à certains types de sols, cohésifs ou non cohésifs.

Tableau 2.1 Exemples de critères techniques et environnementaux influençant le choix des méthodes d'amélioration des sols.

Critère	Détail
Toxicité / Corrosivité	Risques pour l'environnement et les structures
Impact environnemental	Émissions, pollution, déchets
Réversibilité	Peut-on annuler l'effet du traitement ?
Réutilisabilité	Possibilité de recyclage ou réemploi des matériaux
Fiabilité des outils	Outils de simulation, conception ou suivi des travaux
Applicabilité selon type de sol	Universelle (ex : gel) / Spécifique (cohésifs vs non cohésifs)

Enfin, des conditions particulières comme le degré de saturation, le niveau de consolidation du sol, ou sa nature (organique, déchets, dépôts industriels) peuvent influencer la faisabilité d'une méthode. Le choix dépend également du type de problème à traiter, qu'il s'agisse d'une fondation, d'un talus, d'une excavation ou d'un ouvrage de soutènement. Les impacts environnementaux et la consommation énergétique sont aussi des facteurs décisifs, certaines techniques comme l'injection de coulis toxiques ou la densification par choc électrique étant souvent écartées (Hausmann, 1990).

2.4. Amélioration des sols par préchargement

Le préchargement (Figure 2.10) est une technique utilisée pour accélérer la consolidation des sols compressibles avant la construction. Il consiste à appliquer une surcharge temporaire pour provoquer un tassement anticipé, réduisant ainsi les risques de tassements différés. Cette surcharge expulse progressivement l'eau des vides des sols fins peu perméables, comme les argiles, améliorant leur résistance au cisaillement et leur portance. Le processus, plus lent dans les sols fins, peut être accéléré par des drains verticaux. À l'inverse, il est naturellement plus rapide dans les sols grenus perméables (Chu & Yan, 2005).

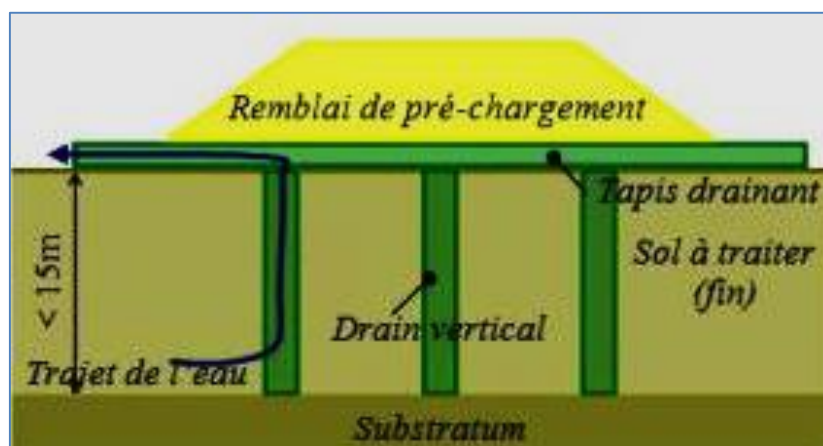


Figure 2.10. Préchargement.

Le préchargement des sols a pour principaux objectifs d'accélérer la vitesse de tassement, rendant ainsi le sol constructible plus rapidement sans craindre des tassements importants à moyen ou long terme, qu'ils soient absolus ou différentiels, et d'augmenter la résistance au cisaillement, ce qui améliore la capacité portante du sol (Queyroi, Chaput, & Pilot, 1985).

2.5. Amélioration des sols par modification mécanique

La modification mécanique du sol désigne les procédés de densification, souvent associés à la compaction dans les applications pratiques. La compaction (Figure 2.11) consiste à réduire le volume des vides d'air dans un sol non saturé, sans modifier de manière significative le volume des solides ni la teneur en eau. Elle repose sur la compression des particules du sol par des charges lourdes ou des forces dynamiques.

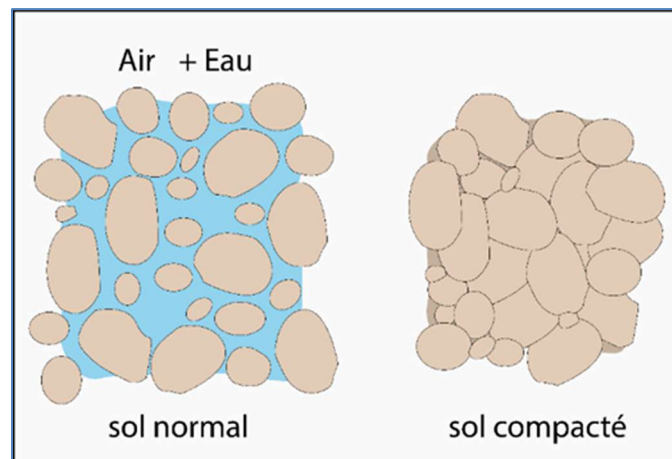


Figure 2.11. Impact de la compaction sur le sol.

Cette définition s'applique principalement aux techniques de compaction en surface, mais elle englobe également les méthodes en profondeur, y compris pour les sols saturés. Ces procédés peuvent inclure l'injection d'eau ou un réarrangement partiel du sol en place pour en améliorer la densité.

L'ingénieur géotechnique distingue clairement la compaction de la stabilisation et de la consolidation. La stabilisation vise à améliorer la résistance ou à réduire les déformations du sol, souvent par l'ajout d'additifs chimiques ou sous l'effet de changements environnementaux. La consolidation, quant à elle, réduit le volume du sol par expulsion de l'eau, généralement à l'aide de charges statiques ou de forces électriques, notamment dans les sols saturés. Ce processus peut être accéléré par des impacts ou vibrations, provoquant une liquéfaction temporaire, d'où l'appellation de consolidation dynamique (Hausmann, 1990).

2.5.1. Compactage superficiel

Le compactage superficiel désigne le processus de densification des couches de sol en surface, généralement par l'application de forces mécaniques, telles que le passage de rouleaux compresseurs ou d'autres équipements. Ce procédé est utilisé pour améliorer la stabilité et la portance des sols en réduisant le volume des vides dans les couches superficielles, souvent dans le cadre de la construction de routes, de fondations ou d'autres infrastructures.

Il est bien connu qu'à effort de compactage et méthode donnés, la densité d'un sol variera en fonction de la teneur en eau (Figure 2.12) (Nicholson, 2014).

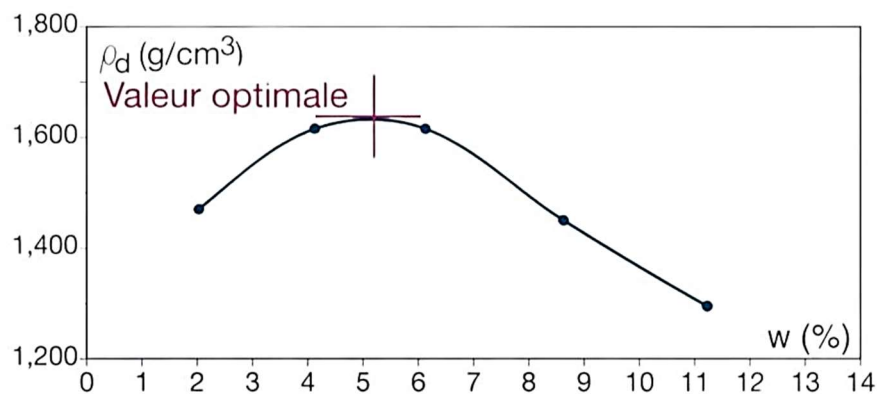


Figure 2.12. Courbe de compactage Proctor.

Lors du compactage d'un sol à faible profondeur ou de nouveaux matériaux placés à la surface, plusieurs variables influencent le degré de compactage et les propriétés associées. L'objectif principal est généralement d'atteindre la densité la plus élevée possible avec l'équipement disponible. Cependant, d'autres objectifs plus précis peuvent être atteints en contrôlant des variables supplémentaires qui affectent les caractéristiques du sol compacté. Les principales variables sont :

- Type de sol
- Méthode de compactage
- Effort de compactage
- Teneur en eau du sol

Il existe une variété d'équipements disponibles (Figure 2.13) pour le compactage superficiel des sols. Les différences entre les choix d'équipements concernent principalement la

méthode de compactage, la couverture, l'uniformité des résultats, l'effort de compactage et leur efficacité pour différents types de sols.



Figure 2.13. Matériel utilisé pour le compactage superficiel : a) Rouleau compacteur à impact, b) Plaque vibrante, c) Rouleau à jante lisse.

2.5.2. Compactage en profondeur

Le compactage en profondeur désigne un ensemble de techniques visant à densifier les sols situés à des profondeurs importantes, généralement en utilisant des équipements spécialisés. Plusieurs techniques très variées ont été développées pour la densification in situ des sols en profondeur. Les coûts associés aux techniques de densification en profondeur sont difficiles à évaluer a priori, car ils dépendent de la taille, de la profondeur et des spécificités de chaque projet. Ce qui peut être approximé, ce sont les coûts relatifs entre les différentes alternatives de densification en profondeur.

A. Compactage des sols par explosion

Le compactage par explosifs (Figure 2.14) est une technique utilisée pour densifier les sols en profondeur, en particulier dans les zones où l'accès aux équipements conventionnels est difficile ou impraticable. Elle consiste à utiliser des charges explosives placées à des profondeurs déterminées dans le sol, de manière à provoquer une onde de choc qui va comprimer et densifier les couches de sol environnantes. Ce processus permet d'améliorer la portance du sol, en particulier pour les sols meubles. L'objectif principal du compactage par explosifs est de créer une compression rapide et locale, ce qui peut être utile dans les projets de fondations, de remblais ou de stabilisation de terrains. Bien que cette méthode soit efficace pour des applications spécifiques, elle présente des défis en termes de sécurité, de contrôle de la densification et de gestion des impacts environnementaux. Le choix de cette technique dépend de plusieurs facteurs, tels que la profondeur du sol à traiter, les caractéristiques du site et la présence d'infrastructures sensibles à proximité.



Figure 2.14. Compactage des sols par explosion.

B. Compactage dynamique

Le compactage dynamique (Figure 2.15) est une méthode de compactage des sols rentable, où un poids lourd est soulevé puis relâché à une certaine hauteur, générant un impact sur la surface du sol avec une énergie d'impact facilement mesurable.



Figure 2.15. Compactage dynamique.

Le compactage dynamique est une méthode de densification des sols profonds par application d'une grande énergie d'impact à la surface, et non un simple traitement superficiel. Cette énergie génère des ondes dynamiques qui se propagent en profondeur, améliorant la résistance et la compressibilité du sol. Des cratères se forment à chaque impact et sont remblayés avant les passes suivantes. L'objectif est d'obtenir une couche densifiée uniforme ou de traiter des zones précises soumises à des charges importantes. Cette technique permet de réduire les tassements et d'augmenter la capacité portante du sol, atteignant généralement 100 à 150 kPa (Nicholson, 2014).

C. Vibrocompactage et vibro-remplacement

Vibrocompactage et le vibro-remplacement sont des techniques d'amélioration des sols utilisées en construction depuis les années 1930. Le vibrocompactage (Figure 2.16) est particulièrement adapté aux sols sableux meubles. Il consiste à insérer un vibreur de profondeur, souvent accompagné de jets d'eau ou d'air comprimé, pour densifier le sol en place. Cette méthode permet d'augmenter la capacité portante en formant des colonnes densifiées, tout en réduisant la compressibilité du sol.



Figure 2.16. Vibrocompactage.

Le vibro-remplacement (Figure 2.17), quant à lui, s'adresse aux sols cohésifs. Il repose sur la création d'une cavité par vibration, ensuite remplie de matériaux granulaires tels que le gravier ou la roche concassée, qui sont compactés pour former des colonnes résistantes. Cette méthode, notamment dans sa variante à alimentation par le bas, permet de supporter des charges de 100 à 400 kN. Le choix entre ces deux techniques dépend des caractéristiques du sol : le vibrocompactage est efficace pour les sols sableux à faible densité relative, tandis que le vibro-remplacement convient mieux aux sols cohésifs ayant une résistance au cisaillement non drainé comprise entre 20 et 60 kPa (Hausmann, 1990).



Figure 2.17. Vibro-remplacement.

2.5.3. Compaction hydromécanique

La compaction hydromécanique est une technique d'amélioration des sols combinant l'action de l'eau et des forces mécaniques pour augmenter la densité et la stabilité du sol. Cette méthode repose sur l'injection d'eau sous pression pour réduire les forces de cohésion et faciliter la réorganisation des particules, suivie d'une compaction mécanique, généralement par vibration ou par impact, pour maximiser la densité du sol. Elle est particulièrement efficace pour les sols granulaires saturés, où l'eau agit comme un fluide facilitateur, permettant une redistribution homogène des particules sous l'effet des charges mécaniques. La compaction hydromécanique est couramment utilisée pour réduire les tassements différentiels, améliorer la capacité portante et limiter les risques de liquéfaction dans les infrastructures nécessitant une base stable, telles que les chaussées, les barrages et les plateformes industrielles.

2.6. Amélioration des sols par modification hydraulique

L'eau constitue l'un des principaux facteurs à l'origine des problèmes en ingénierie géotechnique. Sa maîtrise permet d'améliorer significativement le comportement des sols. La modification hydraulique regroupe ainsi différentes techniques visant à contrôler les niveaux et les écoulements d'eau souterraine, telles que le drainage, le rabattement de nappe ou encore la gestion ciblée des infiltrations. En effet, un excès d'eau peut entraîner l'instabilité des fondations, des glissements de terrain, la liquéfaction des sols ou encore des tassements indésirables.

Le rabattement de nappe (Figure 2.18), réalisé par pompage ou drainage, permet de maintenir les zones de travail au sec, de stabiliser les terrains et d'augmenter la capacité portante des sols. L'évolution des méthodes, incluant le forage, le pompage et l'utilisation des géosynthétiques, a considérablement amélioré l'efficacité des systèmes de drainage. D'autres solutions, comme les parois étanches ou l'injection d'air comprimé, sont également mises en œuvre pour optimiser le contrôle de l'eau souterraine en fonction des besoins spécifiques du projet.



Figure 2.18. Rabattement de la nappe.

2.6.1. Méthodes de drainage superficiel

Le drainage superficiel vise à évacuer l'eau de surface et à limiter son infiltration dans le sol afin de prévenir l'instabilité des excavations et des structures. Les puisards ouverts (Figure 2.19) et les fossés constituent une solution économique pour collecter et éliminer l'eau par gravité ou pompage, particulièrement dans les sols perméables. Cependant, leur utilisation dans des excavations étayées peut entraîner des risques de glissement et d'instabilité du fond de fouille. En complément, des systèmes de drainage peu profonds, tels que les drains en tranchées remplies de matériaux filtrants, permettent de réguler les écoulements et de réduire l'accumulation d'eau dans les zones de travaux.

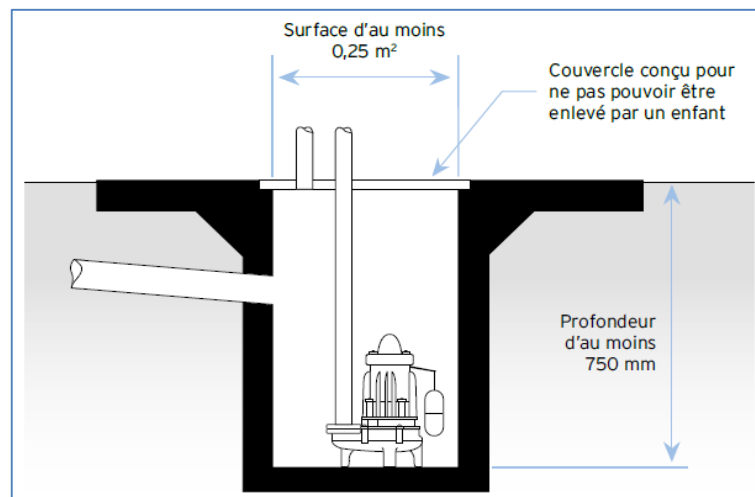


Figure 2.19. Drainage superficiel (puisard).

2.6.2. Méthodes de drainage profond

Le drainage profond est une technique d'amélioration des sols qui consiste à évacuer l'eau en profondeur afin de réduire la pression interstitielle et d'abaisser le niveau de la nappe phréatique. Contrairement au drainage superficiel, qui agit en surface, cette méthode vise à

capter l'eau souterraine présente dans les sols saturés et à la rediriger vers un exutoire, améliorant ainsi la stabilité et la portance du sol.

Le drainage en profondeur utilise plusieurs dispositifs pour l'évacuation des eaux souterraines, adaptés aux conditions du sol et aux besoins du projet. On peut citer les puits de drainage (Figure 2.20), qui captent l'eau en profondeur pour réduire la pression interstitielle, les drains à tubes, constitués de conduits perforés entourés de filtres permettant une évacuation progressive sans obstruction, et les tranchées drainantes, remplies de matériaux perméables, favorisant l'écoulement de l'eau dans les sols peu perméables. Ces solutions contribuent à stabiliser les terrains saturés et à limiter les tassements.



Figure 2.20. Puits sec.

L'efficacité du drainage profond dépend de plusieurs paramètres, tels que la perméabilité du sol, la profondeur de la nappe phréatique et la topographie du site. Cette technique est largement employée pour prévenir les tassements excessifs, stabiliser les talus et remblais, limiter les remontées capillaires sous les infrastructures et réduire le risque de liquéfaction des sols sous charge dynamique. Dans certains cas, elle est associée à d'autres méthodes, comme le préchargement ou le pompage, pour accélérer la consolidation des sols et optimiser leur portance.

2.6.3. Drainage profond par injection

Le drainage profond par injection consiste à introduire différents agents dans le sol afin d'améliorer son écoulement interne et de limiter l'excès d'eau souterraine. Cette technique peut se faire par injection d'air, qui aère le sol et augmente sa perméabilité en réduisant sa compacité. L'injection de liquides, comme des solutions drainantes, modifie les propriétés du sol en facilitant l'évacuation de l'eau à travers des canaux créés artificiellement. De plus,

l'injection de matériaux solides, tels que du sable ou des gravillons, renforce la structure du sol et favorise un drainage plus efficace. Bien que nécessitant des équipements et une expertise spécialisée, cette méthode s'avère efficace pour stabiliser les sols saturés et améliorer la gestion des eaux souterraines.

2.6.4. Électroosmose

L'électroosmose (Figure 2.21) repose sur le principe du déplacement de l'eau à travers un sol fin sous l'effet d'un champ électrique externe. Dans ces sols, les particules sont chargées négativement et entourées d'une double couche d'ions et de molécules d'eau dipolaires. Lorsqu'un courant continu est appliqué, un champ électrique se crée entre une anode (positive) et une cathode (négative). Sous l'effet de ce champ, les molécules d'eau migrent vers la cathode en raison des forces électrocinétiques, facilitant ainsi leur extraction. Ce phénomène permet de mobiliser l'eau interstitielle dans des sols à faible perméabilité, où les méthodes classiques de drainage sont moins efficaces.

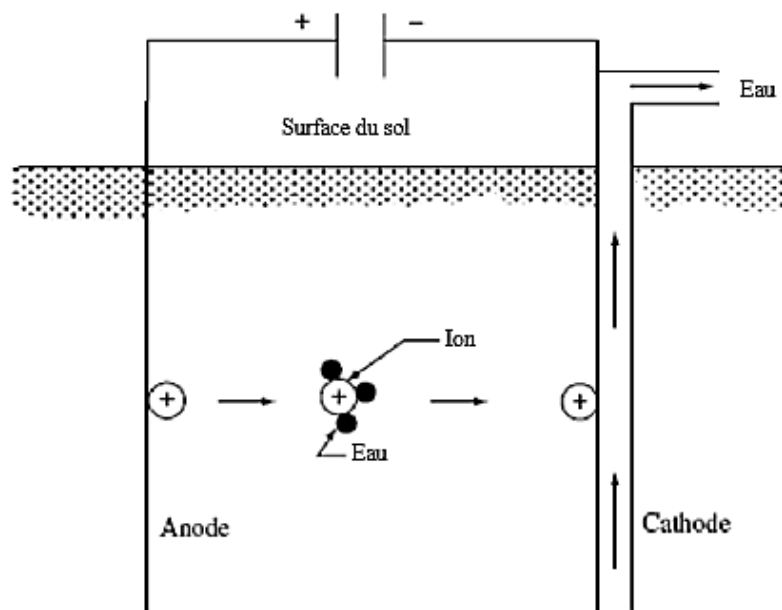


Figure 2.21. Principes de l'électroosmose (Das, 2008).

L'électroosmose est une technique d'amélioration des sols qui exploite ces propriétés électriques pour le drainage et la stabilisation des terrains saturés. En appliquant un courant continu, l'eau est progressivement acheminée vers la cathode, réduisant ainsi la teneur en eau et augmentant la résistance du sol. Une fois accumulée, cette eau doit être évacuée par pompage ou drainage pour éviter la saturation et garantir l'efficacité du processus. Cette méthode est particulièrement efficace pour améliorer la stabilité des sols fins, accélérer la consolidation et éliminer certains contaminants. Elle est utilisée notamment pour le drainage des terrains difficiles à assécher par des techniques conventionnelles.

2.7. Amélioration des sols par modification chimique et physique

L'amélioration chimique des sols vise à optimiser leurs propriétés chimiques en modifiant la composition minéralogique et les interactions entre les particules. Ces techniques sont particulièrement efficaces pour stabiliser les sols et réduire leur sensibilité à l'eau, limitant ainsi les risques de gonflement et de retrait et renforcer leur cohésion.

L'amélioration chimique des sols peut être réalisée directement sur chantier ou en centrale de malaxage, selon les exigences du projet et la nature du sol à traiter.

Sur chantier (Figure 2.22), les produits chimiques sont injectés ou mélangés directement dans le sol en place à l'aide d'équipements spécialisés. Cette méthode permet un traitement ciblé et rapide, adapté aux sols difficiles d'accès ou aux zones nécessitant une intervention immédiate. L'injection de solutions drainantes ou de liants chimiques, tels que la chaux ou le ciment, est réalisée à l'aide de forages et de dispositifs d'injection sous pression, assurant une répartition homogène des agents dans le sol. Pour garantir un dosage uniforme, le sol doit d'abord être nivelé afin d'assurer une bonne horizontalité.

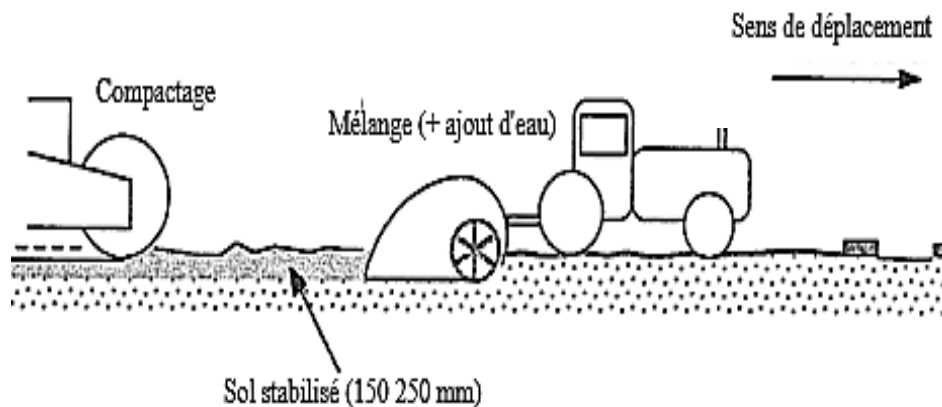


Figure 2.22. Amélioration des sols par ajout chimique sur chantier (Hausmann, 1990).

En centrale de malaxage (Figure 2.23), les sols sont extraits, traités avec les additifs chimiques dans des installations dédiées, puis remis en place. Ce procédé permet un contrôle précis du dosage et une homogénéité optimale du mélange, garantissant une amélioration durable des propriétés mécaniques et hydrauliques du sol. Il est particulièrement utilisé pour la fabrication de remblais traités ou la stabilisation des sols destinés aux infrastructures routières et ferroviaires.

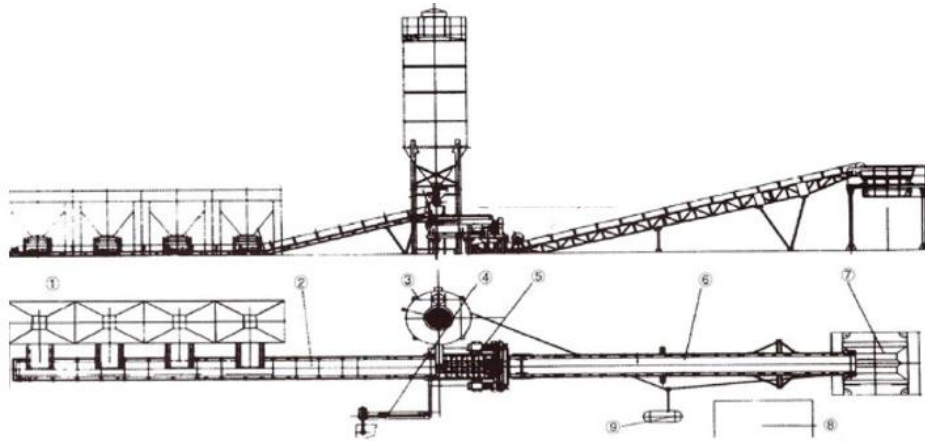


Figure 2.23. Centrale de malaxage.

2.7.1. Amélioration des sols par traitement à la chaux

La chaux utilisée en géotechnique existe sous trois formes principales : la chaux vive (CaO), la chaux éteinte (Ca(OH)_2) et le lait de chaux. La chaux vive résulte de la calcination du carbonate de calcium (CaCO_3), un processus qui libère du CO_2 (Figure 2.24) et produit un oxyde de calcium réactif. En présence d'eau, une réaction exothermique transforme cette chaux vive en chaux éteinte, utilisée pour stabiliser les sols en améliorant leurs propriétés mécaniques. (MANUAL, 2004).

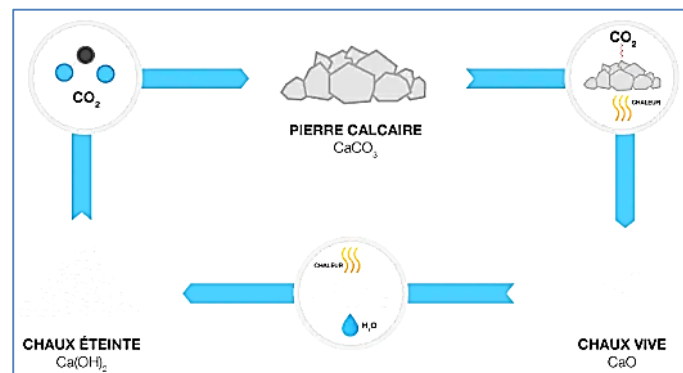


Figure 2.24. Cycle de production de la chaux à partir du calcaire.

Deux types de chaux sont couramment employés : la chaux calcique, riche en CaO ou Ca(OH)_2 , et la chaux dolomitique, qui contient davantage de magnésium (35 à 46 %), mais dont la réactivité est plus faible. Il faut distinguer ces produits de la chaux agricole, un calcaire simplement broyé sans effet chimique notable, ou encore de certains résidus industriels comme la poussière de four, peu efficaces en amélioration des sols en raison de leur faible teneur en chaux active.

L'amélioration des sols par la chaux repose sur un malaxage mécanique du sol avec la chaux vive ou éteinte (Figure 2.25), suivi d'un compactage. En général, entre 1 % et 4 % de chaux

est suffisant. Une fois le malaxage terminé (sur chantier ou en centrale de malaxage), le sol amélioré est soumis à un compactage intensif, essentiel pour maximiser sa densité et sa résistance mécanique, réduisant ainsi sa compressibilité et sa sensibilité à l'eau.



Figure 2.25. Opération de malaxage de la chaux avec le sol in situ.

L'amélioration des sols par la chaux repose sur des réactions physico-chimiques qui modifient leurs propriétés. L'ajout de chaux vive ou éteinte à un sol humide déclenche une réaction exothermique, favorisant le séchage et facilitant le compactage. Avec les particules fines, la chaux provoque des échanges cationiques, une floculation, une carbonatation et une réaction pouzzolanique, ce qui améliore la cohésion, la stabilité et la durabilité des sols, notamment pour les routes et plateformes (Tran, 2013).

2.7.2. Amélioration des sols par traitement au ciment

L'amélioration des sols par le ciment consiste à incorporer du ciment Portland dans le sol (Figure 2.26) en place afin d'en modifier les propriétés mécaniques. Cette technique est particulièrement efficace pour les sols granulaires bien gradués, comme les sables et les graviers, en augmentant leur résistance et en réduisant leur sensibilité à l'eau. En revanche, son application aux sols cohésifs est plus complexe, car elle exige un malaxage plus soigné et des dosages plus importants. Selon la quantité de ciment incorporée, on distingue le sol modifié au ciment, qui offre une amélioration temporaire, et le sol-ciment, qui forme un matériau durci plus durable (Bulbul Ahmed & Sayeed, 2013).



Figure 2.26. Opération de malaxage du ciment avec le sol in situ.

L'efficacité de cette méthode dépend de plusieurs facteurs : la granulométrie du sol, l'uniformité du mélange, la teneur en eau, et surtout, le respect des conditions de compactage et de cure. Un malaxage homogène est essentiel pour assurer une bonne répartition du ciment, suivi d'une cure contrôlée permettant l'hydratation complète du mélange. Ces étapes garantissent l'obtention d'un sol stabilisé performant, capable de supporter durablement les charges imposées par les infrastructures.

La combinaison simultanée de la chaux et du ciment permet d'améliorer efficacement les propriétés du sol tout en constituant une solution économiquement avantageuse.

2.8. Amélioration des sols par modification thermique

Le traitement thermique des sols, utilisé depuis longtemps pour leur stabilisation, repose sur l'application de températures élevées, soit par combustion de produits pétroliers dans des forages, soit par chauffage de surface à l'aide de brûleurs mobiles (Figure 2.27). Cette méthode est particulièrement adaptée aux sols fins, notamment argileux, où elle entraîne des transformations physiques permanentes des minéraux et un assèchement par évaporation de l'eau. Toutefois, son usage a fortement diminué en raison de son coût élevé et de son impact environnemental. Néanmoins, il reste pertinent dans certains cas, comme la dépollution des sols contaminés, où le chauffage facilite l'extraction des composés organiques volatils, notamment par injection d'air chaud ou de vapeur. À des températures extrêmes, il permet également la vitrification in situ, un procédé qui utilise un courant électrique pour fusionner le sol sur place (Terashi & Juran, 2000).

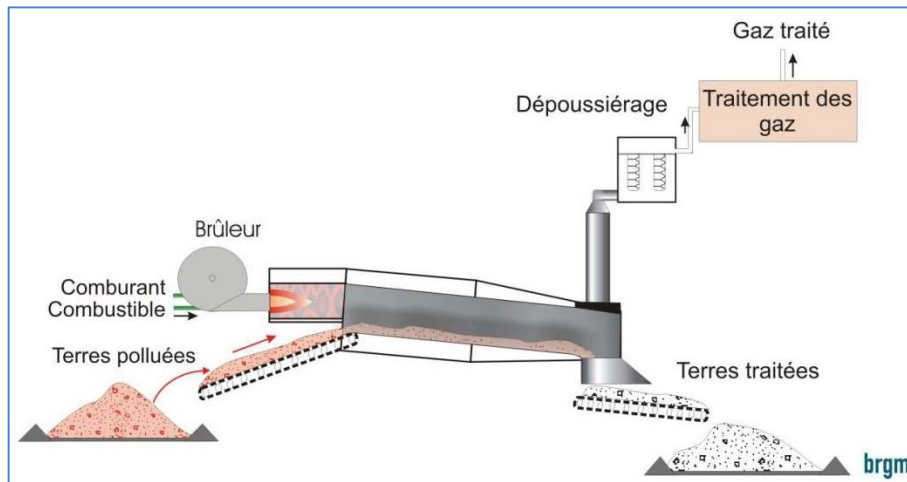


Figure 2.27. Principe de la désorption thermique.

Le traitement thermique des sols est efficace pour la stabilisation et la dépollution, mais son usage reste limité en raison de sa forte consommation d'énergie, de son coût élevé et de ses émissions polluantes. Il n'est pas adapté à tous les sols ni à certains polluants comme les métaux lourds. Ce procédé peut être appliqué in situ (sur site) ou hors site. Il est généralement réservé aux cas où d'autres méthodes, comme la stabilisation chimique ou le lavage, sont inefficaces.

2.8.1. Chauffage de surface du sol

Le chauffage de surface repose sur l'utilisation de brûleurs rapprochés montés sur des dispositifs mobiles, qui appliquent une chaleur intense directement sur le sol. Ce procédé est particulièrement efficace pour les couches superficielles, où il favorise l'évaporation rapide de l'eau et modifie la structure des particules fines, améliorant ainsi la portance du sol. Son application reste cependant limitée aux zones accessibles aux équipements de chauffage, et son efficacité dépend de la nature du sol et des conditions climatiques. Malgré son coût élevé, il peut être utilisé pour des besoins temporaires, notamment dans la construction routière ou la réhabilitation de sols pollués (Lee, Lee, & Cho, 2025).

2.8.2. Chauffage par forage

Le chauffage par forage consiste à injecter de la chaleur directement dans le sol en brûlant des produits pétroliers à l'intérieur de forages préalablement réalisés. Cette technique est principalement utilisée pour stabiliser les sols argileux en provoquant des transformations minéralogiques irréversibles sous l'effet des hautes températures. En plus de renforcer la structure du sol, elle permet de réduire son taux d'humidité par évaporation de l'eau. Toutefois, cette méthode est peu employée aujourd'hui en raison de son coût énergétique

élevé et de son impact environnemental, bien qu'elle puisse être envisagée pour des applications spécifiques, comme le traitement de sols contaminés.

2.9. Amélioration des sols par inclusion

L'amélioration des sols par inclusion consiste à renforcer un sol en y intégrant des éléments rigides ou semi-rigides, tels que des colonnes ballastées, des pieux, des micropieux ou des inclusions rigides en béton ou en géosynthétiques. Cette technique permet de réduire les tassements, d'augmenter la capacité portante et d'améliorer la stabilité globale du sol, notamment pour les sols compressibles ou faiblement portants. Son efficacité dépend du type d'inclusion utilisé, de la nature du sol et des charges appliquées, ce qui en fait une solution adaptée aux infrastructures lourdes comme les bâtiments, les routes et les plateformes industrielles. Cette technique sera abordée plus en détail dans le troisième chapitre.

2.10. Conclusion

En conclusion, l'amélioration des sols regroupe un ensemble de techniques visant à optimiser les caractéristiques mécaniques et hydrauliques des sols en fonction des exigences des ouvrages à réaliser. Qu'elles soient mécaniques, hydrauliques, chimiques, thermiques ou d'autres techniques, les différentes méthodes d'amélioration présentent chacune des avantages propres et sont adaptées à des contextes géotechniques spécifiques. Le choix de la technique appropriée dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature du sol, les contraintes du projet et les considérations économiques et environnementales. Cette étude générale constitue une base essentielle pour approfondir, dans les chapitres suivants, certaines de ces techniques et leurs applications spécifiques.

Chapitre 3

Amélioration des sols par des inclusions rigides

3.1. Introduction

Parmi les différentes techniques de renforcement des sols, les inclusions rigides (Figure 3.1) occupent une place importante dans les projets nécessitant une amélioration efficace et ciblée. Ce chapitre est exclusivement réservé à cette technique, qui consiste à introduire dans le sol des éléments verticaux rigides en béton armé afin d'en améliorer les propriétés du sol. Adaptée aux terrains très compressibles ou soumis à de fortes charges, elle permet de limiter les tassements, d'augmenter la capacité portante et d'assurer une meilleure répartition des efforts. Leur mise en œuvre s'adapte à de nombreux contextes géotechniques et permet d'optimiser les fondations des ouvrages.

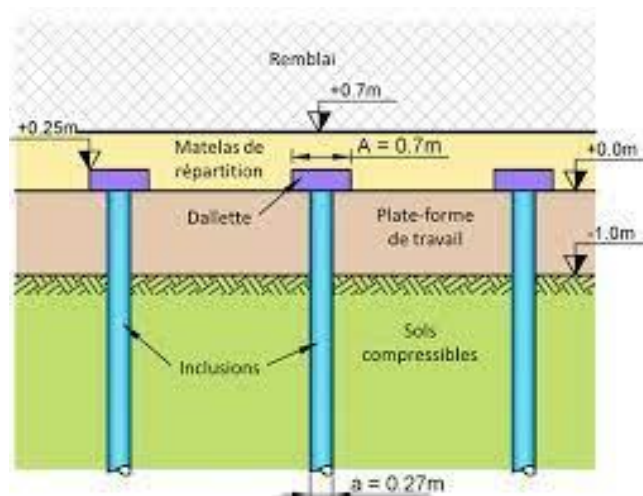


Figure 3.1. Inclusions rigides.

Les inclusions rigides reposent sur le principe du transfert des charges de la structure vers des couches de sol plus profondes et plus résistantes. Contrairement aux pieux, elles ne sont pas directement encastrées dans la structure, mais fonctionnent en collaboration avec une interface de répartition, souvent constituée d'un matelas granulaire ou d'une semelle. Cette interface permet une meilleure diffusion des charges sur une surface plus large, réduisant ainsi les tensions excessives au niveau du sol superficiel. Grâce à ce mécanisme, les inclusions rigides contribuent à optimiser le dimensionnement des fondations et à améliorer la stabilité des ouvrages.

Les inclusions rigides, introduites dans les années 1970, offrent une solution efficace pour renforcer les sols compressibles (Dhaybi, 2015). Bien que leur emploi moderne soit relativement récent, des approches similaires existaient depuis plusieurs siècles. Elles s'intègrent aujourd'hui dans un ensemble de techniques visant à stabiliser les sols (Swift & Pearlman).

3.2. Historique des inclusions rigides

La technique des inclusions rigides, bien qu'adoptée sous sa forme moderne récemment, repose sur des principes anciens utilisés pour construire sur des sols difficiles, notamment marécageux. Dès l'Antiquité, l'utilisation de pieux en bois accompagnés de couches de sable ou de fascines constituait les premières formes de cette approche. L'évolution scientifique de cette technique a pris un tournant important avec l'étude du frottement négatif, en particulier à Mexico, où les problèmes de tassements ont conduit au développement de solutions spécifiques, telles que les pieux en quinconce et les inclusions indépendantes du radier.

Au début du XXe siècle, des inclusions métalliques non reliées à la structure ont été proposées pour stabiliser certaines constructions. Des progrès majeurs ont été réalisés au Japon, où des groupes de pieux et d'inclusions ont permis de limiter les tassements liés aux pompages. En Europe, les premières applications ont concerné les remblais routiers et ferroviaires, notamment en Suède, Finlande, Écosse et Allemagne, où l'utilisation des inclusions rigides a progressivement pris de l'ampleur. Depuis les années 1960, des recherches ont permis de mieux comprendre l'effet de groupe des pieux, optimisant ainsi leur conception. Depuis 2000, cette technique s'est largement répandue, et de nombreuses entreprises spécialisées l'utilisent désormais, notamment pour les dallages et radiers. Parallèlement, des modèles de calcul analytiques et numériques ont été développés pour affiner son dimensionnement (ASIRI, 2012).

3.3. Domaine d'application

La technique de renforcement par inclusions rigides s'applique aux sols meubles tels que les alluvions, les limons et les silts. Elle est principalement utilisée pour deux types d'ouvrages : les remblais et les fondations d'ouvrages industriels (Figure 3.2). Pour les remblais, elle permet d'accélérer la construction et de limiter les tassements différentiels. On distingue les remblais de section courante, incluant les remblais routiers et ferroviaires, ainsi que les remblais d'accès aux ouvrages d'art. Généralement, ces remblais ne nécessitent pas de matelas de répartition. En revanche, pour les fondations d'ouvrages industriels, un matelas granulaire est mis en place entre la structure et les têtes des inclusions afin d'homogénéiser et de réduire les tassements sous l'ouvrage (Hatem, 2009). Cette technique est souvent utilisée lorsque les solutions traditionnelles ne garantissent pas les critères de tassement ou exigent un sol de bonne qualité. Elle convient également pour des sites de stockage de déchets, nécessitant une analyse chimique préalable.

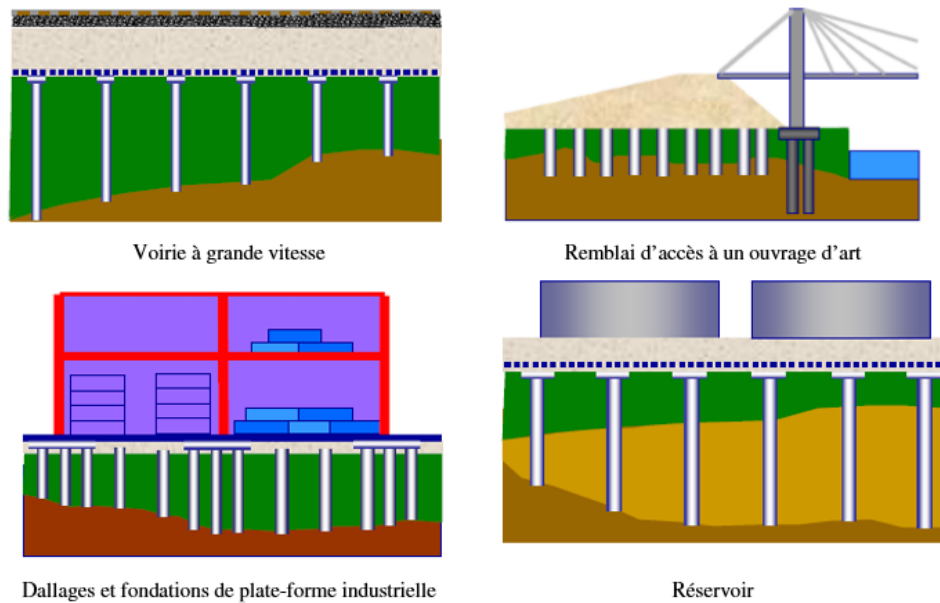


Figure 3.2. Domaine d'application de la technique de renforcement par inclusions rigide (Briançon, 2002).

3.4. Types d'inclusions

Les inclusions désignent des structures intégrées au sol pour en optimiser les caractéristiques mécaniques et contrôler sa déformation sous charge. Selon leur nature et leur méthode d'installation, elles se classent en rigides, semi-rigides ou souples. Leur rôle essentiel est d'améliorer la stabilité des sols compressibles en minimisant les tassements et en renforçant leur capacité portante.

3.4.1. Inclusions semi-rigides / souples

A. Colonnes ballastées

Les colonnes ballastées (Figure 3.3) sont une technique de renforcement des sols qui consiste à insérer et compacter des matériaux granulaires sans liant. Elles peuvent être disposées de manière isolée, en ligne, en groupe, ou selon un maillage variable, en fonction des exigences du projet. Utilisées principalement pour stabiliser les sols à faible résistance mécanique (argiles, limons, sables limoneux, remblais hétérogènes), elles sont inadaptées aux terrains organiques ou instables. La mise en place se fait par deux procédés : à voie sèche, avec de l'air comprimé, ou à voie humide, avec injection d'eau. Le choix du procédé dépend de la saturation du sol et des caractéristiques des matériaux. Cependant, cette technique nécessite une logistique importante pour l'acheminement des matériaux et l'installation des équipements (Dhaybi, 2015).

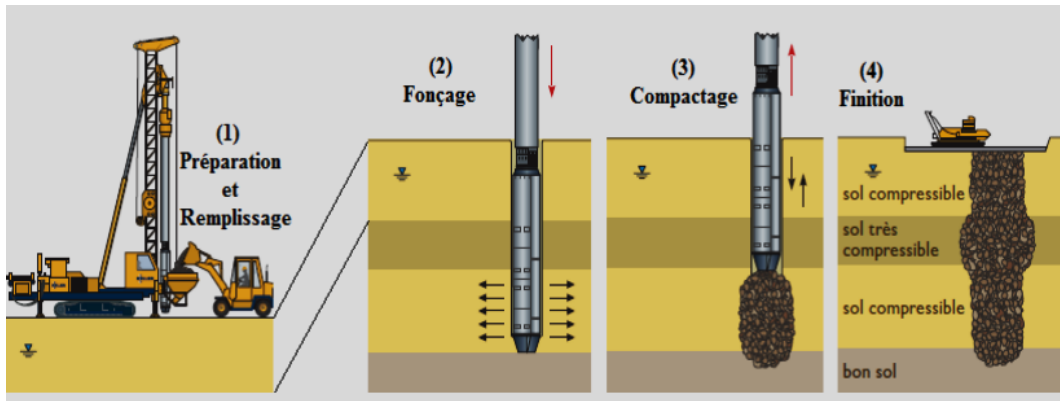


Figure 3.3. Colonnes ballastées.

La mise en œuvre (Figure 3.4) des colonnes ballastées repose sur un processus de forage et de compactage contrôlé. Tout d'abord, un avant-trou est réalisé à l'aide d'une aiguille vibrante, dont le diamètre varie généralement entre 0.25 m et 0.50 m. Ce forage est facilité par l'effet combiné de la vibration de l'aiguille et d'une injection d'eau à sa base, permettant d'évacuer les particules fines et d'accélérer l'opération. Une fois la profondeur souhaitée atteinte, du gravier est progressivement introduit et compacté par vibration au fur et à mesure du retrait de l'aiguille. Cette technique assure une bonne pénétration du matériau dans le sol, aboutissant à la formation d'une colonne ballastée dont le diamètre final, compris entre 0.60 m et 1.20 m, dépend de la résistance du sol environnant (Vautrain, 1980).



Figure 3.4. Mise en œuvre des colonnes ballastées.

3.4.2. Inclusions rigides

L'inclusion rigide est une technique de renforcement du sol consistant à insérer une colonne en béton ou en mortier, adaptée à tous types de terrains, y compris les sols fortement compressibles. Les inclusions rigides génèrent des forces de frottement le long de leur fût ainsi que des réactions en pointe. L'ajout de petites dalles en surface permet d'améliorer leur performance et d'optimiser leur efficacité (Dhaybi, 2015).

A. Pieux forés

Les pieux forés (Figure 3.5), en tant qu'inclusions rigides, sont des éléments cylindriques en béton introduits dans le sol dans le but d'améliorer la portance et de réduire les tassements, sans être directement connectés à la structure qu'ils supportent. Contrairement aux pieux traditionnels, leur fonction n'est pas de transmettre les charges directement depuis la structure, mais d'agir en complément du sol en renforçant la masse globale. Ce type d'inclusion est particulièrement adapté aux sols compressibles tels que les limons ou les argiles molles, où il permet de limiter les déformations différentielles et d'optimiser le comportement des fondations.



Figure 3.5. Pieux forés.

La mise en œuvre des pieux forés (Figure 3.6) débute par le forage du sol à l'aide d'une tarière ou d'une hélice continue jusqu'à la profondeur souhaitée. Une fois le forage terminé, le trou est rempli de béton. Ces inclusions ne sont pas liées à la structure, mais un matelas granulaire est disposé à leur sommet pour assurer la répartition des charges entre le sol naturel et les inclusions. La qualité d'exécution (profondeur, diamètre, et homogénéité du béton) est essentielle pour garantir l'efficacité du renforcement apporté par cette technique.

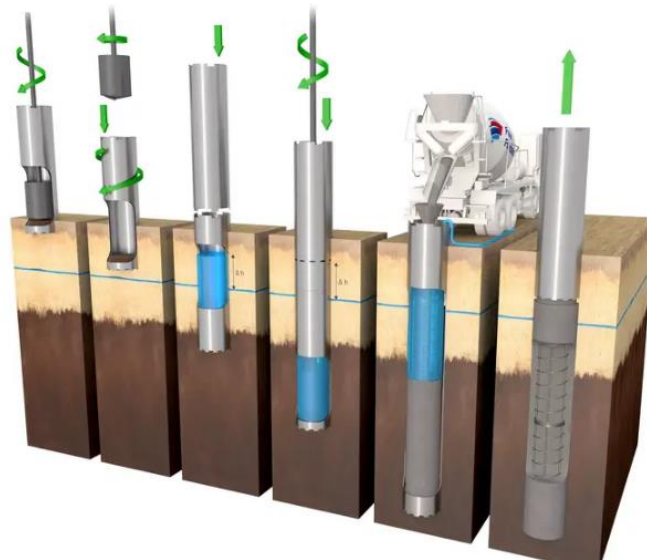


Figure 3.6. Procédé de mise en œuvre des pieux forés.

B. Jet grouting

Le jet grouting (Figure 3.7) est une méthode de renforcement des sols visant à stabiliser les terrains meubles en injectant un coulis de ciment sous haute pression dans le sol en place. Cette technique est couramment employée dans les ouvrages souterrains pour assurer l'étanchéité des excavations profondes, renforcer les structures enterrées et stabiliser les zones situées aux abords des tunnels excavés par tunnelier. Elle est également utilisée pour colmater les joints défectueux des parois moulées (Shen, Du, & Luo, 2010).



Figure 3.7. Technique de jet grouting.

Le procédé (Figure 3.8) consiste à projeter un coulis de ciment à grande vitesse à travers une buse rotative, ce qui entraîne l'érosion du sol en place et son mélange avec le ciment afin de former une colonne de sol traité. Les études ont montré que ces colonnes peuvent atteindre une résistance au cisaillement de plusieurs mégapascals, améliorant ainsi considérablement la portance du sol. Développé et breveté en 1968 sous l'appellation Chemical Churning Pile

(CCP), le jet grouting a évolué au fil du temps grâce aux avancées technologiques. Différentes variantes ont ainsi vu le jour, notamment les systèmes à simple, double et triple fluide, ainsi que des méthodes plus avancées comme le SSS-MAN, le Rodin Jet Pile (RJP) et le Metro Jet System (MJS).

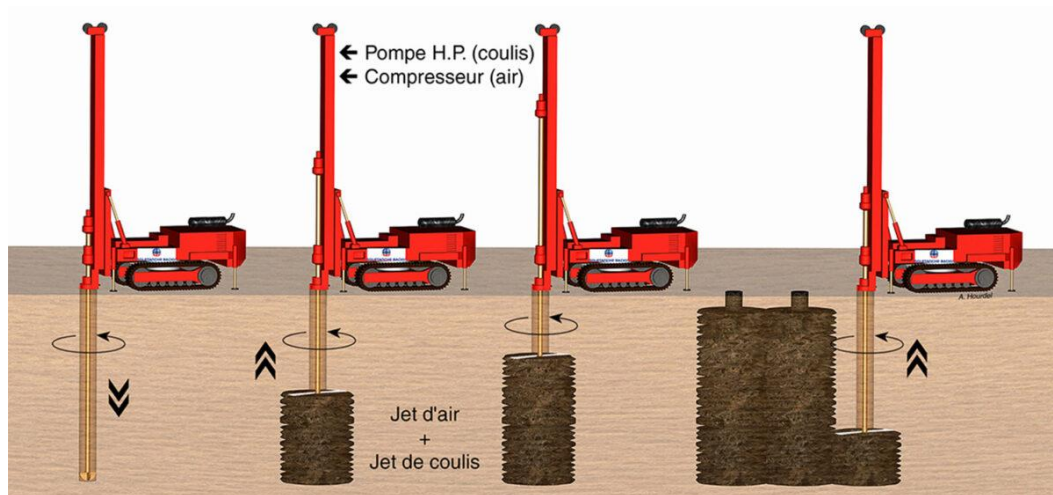


Figure 3.8. Procédé de mise en œuvre du Jet Grouting.

C. Soil mixing

Développée dans les années 1960 en Scandinavie et au Japon, la technique du soil mixing (Figure 3.9) est une méthode de traitement des sols visant à améliorer leurs propriétés mécaniques et environnementales. Elle consiste à incorporer un liant hydraulique directement dans le sol en place à l'aide d'un dispositif de malaxage spécifique (Probaha, 1998).



Figure 3.9. Technique de soil mixing.

Soil mixing se décline en plusieurs techniques selon le mode d'injection et de mélange du liant avec le sol. On distingue le Deep mixing method (DMM) (Figure 3.10) est une technique de stabilisation des sols qui consiste à mélanger in situ un liant hydraulique avec le sol à l'aide d'outils de coupe et de malaxage. Les colonnes traitées, de 0.6 à 1.5 m de

diamètre et jusqu'à 40 m de profondeur, peuvent être réalisées par injection sèche ou en suspension, parfois renforcée par une injection sous haute pression (Bruce & Geosystems, 2000). Soil mixing à sec consiste à injecter un liant en poudre directement dans le sol, où il réagit avec l'humidité naturelle pour former une structure stabilisée. Cette méthode est particulièrement adaptée aux sols organiques et très humides. À l'inverse, le soil mixing humide repose sur l'injection d'un coulis liquide, assurant un mélange plus homogène et une meilleure répartition du liant, ce qui le rend plus efficace pour les sols argileux ou limoneux.

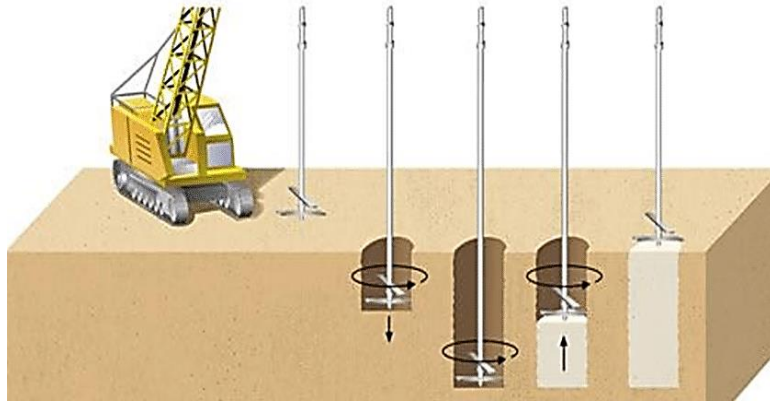


Figure 3.10. Méthode deep soil mixing in situ (Raju & Valluri, 2008).

D. Inclusions rigides préfabriquées

Les inclusions rigides préfabriquées sont des éléments structuraux fabriqués en usine puis installés dans le sol par battage, vibrofonçage ou fonçage statique (Figure 3.11). Elles se distinguent par leur qualité maîtrisée et leur mise en œuvre rapide, permettant d'améliorer la capacité portante des sols compressibles et de limiter les tassements. Ces inclusions peuvent être en béton armé, en acier ou en matériaux composites, et sont adaptées à divers contextes géotechniques. Leur principal avantage réside dans leur installation sans excavation, réduisant ainsi l'impact environnemental et les délais de réalisation des projets.



Figure 3.11. Technique d'inclusions rigides préfabriquées.

Malgré leurs avantages, les inclusions rigides préfabriquées présentent certaines limites. Leur mise en place (Figure 3.12) peut être complexe dans les sols très denses ou encombrés d'obstacles, nécessitant parfois un préforage. De plus, le battage ou le vibrofonçage peuvent engendrer des nuisances sonores et vibratoires, posant des contraintes en milieu urbain ou à proximité de structures sensibles. Enfin, leur longueur étant prédéfinie en usine, elles offrent moins de flexibilité d'adaptation aux variations de sol rencontrées sur site.

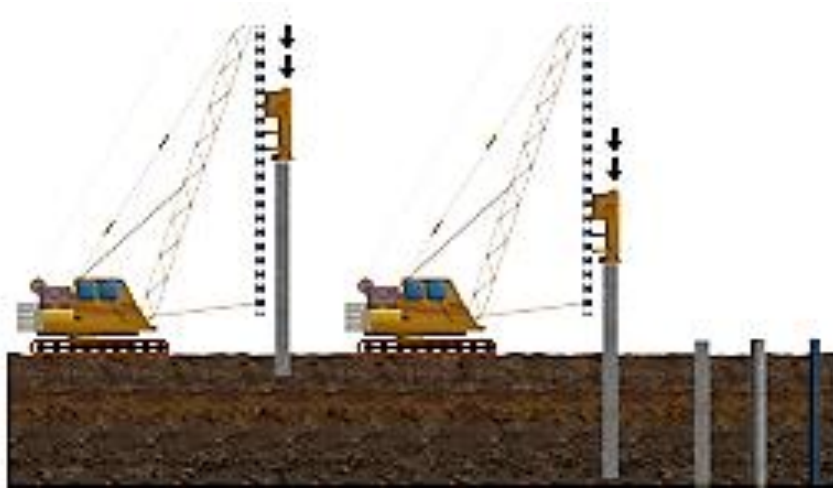


Figure 3.12. Processus de mise en place d'un pieu battu par battage.

3.5. Principe de fonctionnement du renforcement par inclusions rigides

La figure 3.13 présente le principe du renforcement des sols par inclusions rigides, une technique permettant de transmettre les charges exercées par les ouvrages (remblais, dallages, structures, etc.) vers une couche de sol plus stable en profondeur. Ce transfert repose sur l'interaction entre un réseau d'inclusions rigides et un matelas de répartition, impliquant deux mécanismes principaux : la dissipation des charges au sein du matelas et la transmission des efforts le long des inclusions.

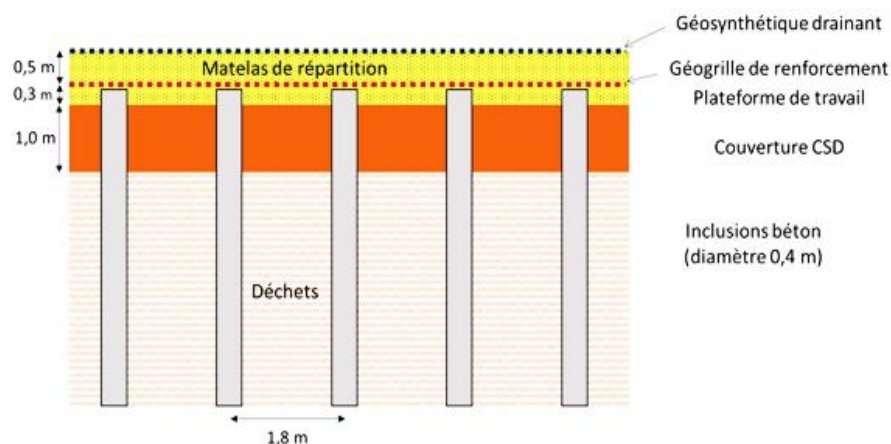


Figure 3.13. Principe du renforcement des sols par inclusions rigides (Ferber, Bourguet, Ouvry, Cibot, & Gautier-Bret, 2015).

Lorsqu'une charge est appliquée en surface, une zone de rupture se forme au-dessus des inclusions rigides, prenant la forme d'un cône dont l'angle dépend du frottement interne du sol (Figure 3.14). Cette zone de cisaillement joue un rôle clé dans la transmission des charges en canalisant les efforts vers les inclusions rigides, qui les transfèrent ensuite aux couches profondes plus résistantes. Ce phénomène permet de limiter les tassements différentiels, d'améliorer la portance du sol et d'assurer une meilleure stabilité aux fondations superficielles reposant sur un sol renforcé.

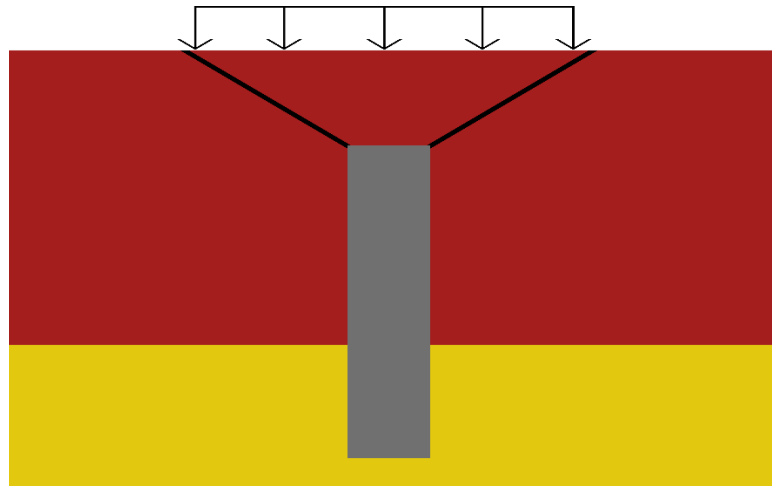


Figure 3.14. Schéma de la zone de confinement au-dessus d'une inclusion rigide.

Les inclusions rigides, implantées verticalement dans le sol compressible jusqu'à une couche portante en profondeur, assurent le transfert des charges appliquées. Cette transmission repose sur deux mécanismes distincts : une partie de la charge est directement reprise par la tête de l'inclusion et transférée par un effort de pointe, tandis que l'autre est absorbée par le frottement latéral généré par les tassements différentiels entre l'inclusion et le sol environnant. La disposition des inclusions varie selon les exigences du projet et suit généralement un maillage carré ou triangulaire, permettant d'optimiser la répartition des charges. Chaque configuration est caractérisée par un taux de recouvrement α , défini comme le rapport entre la surface d'une tête d'inclusion et celle d'une maille élémentaire (Figure 3.15) (Dinh, 2009).

$$\alpha = \frac{A_p}{A_s}$$

avec

α : taux de recouvrement

A_p : surface de la tête d'une inclusion rigide

A_s : surface de la maille élémentaire (l'unité du maillage)

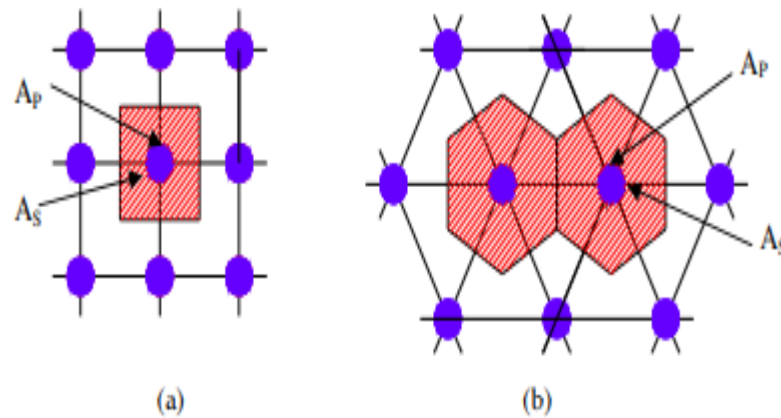


Figure 3.15. Différents types de maillages pour les réseaux d'inclusions rigides a) maillage carré, b) maillage triangulaire (Dinh, 2009).

3.6. Mécanismes de transfert de charges

3.6.1. Matelas de transfert de charges

Le matelas de transfert de charge (Figure 3.16), constitué généralement de matériaux granulaires tels que le gravier, le ballast ou des mélanges traités, joue un rôle fondamental dans le renforcement des sols par inclusions rigides. Il permet d'assurer une répartition homogène des charges en surface, de limiter les tassements différentiels et de transférer efficacement les efforts vers les inclusions rigides. Son efficacité repose sur plusieurs paramètres essentiels, notamment son épaisseur, la nature des matériaux utilisés et leur compactage. Une épaisseur suffisante favorise le développement optimal de l'effet de voûte, améliorant ainsi la concentration des charges sur les têtes des inclusions. L'utilisation de matériaux à forte capacité portante renforce la rigidité du matelas et réduit les déformations différentielles. Enfin, un compactage soigné assure une transmission efficace des charges et contribue à la stabilité et à la durabilité du système de renforcement.

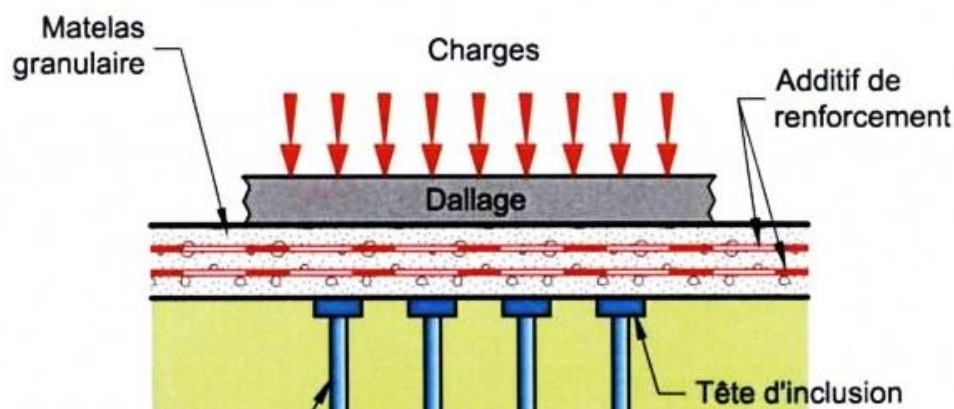


Figure 3.16. Matelas de transfert de charges.

L'épaisseur du matelas de transfert se situe généralement entre 40 et 80 cm, selon les exigences du projet. En plus de son rôle dans la diffusion des charges vers les inclusions, il

contribue à réduire les sollicitations structurales comme les moments de flexion dans les dallages ou les semelles. Il peut être constitué de matériaux granulaires compactés, de sols améliorés à l'aide de liants hydrauliques tels que la chaux ou le ciment, ou encore renforcé par des nappes de géosynthétiques pour mieux répartir les efforts. Le matériau choisi doit garantir une rigidité adaptée, ni trop faible ni excessive, afin d'éviter un comportement analogue à une dalle portée, ce qui irait à l'encontre du principe même des fondations sur inclusions rigides (ASIRI, 2012).

Le matelas granulaire transfère les charges vers les inclusions rigides par des mécanismes d'effet voûte (Figure 3.17) et de cisaillement, réduisant ainsi les tassements du sol compressible (Girout, Blanc, Thorel, & Dias, 2013).

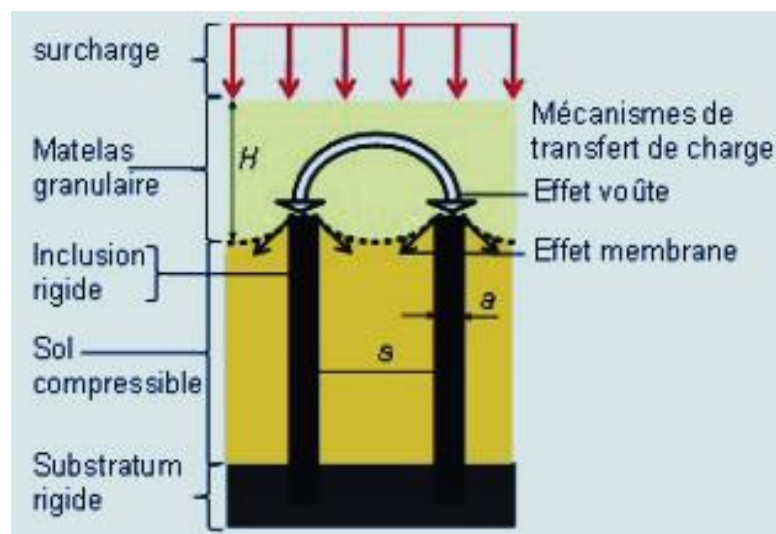


Figure 3.17. Mécanisme du transfert de charge dans matelas (Girout et al., 2013).

3.6.2. Têtes d'inclusions

La tête d'inclusion (Figure 3.18), située à l'extrémité supérieure de l'inclusion rigide, influence directement l'efficacité du renforcement à travers le « taux de couverture », défini comme le rapport entre la surface de sa section droite et celle de la maille du renforcement, généralement compris entre 2 et 10 %. Dans la plupart des cas, l'inclusion est simplement ancrée dans le matelas de répartition, mais pour optimiser ce taux, il est possible d'élargir son diamètre ou d'y ajouter une dalle. Deux approches existent : un maillage dense d'inclusions uniformes ou des éléments plus espacés avec une tête élargie, les deux offrant un taux de recouvrement similaire. Toutefois, le choix de la géométrie des têtes dépend aussi de considérations économiques (ASIRI, 2012).

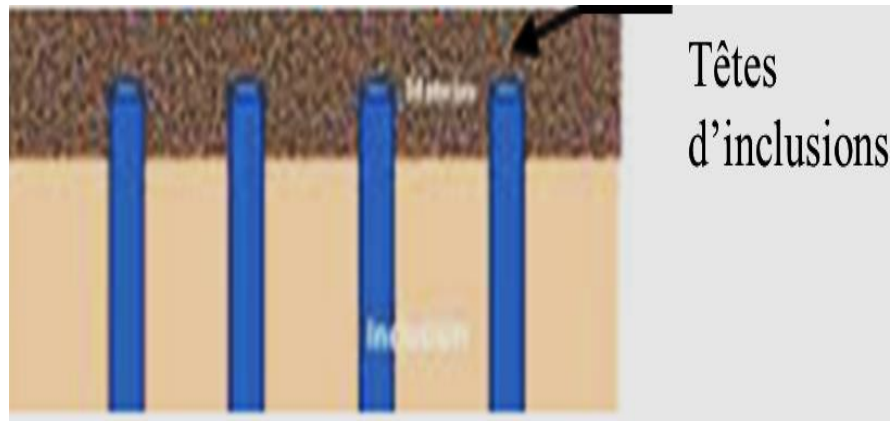


Figure 3.18. Têtes d'inclusions.

3.6.3. Nappe de géosynthétique

L'intégration d'une ou plusieurs nappes de géosynthétiques, qu'il s'agisse de géotextiles ou de géogrilles, améliore la rigidité horizontale du matelas, optimisant ainsi le transfert des charges vers les inclusions rigides. Lorsque le sol encaissant se tasse sous l'effet du chargement, la mise en tension de la nappe génère un effet membrane, contribuant à la redistribution des charges et à la réduction des tassements différentiels.

3.6.4. Dalettes des inclusions rigides

Les dalettes, placées entre le matelas de répartition (Figure 3.19) et les inclusions rigides, jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de la transmission des charges vers les inclusions. En augmentant la surface de contact entre le matelas et les têtes des inclusions, elles permettent une répartition plus homogène des efforts, réduisant ainsi les concentrations de contraintes et améliorant l'efficacité globale du renforcement. Elles sont particulièrement utilisées lorsque l'espacement entre les inclusions est relativement important, afin de compenser la diminution du taux de couverture. Le choix de leur dimension et de leur rigidité dépend des caractéristiques du sol, du type de chargement et des exigences de performance du renforcement.

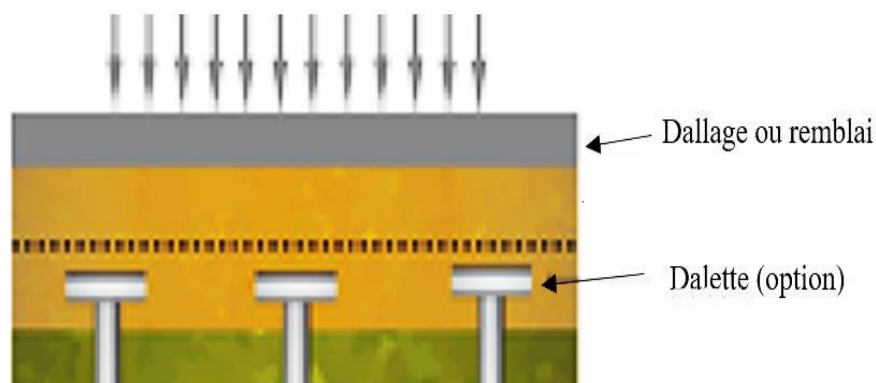


Figure 3.19. Dalettes des inclusions rigides.

3.6.5. Interaction sol-inclusion

Les inclusions rigides permettent de transférer les charges de l'ouvrage vers des couches de sol plus résistantes afin d'améliorer la portance et de réduire les tassements. Elles sont sollicitées par la charge appliquée sur leur tête et par le frottement du sol encaissant. Une profondeur appelée point neutre marque l'équilibre des tassements entre le sol et les inclusions, générant un frottement négatif au-dessus et un frottement positif en dessous, accompagné d'un effort en pointe. L'efficacité du renforcement dépend de plusieurs paramètres, notamment le taux de couverture, la compressibilité et la consolidation du sol, la rigidité des inclusions, ainsi que la résistance de pointe et le frottement latéral. Ces facteurs influencent la répartition des charges et les tassements différentiels au sein du sol renforcé (ASIRI, 2012).

Le frottement négatif se produit lorsque le sol tasse plus que l'inclusion, favorisant un transfert progressif de charge qui allège l'horizon compressible sous le matelas de répartition. À l'inverse, le frottement positif se manifeste lorsque l'inclusion descend plus que le sol environnant, contribuant ainsi directement au transfert des charges vers les couches profondes (Figure 3.20).

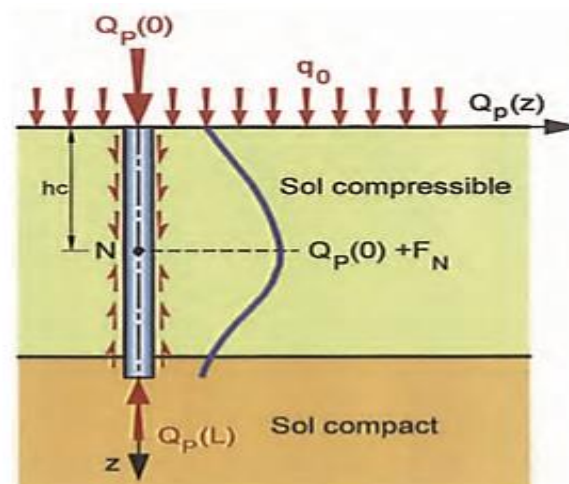


Figure 3.20. Frottements positif et négatif (ASIRI, 2012).

3.7. Comportement des inclusions rigides

3.7.1. Comportement de l'inclusion rigide isolée

Une inclusion rigide isolée se comporte comme un petit pieu. Sous l'effet de la charge appliquée sur sa tête, le frottement latéral est activé en premier, tandis que la pointe réagit plus progressivement. La résistance maximale est atteinte lorsque le déplacement de la tête atteint un dixième du diamètre de l'inclusion (ASIRI, 2012).

3.7.2. Comportement d'une inclusion rigide au sein d'un groupe

Dans un groupe d'inclusions rigides, le tassement du sol compressible autour des inclusions provoque un frottement négatif sur leur partie supérieure, qui augmente avec la hauteur du remblai ou de la surcharge. À cet endroit, le sol descend plus vite que l'inclusion. En revanche, sur la partie inférieure, un frottement positif apparaît, car l'inclusion se déplace plus rapidement que le sol environnant. Il existe un point appelé « plan neutre » où l'inclusion et le sol ont le même déplacement vertical. À ce niveau, le frottement latéral est nul et l'effort interne de l'inclusion est maximal (ASIRI, 2012).

3.8. Dimensionnement du renforcement par inclusions rigides

Le dimensionnement des inclusions rigides vise à optimiser le transfert de charge entre la structure et le sol en renforçant les terrains compressibles. Il repose sur plusieurs approches, notamment analytiques, numériques et expérimentales. Les modèles analytiques permettent d'estimer la répartition des charges en fonction des caractéristiques du sol et du matelas de répartition. Les modèles numériques, souvent basés sur la méthode des éléments finis, offrent une simulation plus détaillée du comportement du sol renforcé sous diverses conditions de charge. Enfin, les modèles expérimentaux, incluant des essais en laboratoire et des observations in situ, servent à valider les hypothèses théoriques et à ajuster les paramètres de calcul. L'objectif principal du dimensionnement est d'assurer la stabilité des fondations, de limiter les tassements différentiels et d'optimiser l'efficacité des inclusions en fonction des contraintes du projet.

3.8.1. Approches analytiques

Les approches analytiques développées pour le renforcement d'un sol compressible par inclusions rigides visent à établir des formules permettant de calculer la distribution des contraintes à la base du matelas granulaire. L'efficacité de cette technique est généralement évaluée par le coefficient d'efficacité proposé par (Hewlett, 1988), qui mesure la proportion de charge transmise directement aux inclusions rigides. La concentration de la charge sur la tête de l'inclusion est influencée par les effets de voûte et de membrane, notamment en présence d'un renforcement géosynthétique. Plusieurs méthodes permettent d'estimer la contrainte verticale exercée sur le sol compressible ou sur les inclusions rigides, ainsi que la tension développée dans le géosynthétique. Certaines études ont étendu ces approches pour traiter le problème de manière tridimensionnelle ou plus globale, offrant ainsi une meilleure compréhension du comportement des sols renforcés (Dinh, 2009).

3.8.2. Approches numériques

Ces dernières années, les approches numériques ont connu un développement significatif pour modéliser le comportement des sols renforcés par inclusions rigides, offrant une analyse plus détaillée du transfert de charge et de l'interaction sol-structure. Ces modèles se distinguent par les méthodes de discrétisation utilisées, les lois de comportement des matériaux appliquées aux sols, aux inclusions et au matelas de répartition, ainsi que par la prise en compte des interactions aux interfaces, telles que l'adhérence et le frottement. Grâce à ces avancées, il est possible d'affiner les prévisions en matière de tassements, de portance et de distribution des contraintes, améliorant ainsi la fiabilité du dimensionnement des ouvrages géotechniques.

3.9. Mise en œuvre des inclusions rigides

La mise en œuvre des inclusions rigides suit un processus rigoureux visant à assurer leur efficacité dans l'amélioration des sols compressibles. Elle débute par le choix de la technique d'installation, qui peut inclure le forage, le vibrofonçage ou l'injection selon la nature du sol et le type d'inclusion utilisé (béton, mélange cimentaire). Une fois les inclusions installées, un matelas de répartition est mis en place afin d'homogénéiser la transmission des charges et d'optimiser le transfert vers les inclusions. Enfin, des contrôles de qualité sont effectués, incluant des essais de chargement et des vérifications de verticalité, afin de garantir la performance de l'ouvrage.

3.9.1. Exécution de la plate-forme de travail

Avant le début des travaux, une plate-forme de travail est aménagée (Figure 3.21) pour faciliter la circulation des engins et garantir des conditions optimales d'exécution. Ses caractéristiques doivent être adaptées au type de matériel utilisé et aux contraintes du chantier. Toutefois, certaines actions peuvent endommager les inclusions rigides, notamment la circulation d'engins lourds à proximité des têtes d'inclusions, la pose de réseaux, le terrassement des semelles ou encore la reprise et le compactage de la plate-forme après le renforcement du sol. Une attention particulière est donc requise pour préserver l'intégrité des inclusions et assurer la stabilité de l'ouvrage (ASIRI, 2012).



Figure 3.21. Plate-forme de travail.

3.9.2. Exécution des inclusions rigides

Les inclusions rigides sont mises en place soit par extraction du sol, soit par refoulement, et se classent en cinq types : forées avec extraction ou refoulement, vibrofoncées ou battues (moulées en place ou préfabriquées), et celles formées par injection de liant (colonnes de sol traité, jet grouting). Elles peuvent être constituées de mortier, béton, acier ou bois, avec un module de déformation nettement supérieur à celui du sol. Le choix du procédé d'exécution dépend de plusieurs critères, notamment la stabilité du forage, la gestion des déblais, les vibrations, la possibilité d'armature, la durabilité face aux agressions chimiques, ainsi que les contraintes de phasage et les ressources disponibles. La mise en œuvre des inclusions rigides suit un cadre défini par l'entreprise, intégrant le dimensionnement, le choix des matériaux et les exigences de durabilité. Une procédure détaillée encadre les ressources, la méthodologie et le contrôle qualité. L'organisation du chantier inclut l'implantation, les accès et la sécurisation. Le suivi repose sur un contrôle rigoureux et des échanges en réunion de chantier (ASIRI, 2012).

Tableau 3.1 Caractéristiques des principaux types d'inclusions répertoriées (ASIRI, 2012).

Types d'inclusions		Vibrations	Bruit	Déblais	Module indicatif à long terme (MPa)	
Préfabriquées	Bois	oui	oui	non	10000 à 15000	
	Métal (acier)	oui	oui	non	210000	
	béton	oui	oui	non	10000-20000	
Fabriquées in situ	Battues, foncées et forées	Foncées par battage	oui	oui	non	Mortier : 5000-10000 Béton C15 : 9000 Béton C25 : 11000
		Vibrofoncées	Oui	non	faible	
		Forées simples	Non	non	oui	
		Forées tubées ou forées boue	Non	non	oui	
		Forées à la tarière continue	Non	non	oui	
		Forées avec refoulement	Non	non	faible	
	Colonnes de sol traité	Soil mixing	Non	non	faible	Variable 250-9000
		Jet grouting	non	non	variable	500 à 1000 Rc

3.9.3. Exécution des têtes d'inclusion et du dispositif de répartition

L'arase ajuste la tête de l'inclusion sur un matériau frais, soit en surface, soit en profondeur, par arrêt du coulage, excavation avant prise ou reforage. Le recépage, lui, prépare la tête durcie pour garantir un matériau sain, par sciage, marteau piqueur ou recépage chimique, excluant les brise-roches hydrauliques. Si l'arase est précise, le recépage devient inutile, sauf pour une arase basse sous semelle, nécessitant 10 cm de recépage. Les dalles ou têtes élargies, coulées en place ou préfabriquées, doivent limiter leur diamètre à trois fois celui des inclusions et peuvent être armées selon les charges appliquées. Le matelas de répartition, couche de remblai entre inclusions et structure, varie selon le type de fondation et peut intégrer la plate-forme de travail. Sa mise en œuvre doit garantir la compacité et éviter l'excavation sous les arases pour limiter les risques de cisaillement (ASIRI, 2012).

3.10. Avantages et inconvénients

Avantages

- Réduction des tassements.
- Augmentation de la capacité portante.
- Adaptabilité à divers sols.
- Optimisation des fondations superficielles.
- Faible impact sur l'environnement.

Inconvénients

- Coût élevé.
- Contraintes géotechniques.
- Risque de cisaillement latéral.
- Interaction sol-inclusion complexe.
- Difficulté de réversibilité.

3.11. Conclusion

Les inclusions rigides représentent une méthode de renforcement des sols particulièrement adaptée aux terrains meubles et compressibles, où les techniques traditionnelles d'amélioration ne garantissent pas toujours les performances requises. Elles permettent de réduire les tassements absolus et différentiels, d'augmenter la capacité portante du sol et d'améliorer la stabilité des structures. Cette technique s'applique aussi bien aux bâtiments industriels qu'aux infrastructures routières, aux dallages ou aux ouvrages en terre, offrant une alternative économique aux fondations profondes.

Le choix des inclusions rigides doit toutefois être guidé par une étude approfondie du sol, prenant en compte sa nature, son épaisseur compressible et la présence éventuelle d'une nappe phréatique. De même, les caractéristiques de l'ouvrage, telles que sa géométrie, ses charges et ses contraintes d'exploitation, influencent la conception du dispositif. L'intégration des contraintes de réalisation, incluant les délais et les interfaces avec d'autres travaux, est également essentielle pour garantir la faisabilité du projet.

Enfin, la mise en œuvre des inclusions rigides nécessite une conception rigoureuse et un suivi strict des travaux, notamment dans le dimensionnement des inclusions et du matelas granulaire, afin d'assurer un transfert de charge optimal. Une mauvaise exécution peut compromettre les performances attendues et entraîner des déformations différées ou des tassements non maîtrisés. Ainsi, bien que cette technique offre des avantages indéniables, elle requiert une approche méthodique et une expertise géotechnique approfondie pour garantir son efficacité et sa pérennité.

Chapitre 4

Introduction à la méthode des éléments finis et présentation de PLAXIS 2D

4.1. Introduction

En géotechnique, les calculs théoriques jouent un rôle clé dans la prévision du comportement des sols et des ouvrages. Grâce aux progrès des méthodes numériques, ces calculs permettent d'améliorer la fiabilité des analyses et de mieux anticiper les risques géotechniques. Au-delà de l'aspect technique, ils ont un impact économique significatif en optimisant les solutions de fondation. Dans ce contexte, la méthode des éléments finis s'est imposée comme un outil incontournable pour analyser avec précision les interactions sol-structure et améliorer la conception des infrastructures.

La méthode des éléments finis est un outil fondamental en ingénierie géotechnique, offrant une analyse détaillée du comportement des sols et des structures sous diverses sollicitations. Elle permet de modéliser avec précision les interactions sol-structure et de considérer la complexité des matériaux, notamment leur non-linéarité. Grâce à ces capacités, elle s'est largement imposée comme une technique de référence pour l'étude et l'optimisation des ouvrages géotechniques.

PLAXIS 2D est un logiciel spécialisé dans l'application de la méthode des éléments finis en géotechnique. Il offre une plateforme performante et intuitive permettant de modéliser avec précision le comportement des ouvrages géotechniques, des sols et des phénomènes complexes tels que le tassement, la stabilité des pentes et les interactions sol-structure.

Grâce à une large gamme de modèles de sol, ce logiciel permet une représentation réaliste du comportement des matériaux. Sa flexibilité dans la définition des conditions aux limites, des sollicitations et des phases de construction en fait un outil indispensable pour l'analyse et l'optimisation des projets géotechniques.

4.2. Historique de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) a émergé au milieu du XXe siècle, en réponse aux besoins croissants d'analyse numérique des structures complexes, notamment dans l'aéronautique et le génie civil. Son développement initial est attribué à (Turner, Clough, Martin, & Topp, 1956), qui ont introduit le concept de formulation par éléments finis pour l'analyse des structures. Par la suite, (Clough, 1960) a été le premier à utiliser explicitement le terme "Finite Element Method" et à appliquer cette approche à l'analyse des contraintes planes.

Avant l'essor de l'informatique, la MEF était principalement développée sous forme analytique et manuelle, limitant son application à des problèmes simples. Les ingénieurs

utilisaient des méthodes approchées basées sur des formulations matricielles.

Avec l'évolution de l'informatique, la MEF a connu des avancées significatives, renforçant son utilisation en géotechnique pour l'analyse des sols et des ouvrages en interaction avec le sous-sol. Initialement développée pour les structures, elle a été progressivement adaptée aux problématiques géotechniques, permettant d'étudier des phénomènes complexes comme la consolidation, la stabilité des pentes et le comportement des fondations. L'amélioration des modèles de comportement des sols et des techniques de discrétisation a contribué à affiner les simulations, offrant ainsi aux ingénieurs un outil puissant pour optimiser la conception et la sécurité des infrastructures.

4.3. Domaine d'application

La MEF est largement appliquée en géotechnique pour l'analyse du comportement des sols et des structures souterraines sous diverses sollicitations. Elle permet de modéliser des problèmes complexes impliquant des interactions sol-structure, la consolidation des sols, la stabilité des pentes et les effets des chargements dynamiques, comme ceux dus aux séismes. Grâce à la MEF, il est possible de prendre en compte la nature hétérogène des sols et les comportements non linéaires liés aux lois constitutives des matériaux géotechniques. Cette méthode est particulièrement utilisée dans la conception des fondations, des tunnels, des digues et des ouvrages de soutènement, permettant ainsi d'optimiser les solutions techniques et de garantir la sécurité des infrastructures.

4.4. Application de la méthode des éléments finis

La MEF repose sur un processus systématique permettant de résoudre des problèmes complexes en les discrétisant en sous-domaines appelés éléments finis. Son principe général suit plusieurs étapes clés.

4.4.1. Discrétisation des éléments

La discrétisation d'un domaine continu en un maillage composé d'éléments finis interconnectés par des nœuds. Ce maillage permet d'approximer la solution d'un problème en résolvant un système d'équations issu de l'équilibre mécanique. En deux dimensions, les éléments sont généralement triangulaires ou quadrilatéraux, avec des nœuds situés aux coins. Lorsque la géométrie présente des courbes, des nœuds intermédiaires peuvent être ajoutés pour améliorer la précision de la représentation.

La conception du maillage doit prendre en compte plusieurs critères, notamment la précision géométrique, la présence de discontinuités et les conditions aux limites. Les zones soumises

à des variations rapides de contraintes nécessitent un raffinement du maillage afin d'améliorer la précision des résultats. Pour les matériaux linéaires, cette étape est relativement simple, tandis que pour les matériaux non linéaires, il faut également considérer l'historique des charges appliquées et les interactions entre les éléments. Un maillage homogène avec des éléments de forme régulière (Figure 4.1) est recommandé afin d'éviter des erreurs numériques liées à des éléments trop allongés ou distordus (Zdravković, 1999).

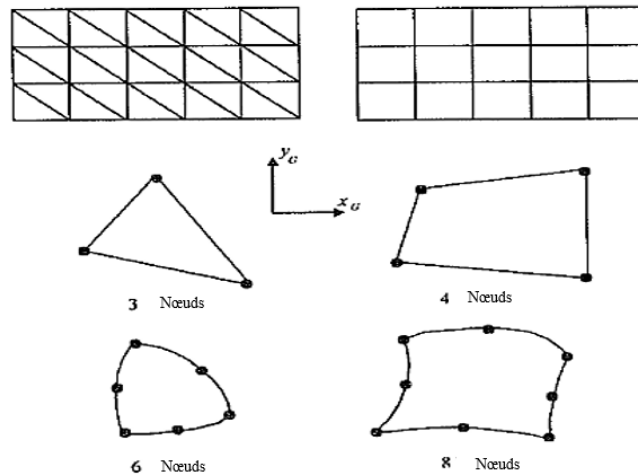


Figure 4.1. Éléments finis 2D typiques.

4.4.2. Approximation de la variable principale

Dans la méthode des éléments finis appliquée à la géotechnique, l'approximation de la variable principale consiste à choisir une grandeur à déterminer, généralement le déplacement, et à définir comment elle varie à l'intérieur de chaque élément. Cette variation est exprimée en fonction des valeurs nodales, qui sont les inconnues du problème.

4.4.3. Équations d'élément

Les équations d'élément, qui décrivent le comportement de déformation de chaque élément, sont dérivées en combinant les conditions de compatibilité, d'équilibre et les lois constitutives du matériau. Une approche courante pour établir ces équations repose sur un principe variationnel, comme le principe de l'énergie potentielle minimale. En appliquant ce principe, on obtient les équations élémentaires sous forme de matrices reliant les déplacements nodaux aux forces appliquées.

$$[K_E] \{\Delta d_E\} = \{\Delta R_E\} \quad 4.1$$

Où $[K_E]$ est la matrice de raideur de l'élément, $\{\Delta d_E\}$ est le vecteur des déplacements nodaux élémentaires incrémentaux et $\{\Delta R_E\}$ est le vecteur des forces nodales élémentaires incrémentales.

4.4.4. Équations globales

Les équations globales en MEF sont obtenues en assemblant les équations élémentaires de chaque élément du maillage. Cette étape repose sur le principe de compatibilité aux nœuds, garantissant que les déplacements et les forces internes sont cohérents sur l'ensemble de la structure. Mathématiquement, cela conduit à un système d'équations sous la forme matricielle globale.

$$[K_G] \{\Delta d_G\} = \{\Delta R_G\} \quad 4.2$$

Où $[K_E]$ est la matrice de raideur globale, $\{\Delta d_E\}$ est le vecteur de tous les déplacements nodaux incrémentaux et $\{\Delta R_E\}$ est le vecteur de toutes les forces nodales incrémentales.

4.4.5. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont essentielles pour garantir que le modèle par éléments finis représente correctement le comportement du système étudié. Elles servent à imposer des contraintes sur les déplacements ou les forces appliquées afin de refléter la réalité physique du problème. Dans l'assemblage des équations globales, les conditions aux limites influencent directement la modification de la matrice de raideur globale $[K_G]$, du vecteur des déplacements nodaux $\{\Delta d_G\}$ et du vecteur des forces nodales $\{\Delta R_G\}$.

4.4.6. Résoudre les équations globales

La résolution des équations globales consiste à résoudre le système d'équations simultanées obtenu après l'assemblage des équations élémentaires. Ce système, généralement exprimé sous la forme de l'équation (4.2), est résolu afin de déterminer les déplacements nodaux à l'ensemble des nœuds du maillage. Une fois ces déplacements connus, ils sont utilisés pour calculer les grandeurs secondaires, telles que les contraintes et les déformations, en appliquant les relations constitutives du matériau et les dérivées spatiales des champs de déplacement. Ces résultats permettent d'analyser le comportement mécanique du sol et de la structure étudiée, en prenant en compte les conditions aux limites et les chargements appliqués.

4.5. Avantages de la méthode des éléments finis

La MEF est largement utilisée en géotechnique en raison de sa capacité à modéliser des comportements complexes des sols et des ouvrages.

tableau 4.1 Types d'analyses géotechniques et leurs objectifs.

Type d'analyse	Objectif
Analyse des fondations	Permet d'étudier les tassements, la répartition des contraintes et l'interaction sol-structure.
Stabilité des pentes et des talus	Évalue les mécanismes de rupture et les facteurs de sécurité sous différentes conditions de charge
Conception des tunnels et excavations	Prend en compte les effets de soutènement, les déformations du sol et les conditions hydrauliques.
Modélisation des remblais et barrages	Analyse la consolidation, les contraintes et les déformations différées des sols fins.
Effets des séismes sur les sols et structures	Intègre des analyses dynamiques pour évaluer la liquéfaction et la réponse des ouvrages.
Amélioration des sols	Étudie l'efficacité des techniques comme les inclusions rigides, le compactage dynamique et l'injection de coulis.
Interactions sol-structure	Prend en compte l'influence des charges appliquées et des conditions de drainage sur le comportement du sol.

4.6. Limitations et optimisation de la méthode des éléments finis en géotechnique

La méthode des éléments finis (MEF) est devenue un outil incontournable en géotechnique pour analyser le comportement des sols et les ouvrages géotechniques. Cependant, elle présente des limites liées à la modélisation des sols, aux capacités informatiques et aux approximations de discrétisation, rendant l'interprétation des résultats sensible à l'expérience de l'ingénieur. Des erreurs peuvent découler du choix des paramètres, du maillage et des simplifications du modèle, influençant la fiabilité des simulations. Pour y remédier, des techniques d'adaptation du maillage, comme la méthode-h et la méthode-p, ont été développées, bien que leur coût en calcul reste élevé. De plus, les estimateurs d'erreur, bien qu'essentiels pour évaluer la précision des résultats, sont peu intégrés aux logiciels commerciaux en raison de leur complexité mathématique (Vulpe, 2011).

4.7. Importance des logiciels en MEF

Pour appliquer la MEF de manière efficace et rigoureuse, il est essentiel d'utiliser des logiciels spécialisés. En effet, la résolution manuelle des équations de la MEF est complexe et sujette aux erreurs, notamment en raison du grand nombre de calculs requis. L'utilisation de logiciels permet non seulement de minimiser ces erreurs, mais aussi de gagner un temps précieux tout en assurant une meilleure précision des résultats. Plusieurs logiciels ont été développés à cet effet, parmi lesquels Plaxis, largement utilisé en géotechnique, Abaqus, employé pour des analyses avancées en mécanique des structures et des matériaux, et

ANSYS, qui couvre un large éventail d'applications en ingénierie. Dans cette section, nous nous concentrerons sur Plaxis, un outil spécifiquement conçu pour la modélisation et l'analyse des ouvrages géotechniques.

4.8. Présentation de Plaxis 2D

Plaxis est un logiciel de calcul par la MEF spécialement conçu pour l'analyse géotechnique des sols et des ouvrages. Il permet de modéliser le comportement des sols et des structures en tenant compte des différentes conditions de chargement et des interactions sol-structure. Grâce à ses capacités avancées en simulation, Plaxis est largement utilisé pour l'étude des fondations, des tunnels, des barrages et des remblais. Il permet également de modéliser des techniques d'amélioration des sols, telles que les inclusions rigides, afin d'évaluer leur impact sur les tassements et la stabilité des ouvrages.

4.8.1. Origine et évolution du logiciel Plaxis

Le développement de Plaxis a débuté dans les années 1980 à l'Université de Technologie de Delft (TU Delft) aux Pays-Bas, en collaboration avec le ministère néerlandais de l'Infrastructure et de la Gestion de l'Eau. Le projet visait à évaluer les mouvements possibles d'une digue fluviale sur les argiles molles du barrage Oosterschelde. En 1993, pour soutenir le développement continu du logiciel, la société Plaxis BV a été fondée. En 2018, Plaxis BV a été acquise par Bentley Systems, une entreprise américaine spécialisée dans les logiciels de conception et d'ingénierie (Geoengineer.org, 5 octobre 2023).

4.9. Modules et interfaces du logiciel Plaxis

L'interface du logiciel Plaxis est conçue pour offrir une expérience utilisateur intuitive tout en permettant une modélisation géotechnique avancée. Elle est structurée en plusieurs fenêtres et barres d'outils facilitant la navigation entre les différentes étapes du calcul par la méthode des éléments finis. L'écran principal est divisé en plusieurs zones : une barre de menu regroupant les commandes essentielles, une zone graphique permettant la visualisation et la modification du modèle, ainsi qu'un panneau latéral donnant accès aux propriétés des matériaux, aux conditions aux limites et aux charges appliquées. L'organisation claire et hiérarchisée de l'interface permet une gestion fluide du projet, depuis la définition du modèle géométrique jusqu'à l'interprétation des résultats.

Ce programme intègre divers modèles de comportement du sol et comprend trois sous-programmes essentiels : les entrées (input), le calcul, et les sorties (output).

4.9.1. Module input

Le module input de Plaxis (Figure 4.2) constitue la première étape de la modélisation et permet de définir l'ensemble des paramètres nécessaires à l'analyse géotechnique. Avant de créer le modèle, l'utilisateur doit configurer les unités de mesure (longueur, force, pression, temps, etc.) et ajuster les réglages généraux tels que le type d'analyse (2D ou 3D), le système de coordonnées et les tolérances numériques. Ensuite, la géométrie du sol et des structures est définie à l'aide d'outils de dessin et d'importation. L'utilisateur attribue également les propriétés des matériaux, choisit les lois de comportement du sol et applique les conditions aux limites ainsi que les charges. Une fois ces éléments paramétrés, le maillage est généré en fonction des exigences de précision du calcul. Ce module constitue ainsi une étape clé, car une bonne configuration initiale garantit la fiabilité et l'efficacité des simulations effectuées dans Plaxis.

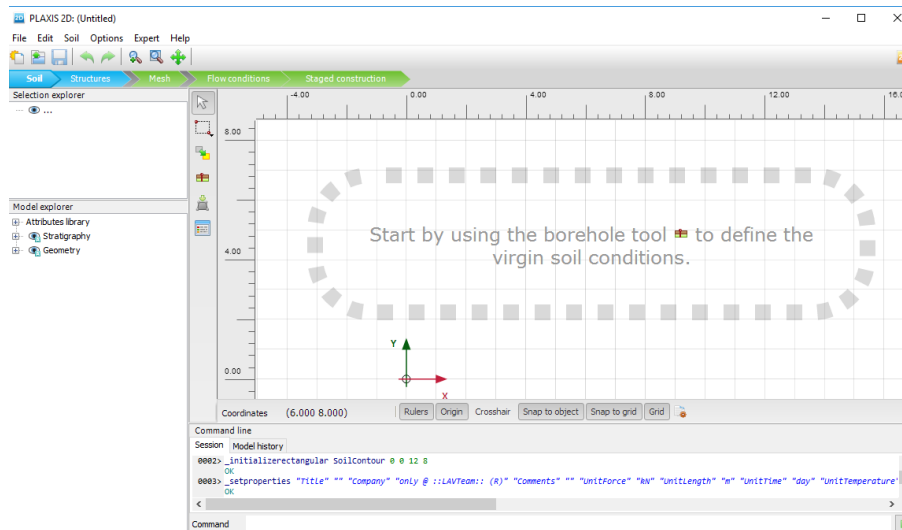


Figure 4.2. Interface du module input PLAXIS 2D.

4.9.2. Module calculs

Le module Calculs de Plaxis nous permet à l'exécution des calculs et à la simulation du comportement du sol et des structures sous charges. Avant de lancer les calculs, l'utilisateur doit définir les phases de calcul, qui permettent de simuler progressivement les conditions réelles du projet. Ces phases incluent la prise en compte des étapes de construction, de consolidation, de chargement et de déchargement, afin de mieux assimiler le comportement du sol dans des conditions progressives et réalistes. Plaxis propose plusieurs types d'analyses, notamment statique, dynamique et consolidation, en fonction des besoins de l'étude. Une fois la simulation lancée, le logiciel effectue des itérations pour assurer la convergence des résultats et détecter d'éventuelles instabilités. Ce module joue un rôle

crucial dans la fiabilité de la modélisation, car il permet d'obtenir des résultats représentatifs des phénomènes géotechniques réels.

4.9.3. Module output

Le module output de Plaxis (Figure 4.3) permet d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus après les calculs. Il offre une visualisation détaillée du comportement du sol et des structures à travers plusieurs outils graphiques et numériques. L'utilisateur peut afficher des coupes (profils) pour examiner la répartition des déformations, des contraintes et des pressions interstitielles en profondeur. De plus, le module propose des courbes (Curves) permettant de suivre l'évolution de paramètres clés, comme le tassement en fonction du temps ou la variation des contraintes sous chargement. Grâce à ces fonctionnalités, il est possible d'identifier les zones critiques du modèle, de comparer les résultats avec des données expérimentales et d'optimiser les choix de conception.

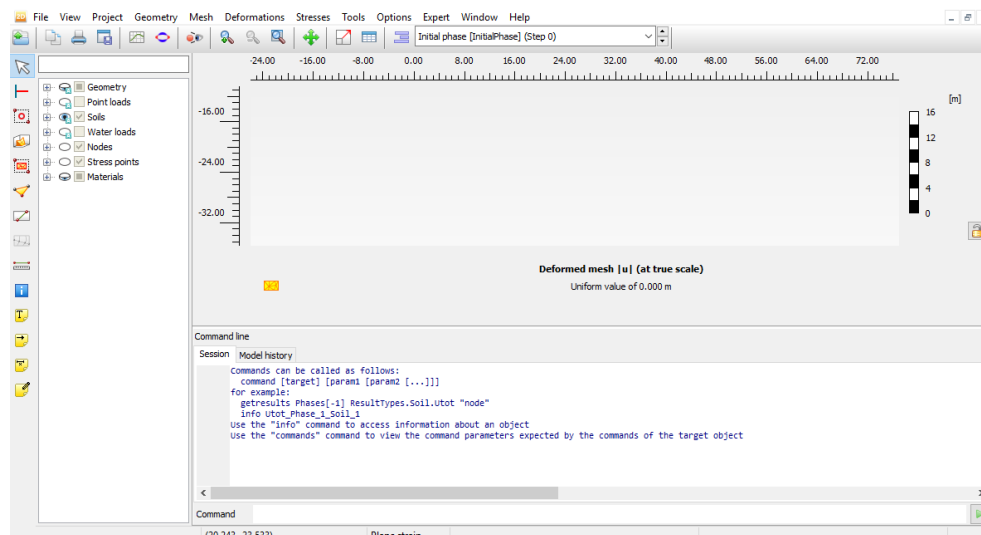


Figure 4.3. Interface du module output PLAXIS 2D.

4.10. Fonctionnalités et capacités de Plaxis

4.10.1. Lois de comportement des sols

Plaxis propose plusieurs lois de comportement (Figure 4.4) pour modéliser le sol et les ouvrages géotechniques sous diverses sollicitations. Nous présentons quelques modèles couramment utilisés en géotechnique.

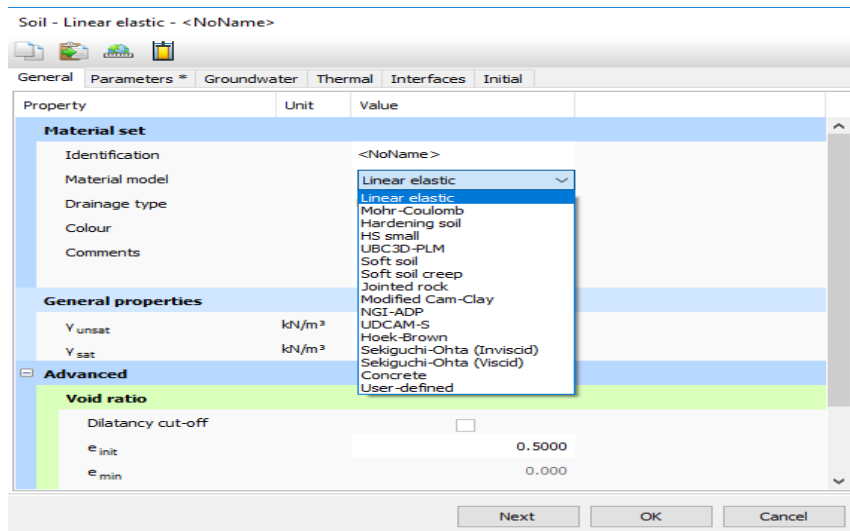


Figure 4.4. Lois de comportement qui existent dans PLAXIS 2D.

A. Modelé Mohr-Coulomb

Le modèle de Mohr-Coulomb est couramment utilisé pour simuler le comportement des sols et des roches. Ce modèle élasto-plastique parfait (Figure 4.5), sans écoulement, repose sur cinq paramètres principaux : le module d'Young (E) et le coefficient de Poisson (ν) pour l'élasticité, ainsi que la cohésion (c), l'angle de frottement interne (ϕ) et l'angle de dilatance (ψ) pour la plasticité.

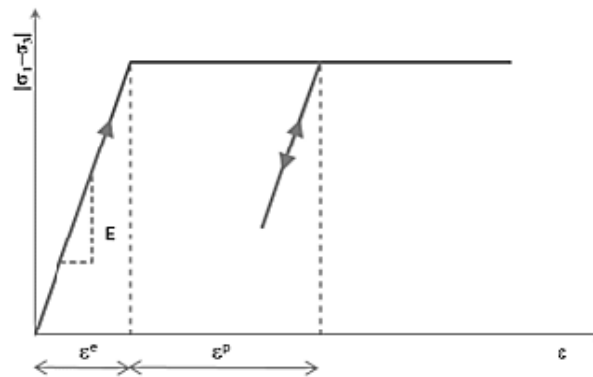


Figure 4.5. Loi contrainte-déformation du modèle Mohr-Coulomb (élasto-plastique parfait) (Lambert & Remeysen).

B. Modèle élastique linéaire

Le modèle élastique linéaire (Figure 4.7) repose sur la loi de Hooke, caractérisant une relation linéaire entre les contraintes et les déformations dans les matériaux isotropes. Ce modèle est défini par deux paramètres principaux : le module d'Young (E), qui mesure la rigidité du matériau, et le coefficient de Poisson (ν), qui décrit la relation entre les déformations axiales et transversales. Bien que ce modèle soit principalement utilisé pour des structures rigides massives placées dans le sol, il est limité pour simuler le comportement

des sols en raison de leur nature non linéaire et hétérogène.

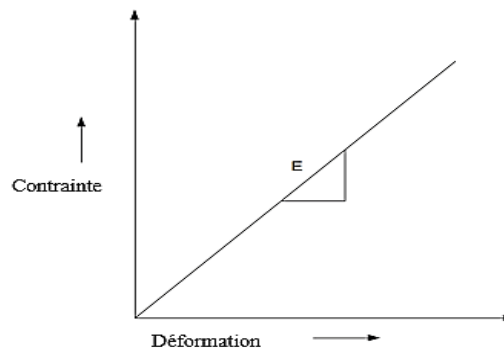


Figure 4.6. Courbe contrainte-déformation en élasticité linéaire réversible.

C. Modelé Hardening soil

Hardening Soil Model (HSM) est un modèle avancé utilisé pour simuler le comportement des sols de manière plus réaliste que le modèle de Mohr-Coulomb. Ce modèle élasto-plastique prend en compte l'écroûissage du sol en intégrant trois modules de rigidité distincts : le module de déformation triaxiale (E_{50}), le module oedométrique (E_{ocd}) et le module de déchargement-rechargement (E_{ur}) (Figure 4.7). Ces paramètres permettent de représenter avec précision la non-linéarité du comportement des sols sous différentes conditions de chargement. Le HSM est particulièrement adapté pour modéliser des phénomènes tels que le creusement de tunnels, où une description précise du comportement du sol est essentielle (Gilleron, Bourgeois, & Saitta, 2016).

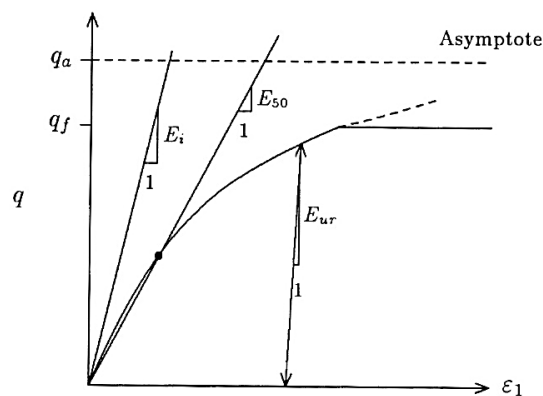


Figure 4.7. Relation contrainte-déformation hyperbolique dans le chargement primaire pour un essai triaxial drainé standard (Schanz, Vermeer, & Bonnier, 2019).

D. Modelé Soft soil

Le modelé Soft Soil est conçu pour simuler le comportement des sols très compressibles, tels que les argiles normalement consolidées, les limons argileux et les tourbes. Ce modèle, de type Cam-Clay, se distingue par sa capacité à différencier le comportement lors du

chargement primaire et celui lors du déchargement ou rechargement en dessous de la pression de préconsolidation. Il est particulièrement adapté pour représenter l'écroûissage volumétrique, caractéristique dominante de ces matériaux. L'utilisation du Soft Soil Model permet une simulation plus réaliste des réponses en contrainte et en résistance des sols lors de chargements non drainés, offrant ainsi une alternative plus précise que des modèles plus simples comme celui de Mohr-Coulomb (Brinkgreve).

En complément, Plaxis permet également de modéliser des éléments structurels tels que les geogrids, les plaques (plates), les coques (shells) et les ancrages (anchors), facilitant ainsi la simulation d'interactions sol-structure sous diverses conditions de chargement et de déformation (Figure 4.8).

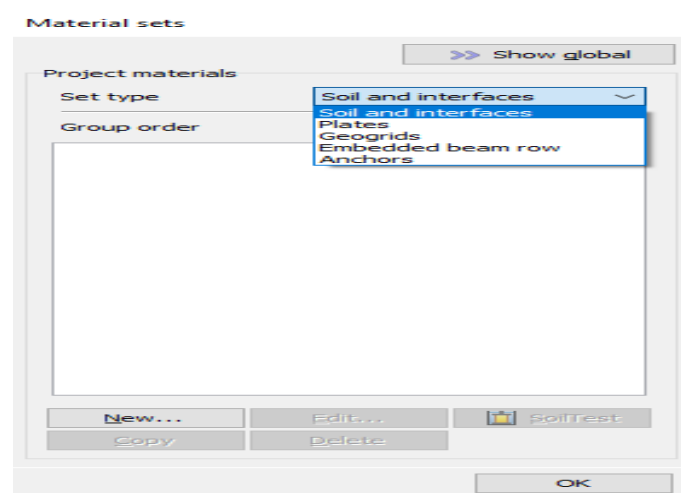


Figure 4.8. Éléments structurels disponibles dans PLAXIS 2D.

4.10.2. Types d'analyses disponibles

Plaxis 2D offre plusieurs types d'analyses pour modéliser le comportement des sols et des structures en géotechnique. Les analyses de déformation et de stabilité permettent d'évaluer les déplacements et la sécurité des ouvrages sous différentes conditions de chargement. Les analyses d'écoulement des eaux souterraines modélisent l'interaction entre l'eau et le sol, en régime permanent ou transitoire. Les analyses dynamiques simulent l'impact des charges sismiques et vibratoires sur les structures géotechniques. Les analyses de consolidation prennent en compte la dissipation progressive de la pression interstitielle dans les sols compressibles. Enfin, les analyses thermiques permettent d'étudier les effets des variations de température sur les sols et les structures, essentielles pour des applications comme la géothermie.

4.10.3. Modélisation et maillage

La modélisation repose sur la définition précise de la géométrie du projet, des propriétés des matériaux et des conditions aux limites. Le logiciel offre une interface conviviale permettant de créer des modèles géotechniques détaillés, incluant des éléments tels que les couches de sol, les structures de soutènement et les charges appliquées. Une fois la modélisation achevée, le processus de maillage divise le domaine en éléments finis pour l'analyse numérique. PLAXIS 2D propose des fonctionnalités de maillage automatiques et manuelles, permettant de générer des maillages réguliers ou irréguliers adaptés à la complexité du modèle. Des outils d'inspection de la qualité du maillage sont également disponibles pour assurer la précision des simulations.

4.11. Conclusion

La méthode des éléments finis (MEF) a révolutionné l'ingénierie géotechnique en apportant une approche plus précise et rigoureuse pour l'analyse des sols et des ouvrages. PLAXIS 2D, basé sur la MEF, joue un rôle essentiel dans l'évolution du domaine en offrant des outils performants pour la modélisation et la simulation des interactions sol-structure. Son utilisation permet non seulement d'optimiser la conception des ouvrages, mais aussi d'améliorer la fiabilité des analyses, contribuant ainsi à une ingénierie plus sûre et plus efficace.

Chapitre 5

Présentation du modèle d'étude et analyse des résultats

5.1. Introduction

De nombreuses études ont été menées pour analyser le comportement des fondations superficielles reposant sur un sol renforcé par différentes techniques d'amélioration. L'objectif principal de ces travaux est de réduire les tassements et d'améliorer la capacité portante du sol afin de garantir la stabilité des ouvrages. Parmi ces techniques, l'utilisation des inclusions rigides s'est révélée être une solution efficace pour renforcer les sols compressibles et limiter les déformations.

Ce chapitre présente les caractéristiques géotechniques du sol étudié, ainsi que la géométrie et les conditions de chargement de la fondation. Ces éléments constituent la base des analyses menées par la suite pour évaluer l'effet du renforcement sur les tassements et les déplacements horizontaux du sol. L'analyse sera réalisée à l'aide du logiciel PLAXIS 2D.

5.2. Présentation du cas d'étude

Dans cette étude, nous allons analyser les déplacements horizontaux et verticaux du sol. Ce cas d'étude porte sur l'évaluation du comportement d'un sol renforcé par inclusions rigides sous des fondations superficielles (semelles isolées). L'analyse sera réalisée en trois configurations :

- À l'état naturel, sans renforcement.
- Avec un matelas uniquement.
- Avec un renforcement par inclusions rigides combiné à un matelas de transfert de charge.

5.3. Caractéristiques géométriques du modèle étudié

L'étude porte sur trois fondations, chacune ayant une largeur de 1.5 m et un espacement de 2 m entre elles.

Le sol est constitué d'une succession de trois couches : argile limoneuse (AL), limon (L) et sable grossier (SG).

Pour éviter le phénomène de bord, le modèle est défini sur une longueur de 50 m dans la direction de l'axe des abscisses (x).

Le matelas de transfert de charge a une épaisseur de 0.6 m et est construit en surface avec une longueur de 16 m.

Les inclusions rigides sont ancrées à 2 m dans la couche de bonne qualité (sable grossier) et ont une longueur totale de 9.2 m. Le sol est renforcé par six inclusions rigides, réparties de

la manière suivante :

- Deux inclusions sous chaque fondation, espacées de 1.5 m.

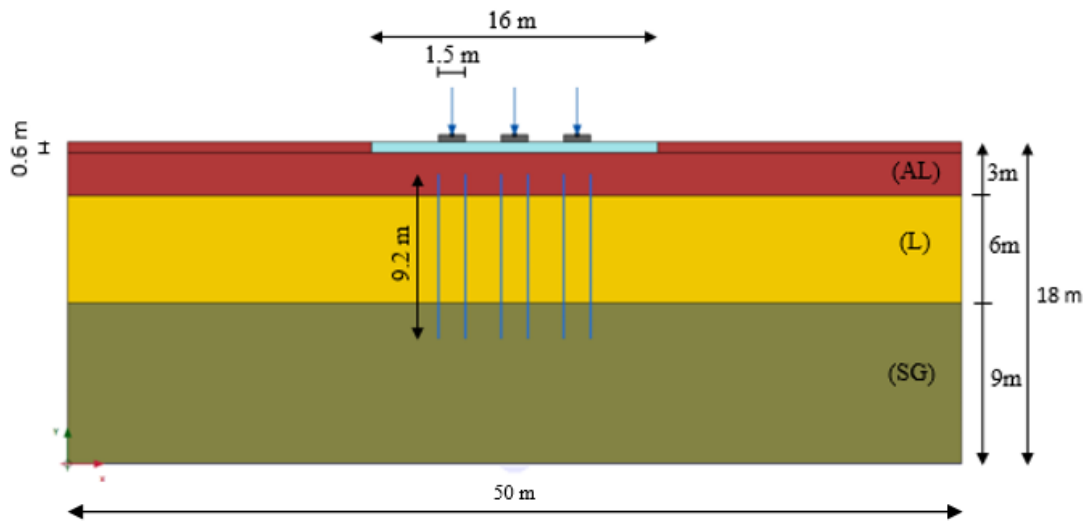


Figure 5.1. Géométrie du modèle dans PLAXIS 2D.

5.4. Caractéristiques des matériaux

5.4.1. Caractéristiques du sol

Les caractéristiques des différentes couches de sol sont définies en utilisant le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb. Ce modèle permet de représenter le comportement du sol en prenant en compte sa résistance au cisaillement à travers les paramètres de cohésion, d'angle de frottement. Ces paramètres sont présentés dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 Caractéristiques des couches de sol.

Paramètres	Symbole	Unité	Argile limoneuse (AL)	Limon (L)	Sable grossier (SG)
Modèle	-	-	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Type de comportement	-	-	Drainé	Drainé	Drainé
Poids volumique sec	γ_{unsat}	KN/m ³	19	17	20
Poids volumique saturé	γ_{sat}	KN/m ³	23	20	22
Module d'Young	E	KN/m ²	15600	5200	84000
Coefficient de poisson	ν	/	0.3	0.3	0.3
Cohésion	C	KN/m ²	40	30	0
Angle de frottement	ϕ	(°)	16	6	32
Facteur de réduction des efforts à l'interface	R_{inter}	-	Rigide	Rigide	Rigide
Angle de dilatance	Ψ	(°)	0	0	2

modèle permet de représenter le comportement des fondations en supposant une relation proportionnelle entre les contraintes et les déformations, sans prise en compte de la plasticité. Ces paramètres sont présentés dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 Caractéristiques des fondations.

Paramètres	Symbole	Unité	Fondation
Modèle de comportement	-	-	Elastique linéaire
Poids volumique	γ	KN/m ³	25
Module d'Young	E	MPa	20000
Coefficient de poisson	ν	/	0.2

5.4.3. Caractéristiques du matelas

Les caractéristiques du matelas de transfert de charge sont définies en utilisant un modèle élastique linéaire. Ce modèle permet de représenter le comportement du matelas afin de simuler efficacement son rôle dans la répartition des charges et la réduction des contraintes. Ces paramètres sont présentés dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 Caractéristiques du matelas.

Paramètres	Symbole	Unité	Matelas
Modèle de comportement	-	-	Elastique linéaire
Type de comportement	-	-	Drainé
Poids volumique sec	γ_{unsat}	KN/m ³	20
Poids volumique saturé	γ_{sat}	KN/m ³	22
Module d'Young	E	KN/m ²	50000
Coefficient de poisson	ν	/	0.3

5.4.4. Caractéristiques des inclusions rigides

Les caractéristiques des inclusions rigides sont définies en utilisant un modèle élastique, et elles sont modélisées par des éléments Plates dans PLAXIS. Ce modèle permet de représenter leur comportement afin de simuler efficacement leur rôle dans le transfert des charges et la réduction des déformations du sol sous-jacent.

Tableau 5.4 Caractéristiques des inclusions.

Paramètres	Symbole	Unité	Inclusion
Modèle de matériaux	-	-	Elastique
La rigidité normale	EA	KN/m	$9.329 \cdot 10^6$
La rigidité flexionnelle	EI	KN.m ²	$209.9 \cdot 10^3$
Coefficient de poisson	ν	/	0.2
Diamètre	D	m	0.519
Longueur	H	m	9.2

5.5. Modélisation numérique

5.5.1. Paramètres généraux

L'analyse est réalisée à l'aide de PLAXIS 2D V20, en adoptant une modélisation en déformation plane (Plane Strain). Le maillage est constitué d'éléments finis triangulaires à 15 nœuds, assurant une meilleure précision des résultats. Les unités utilisées dans l'étude sont le mètre (m) pour la longueur, le kilonewton (kN) pour la force et le jour (day) pour le temps.

5.5.2. Maillage et conditions aux limites

Le maillage du modèle a été créé automatiquement par PLAXIS 2D en sélectionnant un maillage de type très fin. Ce niveau de raffinement garantit une meilleure précision des résultats, en capturant efficacement les variations de déformation. Les conditions aux limites ont été définies en fixant uniquement la base du modèle, tandis que les côtés latéraux (gauche et droit) ont été laissés libres.

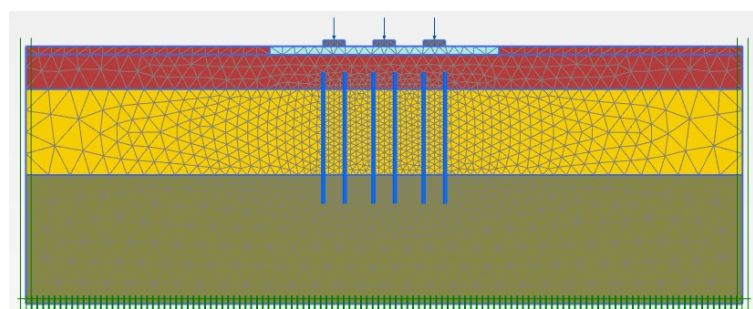


Figure 5.2. Maillage et conditions aux limites du modèle.

5.5.3. Conditions hydrauliques

Les conditions hydrauliques du modèle sont définies en considérant une nappe phréatique située en dessous de la base du Modèle. Ainsi, l'ensemble du sol modélisé est supposé non saturé, tandis que la limite inférieure du modèle représente la surface de la nappe.

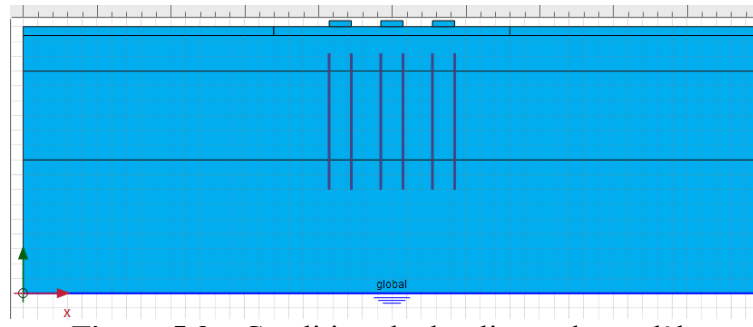


Figure 5.3. Conditions hydrauliques du modèle.

5.6. Résultats et interprétations

Dans le cadre de cette étude, nous analyserons les tassements et les déplacements horizontaux à travers plusieurs profils (Figure 5.4). Le profil vertical 1 et le profil vertical 3, étant en symétrie, seront représentés sur une seule courbe, car ils donnent des résultats identiques. Le profil vertical 2, quant à lui, fera l'objet d'une analyse séparée en raison de sa configuration particulière. Enfin, un profil horizontal 1 sera également étudié indépendamment pour évaluer les déplacements horizontaux dans le plan.

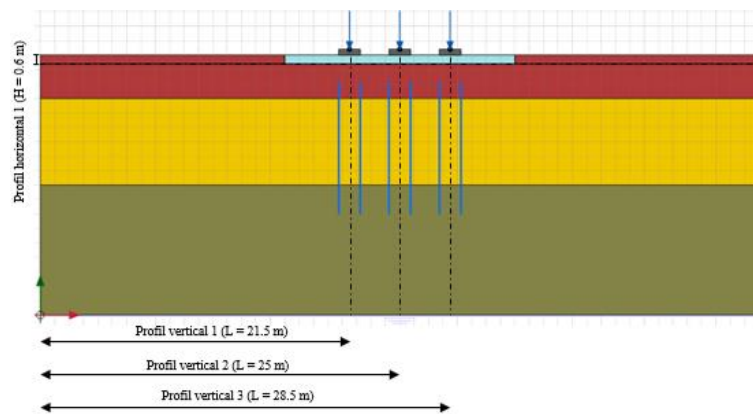


Figure 5.4. Schéma des profils analysés.

A. Evolution des tassements

A.1. Sol naturel

Dans un premier temps, une analyse a été menée sur le sol naturel, constitué des trois couches précédemment décrites. Un chargement initial de 50 kN a été appliqué, puis progressivement augmenté par paliers de 50 kN jusqu'à atteindre 300 kN. Cette approche vise à évaluer le comportement du sol en l'absence de tout renforcement.

La figure 5.5 illustre la variation des tassements en fonction de la profondeur sous la fondation, sur un sol non renforcé, le long du profil vertical 1 ($L = 21,5$ m).

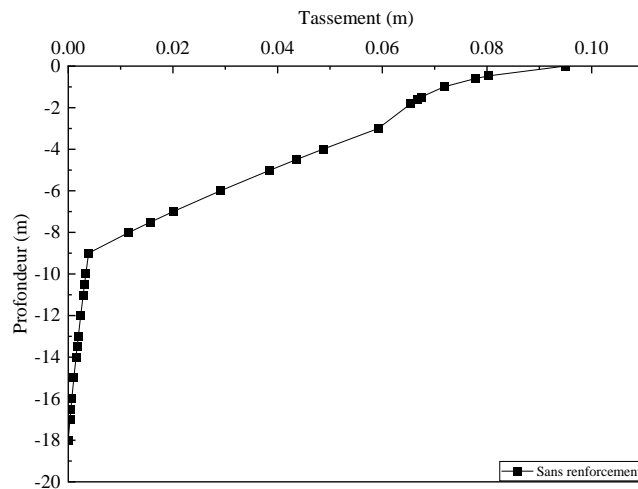


Figure 5.5. Evolution des tassements selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 1 ($L = 21.5$ m).

Au niveau du profil vertical 1 (Figure 5.5), situé à $L = 21.5$ m, un tassement initial de 0,09 m a été enregistré dans l'état naturel du sol, c'est-à-dire sans amélioration. Ce résultat met en évidence une faible capacité portante ainsi qu'un comportement compressible peu favorable. Par ailleurs, la figure 5.6 illustre l'évolution des tassements en profondeur sous la fondation, toujours sur sol non renforcé, au droit du profil vertical 1 ($L = 25$ m).

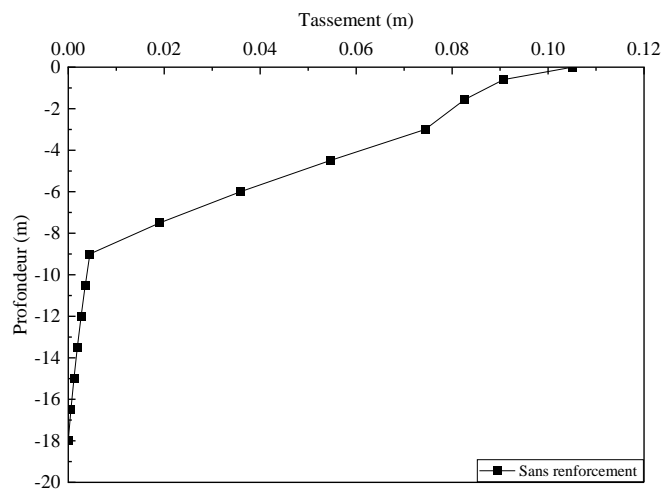


Figure 5.6. Evolution des tassements selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 2 ($L = 25.0$ m).

Au niveau du profil vertical 2 (Figure 5.6), correspondant à $L = 25$ m, le tassement initial en l'absence de renforcement atteint 0,10 m, traduisant une déformation notable du sol. Cette valeur élevée souligne un risque potentiel d'instabilité, rendant indispensable la mise en œuvre d'une solution de renforcement afin d'améliorer la capacité portante du terrain et de réduire les tassements différés. La figure 5.7 illustre quant à elle l'évolution des tassements, en l'absence de renforcement, selon la longueur sous les fondations au niveau du profil horizontal 1 ($H = 0.6$ m).

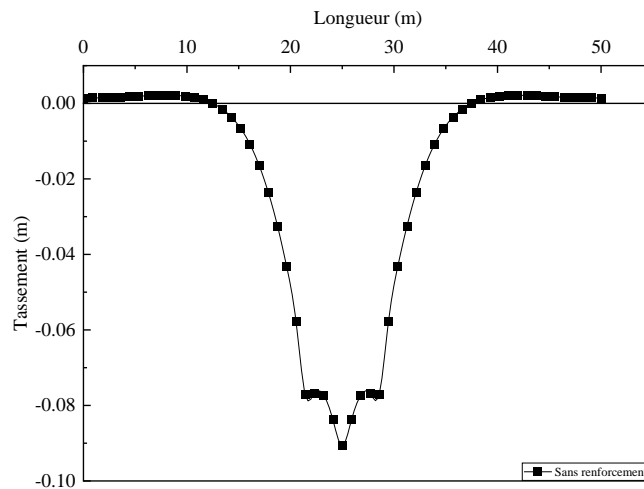


Figure 5.7. Evolution des tassements selon la longueur sous les fondations au profil horizontal 1 ($H = 0.6$ m).

Sur le profil horizontal 1, à une profondeur de $H = 0.6$ m, les résultats obtenus sans aucun renforcement révèlent un comportement défavorable du sol. Un léger soulèvement latéral y est observé, signe d'une instabilité locale, accompagné d'un tassement vertical maximal de 0.09 m. Ces déformations traduisent la faible capacité du sol à supporter les charges appliquées sans compromettre sa stabilité.

A.2 Evolution des tassements sous le matelas

Dans la deuxième configuration, un matelas de 0.6 m d'épaisseur a été installé en surface du sol. Le même chargement progressif a été appliqué afin d'évaluer l'influence de ce renforcement sur la répartition des charges et la réduction des tassements. La figure 5.8 illustre l'évolution des tassements en profondeur sous la fondation, au droit du profil vertical 1 ($L = 21.5$ m), pour un sol renforcé par matelas.

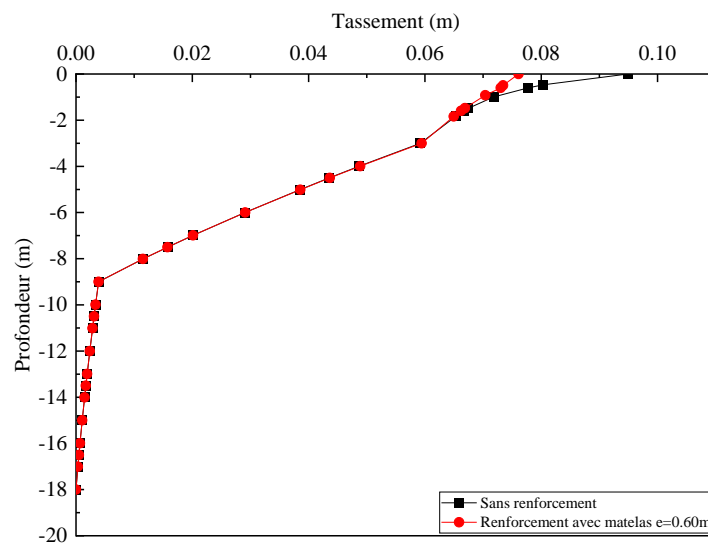


Figure 5.8. Evolution des tassements selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 1 ($L = 21.5$ m).

Au niveau du profil vertical 1 (Figure 5.8), situé à $L = 21,5$ m, le tassement initial observé en l'absence de renforcement atteint $0,09$ m. Après l'installation d'un matelas granulaire de $0,6$ m d'épaisseur, ce tassement est réduit à $0,07$ m, soit une diminution de $22,22$ %. Cette réduction, bien que notable, suggère que l'efficacité du matelas granulaire reste limitée lorsqu'il est utilisé seul dans ce contexte. La figure 5.9 illustre l'évolution des tassements sur un sol renforcé par matelas selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 2 ($L = 25$ m).

Au profil vertical 2 (Figure 5.9), à $L = 25$ m, le tassement initial sans renforcement est de $0,10$ m. L'ajout du même matelas granulaire de $0,6$ m d'épaisseur permet de réduire ce tassement à $0,09$ m, soit une diminution de 10 %. Cette réduction relativement faible confirme que l'efficacité du matelas granulaire reste limitée et ne conduit pas à une amélioration significative des performances du sol.

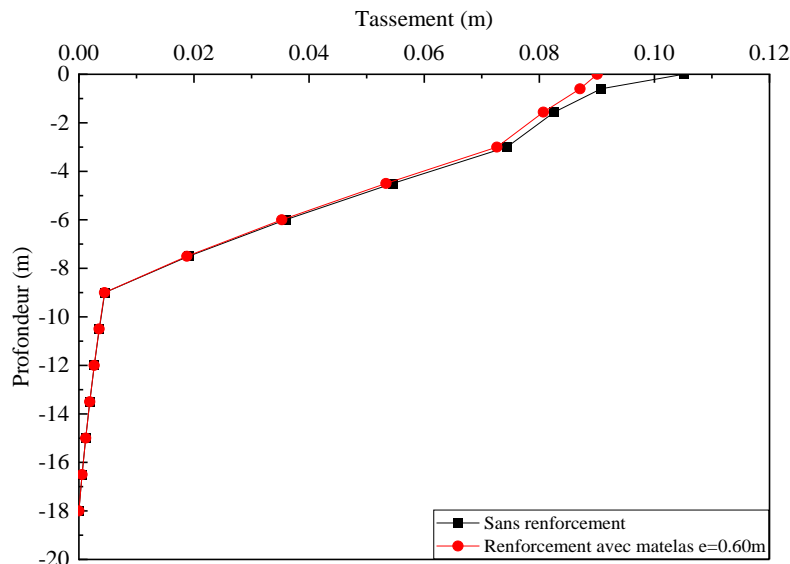


Figure 5.9. Evolution des tassements selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 2 ($L = 25.0$ m).

La figure 5.10 illustre l'évolution des tassements en fonction de la longueur sous les fondations pour le profil horizontal 1, avec une hauteur $H = 0,6$ m, dans le cas d'un sol renforcé par un matelas. Cette représentation permet d'analyser l'influence du renforcement sur la répartition des tassements le long de la fondation.

Concernant le profil horizontal 1, pour la même hauteur ($H = 0,6$ m), l'observation du sol à l'état naturel (sans renforcement) révèle un léger soulèvement en périphérie et un tassement maximal atteignant $0,09$ m. L'introduction d'un matelas granulaire n'engendre toutefois pas de changement notable du comportement du sol, qui reste globalement similaire à celui observé sans renforcement.

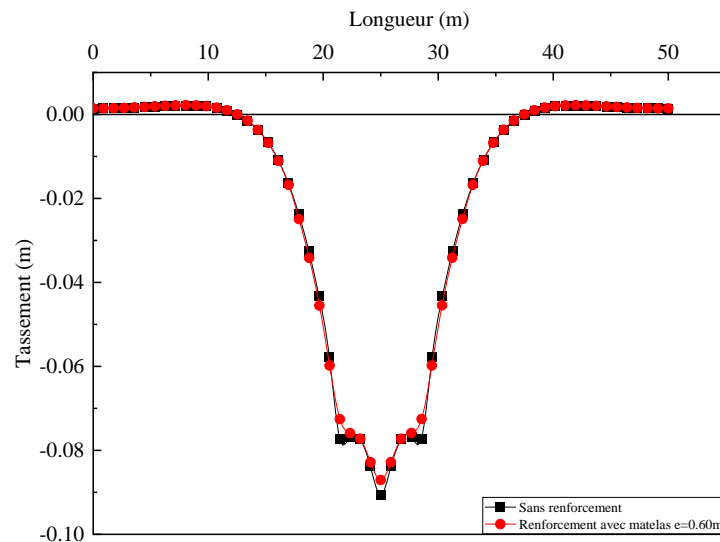


Figure 5.10. Evolution des tassements selon la longueur sous les fondations au profil horizontal 1 ($H = 0.6$ m).

A.3 Influence des inclusions rigides et le matelas sur les tassements

Une analyse a été menée en intégrant des inclusions rigides sous le matelas de transfert de charge. Le même chargement progressif que dans l'analyse précédente a été appliqué, débutant à 50 kN et augmentant par paliers de 50 kN jusqu'à 300 kN. Cette configuration a pour objectif d'étudier l'impact combiné du matelas et des inclusions rigides sur le comportement du sol sous charge. Les résultats permettront de comparer l'efficacité des différentes solutions de renforcement. La figure 5.11 illustre l'évolution des tassements sur un sol renforcé avec matelas et inclusions rigides, en fonction de la profondeur sous la fondation, au niveau du profil vertical 1 ($L = 21,5$ m).

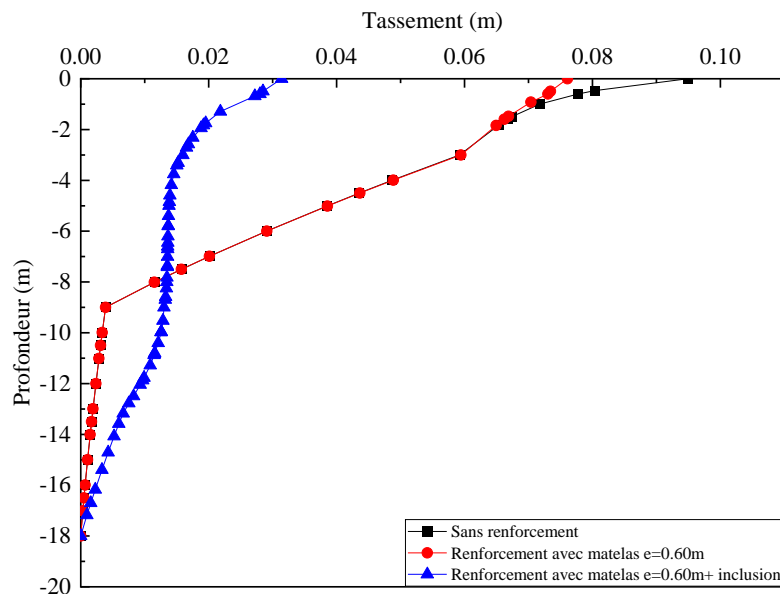


Figure 5.11. Evolution des tassements selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 1 ($L = 21.5$ m).

Au niveau du profil vertical 1, l'état naturel du sol révèle un tassement important. Cependant, après l'installation du matelas granulaire de 0,6 m, aucune amélioration notable n'est observée. Selon la figure 5.11, les tassements avant et après l'ajout du matelas granulaire restent pratiquement identiques à partir de 2 mètres de profondeur, à partir de laquelle les tassements influencent directement le comportement global des fondations. En revanche, après l'ajout des inclusions rigides, une réduction significative du tassement est constatée, ce qui améliore considérablement la résistance du sol. Toutefois, à 8 mètres de profondeur, le tassement avec inclusions rigides dépasse celui observé à l'état naturel, indiquant une performance inférieure du sol renforcé à cette profondeur. Cela suggère que les inclusions rigides modifient la répartition des charges, entraînant un tassement plus important en profondeur par rapport à l'état naturel où le sol se comportait mieux. Ainsi, bien que l'effet combiné du matelas granulaire et des inclusions rigides renforce la stabilité en surface, il peut aussi concentrer les efforts en profondeur.

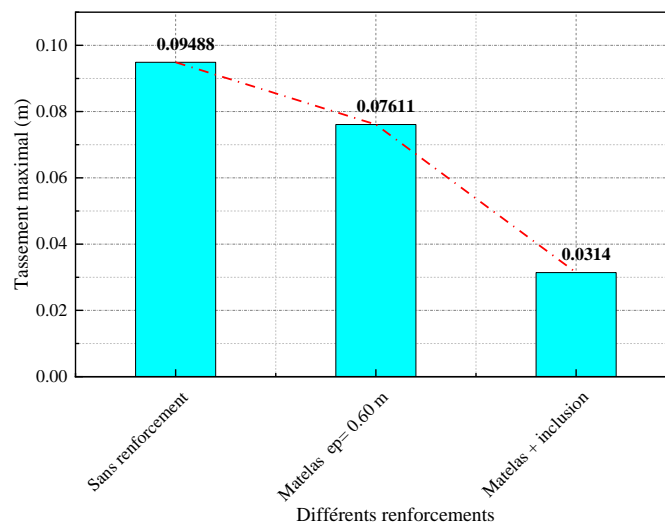


Figure 5.12. Comparaison des tassements maximaux selon les types de renforcement au profil vertical 1 (21.5 m).

Au profil vertical 1, le tassement maximal du sol à l'état naturel (sans renforcement) est de 0.09488 m. L'installation d'un matelas granulaire de 0.6 m d'épaisseur permet de réduire ce tassement à 0.07611 m, soit une diminution de 19.78 %. Après la mise en place des inclusions rigides, le tassement est encore réduit pour atteindre 0.0314 m, correspondant à une réduction de 66.90 % par rapport au sol naturel et de 58.74 % par rapport au sol renforcé par matelas.

La mise en place des inclusions rigides a permis une amélioration notable du comportement du sol. En effet, la réduction importante du tassement après leur installation montre l'efficacité de cette technique de renforcement. Comparée au matelas granulaire seul,

l'utilisation des inclusions rigides permet non seulement de limiter les tassements en surface, mais aussi d'améliorer significativement la stabilité globale de la structure.

La figure 5.13 présente l'évolution des tassements sur un sol renforcé avec matelas et inclusions rigides selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 2 ($L = 25$ m).

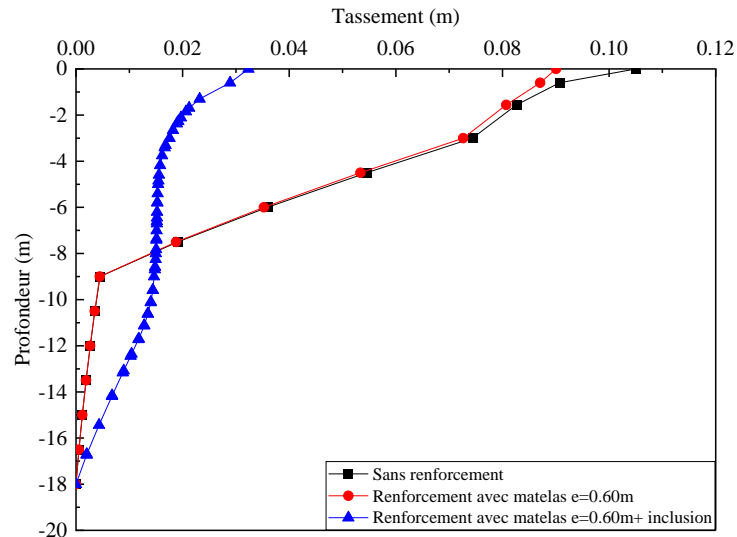


Figure 5.13. Evolution des tassements selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 2 ($L = 25.0$ m).

Sur le profil vertical 2, le sol présente un tassement important à l'état naturel. L'efficacité du matelas granulaire seul reste limitée, car, selon la figure 5.13, les tassements avant et après sa mise en place restent similaires au-delà de 2 m de profondeur. Or, cette profondeur joue un rôle déterminant dans le comportement global des fondations. En revanche, l'introduction des inclusions rigides engendre une diminution notable de tassement en surface, renforçant ainsi la capacité portante du sol. Toutefois, à 8 m de profondeur, on observe un tassement plus important avec inclusions qu'à l'état naturel, traduisant une redistribution des charges défavorable en profondeur. Cela met en évidence un transfert des contraintes qui accentue la déformation à ces niveaux. Ainsi, bien que l'association du matelas granulaire et des inclusions rigides stabilise efficacement la surface, elle peut conduire à une concentration des efforts en profondeur.

Au profil vertical, le tassement maximal obtenu à l'état naturel (sans renforcement) est de 0.10504 m. L'introduction d'un matelas granulaire de 0.6 m d'épaisseur permet de réduire ce tassement à 0.09005 m, soit une diminution de 14.27 %. Avec l'installation des inclusions rigides, le tassement diminue davantage pour atteindre 0.03235 m, correspondant à une réduction de 69.20 % par rapport au sol non renforcé et de 64.07 % par rapport au sol renforcé par matelas (figure 5.14).

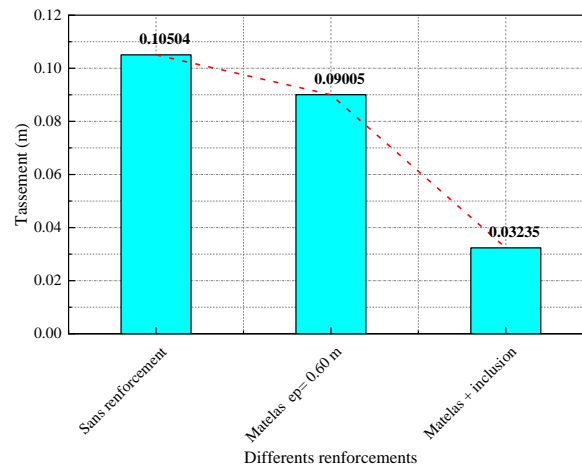


Figure 5.14. Comparaison des tassements maximaux selon les types de renforcement au profil vertical 2 (25 m).

L'introduction des inclusions rigides a conduit à une amélioration significative des propriétés mécaniques du sol. Cette méthode a permis une réduction considérable du tassement, ce qui démontre son efficacité en tant que technique de renforcement. Comparativement à l'application d'un matelas granulaire seul, l'ajout des inclusions rigides offre un double avantage : il limite non seulement les tassements en surface, mais contribue également à une amélioration substantielle de la stabilité globale de la fondation.

La figure 5.15 présente l'évolution des tassements sur un sol renforcé avec matelas et inclusions rigides selon la longueur sous les fondations au profil horizontal 1 ($H = 0.6$ m).

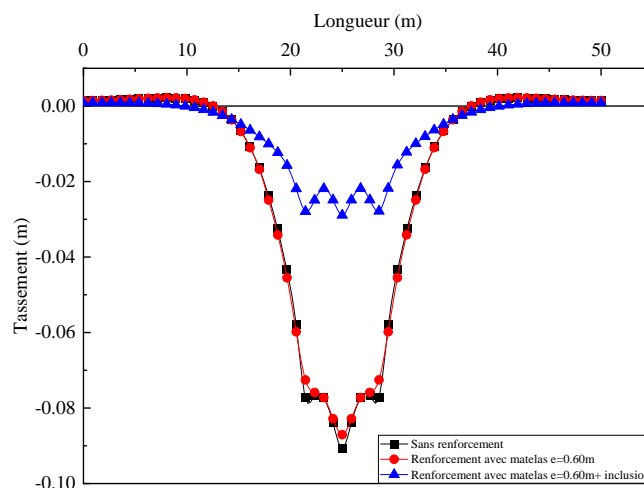


Figure 5.15. Evolution des tassements selon la longueur sous les fondations au profil horizontal 1 ($H = 0.6$ m).

Sur le profil horizontal 1, le sol à l'état naturel présente un tassement important, accompagné d'un léger soulèvement latéral, considéré comme négligeable. L'introduction d'un matelas granulaire de 0,6 m ne produit aucun effet notable sur le comportement du sol. En effet,

comme le montre la figure 5.15, les courbes de tassement obtenues avant et après la mise en place du matelas sont quasiment superposées, indiquant une absence d'amélioration significative.

En revanche, après l'introduction des inclusions rigides, une réduction nette du tassement est observée, ce qui reflète une amélioration notable du comportement du sol face aux charges appliquées. Par ailleurs, le tassement se concentre désormais sous les fondations, tandis que les déplacements latéraux deviennent presque inexistantes. Ces résultats confirment l'efficacité des inclusions rigides dans l'augmentation de la capacité portante du sol et la maîtrise des tassements induits.

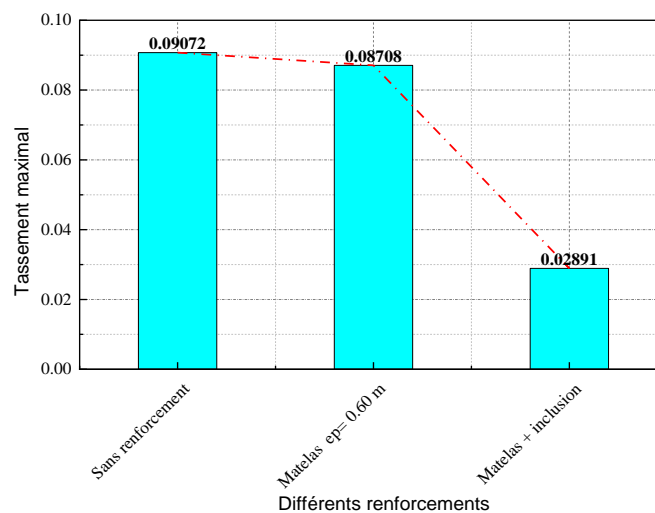


Figure 5.16. Comparaison des tassements maximaux selon les types de renforcement au profil horizontal 1 (H= 0.6 m).

Au profil horizontal 1, à l'état naturel (sans renforcement), le tassement maximal atteint 0,09072 m. Après la mise en place d'un matelas granulaire, le tassement est réduit à 0,08708 m, soit un taux de réduction de 4,01 %. En revanche, l'installation des inclusions rigides permet d'abaisser le tassement à 0,02891 m, correspondant à une réduction de 68,13 % par rapport à l'état naturel du sol et de 66,80 % par rapport au sol renforcé par matelas.

La technique de renforcement par inclusions rigides s'avère particulièrement efficace pour améliorer le comportement du sol. Elle permet non seulement de réduire considérablement les tassements, mais aussi d'augmenter la capacité portante des fondations. Grâce à la répartition plus homogène des charges et au confinement du sol environnant, cette méthode garantit une meilleure stabilité globale des ouvrages. Ainsi, le recours aux inclusions rigides constitue une solution fiable et performante pour renforcer les sols compressibles ou peu portants.

B. Evolution des déplacements horizontaux

B.1. Analyse des déplacements horizontaux sous le matelas

La figure 5.17, présente l'évolution des déplacements horizontaux sur un sol renforcé avec matelas selon la longueur sous les fondations au profil horizontal 1 ($H = 0.6$ m).

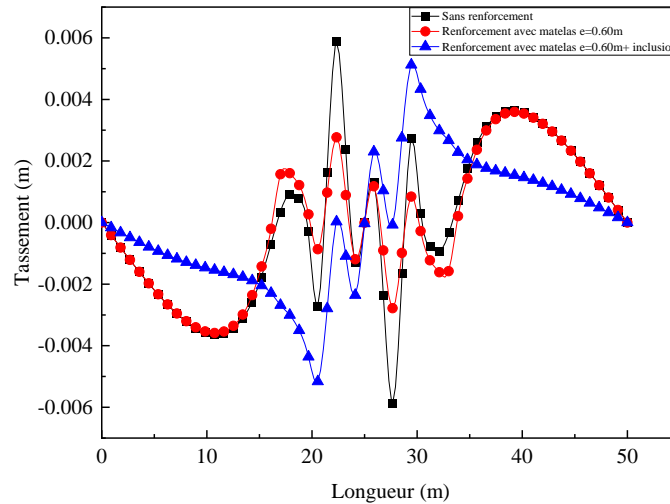


Figure 5.17. Evolution des déplacements horizontaux selon la longueur sous les fondations au profil horizontal 1 ($H = 0.6$ m).

Au profil horizontal 1 (figure 5.17), à $H = 0.6$ m, le sol a l'état naturel enregistre à la fois un tassement et un soulèvement de 0.006 m. L'installation d'un matelas granulaire permet de réduire ces déformations à 0.004 m, correspondant à un taux de réduction de 33 %.

B.2. Influence des inclusion rigides sur les déplacements horizontaux

La figure 5.18, présente l'évolution des déplacements horizontaux sur un sol renforcé avec matelas et inclusions rigides selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 1 ($L = 21.5$ m).

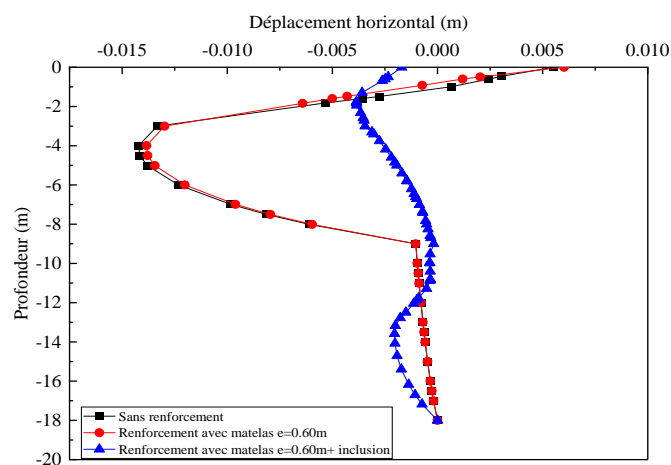


Figure 5.18. Evolution des déplacements horizontaux selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 1 ($L = 21.5$ m).

Au niveau du profil vertical 1 (Figure 5.18), en l'absence de tout renforcement, le déplacement horizontal à la surface du sol jusqu'à une profondeur de 2 m est positif, indiquant un déplacement vers la droite. Entre 2 m et 8 m de profondeur, le déplacement devient négatif, se dirigeant vers la gauche, et à partir de 8 m, le déplacement devient quasi nul. Après l'installation d'un matelas granulaire de 0,6 m d'épaisseur, le comportement du sol en termes de déplacements horizontaux reste similaire à l'état naturel. En revanche, après la mise en place des inclusions rigides, les déplacements horizontaux deviennent pratiquement nuls sur l'ensemble de la profondeur étudiée.

Il apparaît que le matelas granulaire de 0,6 m ne procure pas d'amélioration substantielle. En effet, les déplacements avant et après son installation sont quasi identiques, ce qui suggère que le sol n'a pas été en mesure de supporter efficacement les charges appliquées par les fondations, entraînant un cisaillement au niveau de 2 m de profondeur. À l'inverse, l'ajout des inclusions rigides conduit à une réduction presque totale des déplacements horizontaux, ce qui traduit une amélioration significative de la résistance du sol. Les inclusions rigides créent ainsi une zone de confinement efficace, permettant une stabilisation accrue du sol.

La figure 5.19 illustre l'évolution des déplacements horizontaux d'un sol renforcé par matelas et inclusions rigides, en fonction de la profondeur sous la fondation, au niveau du profil vertical 2 ($L = 25$ m).

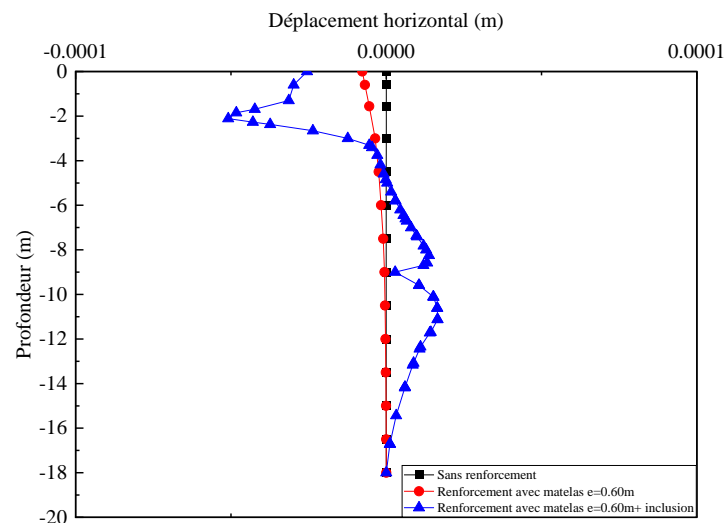


Figure 5.19. Evolution des déplacements horizontaux selon la profondeur sous la fondation au profil vertical 2 ($L = 25.0$ m).

Au profil vertical 2 (Figure 5.19), sans renforcement, le déplacement horizontal est quasiment nul. L'introduction d'un matelas granulaire de 0.6 m d'épaisseur n'a pas significativement modifié le sol non renforcé, Les déplacements horizontaux restent très faibles. En revanche, après l'installation des inclusions rigides, un déplacement négatif est

observé en surface (déplacement vers la gauche). À partir de 6 m de profondeur, le déplacement devient positif (déplacement vers la droite) mais reste proche de zéro.

Nous constatons qu'au profil vertical 2, une zone de confinement naturelle est présente, même sans renforcement. Cela est dû aux contraintes latérales exercées par le sol environnant, qui contribuent à un resserrement du massif. Cette contrainte latérale améliore la résistance du sol et limite fortement les déplacements horizontaux. Ainsi, la présence d'un matelas granulaire ne modifie pas significativement la réponse du sol, tandis que l'introduction d'inclusions rigides influence légèrement les valeurs des déplacements sans compromettre la stabilité globale.

La figure 5.20 présente l'évolution des déplacements horizontaux sur un sol renforcé avec matelas et inclusion rigides selon la longueur sous les fondations au profil horizontal 1 ($H = 0.6$ m).

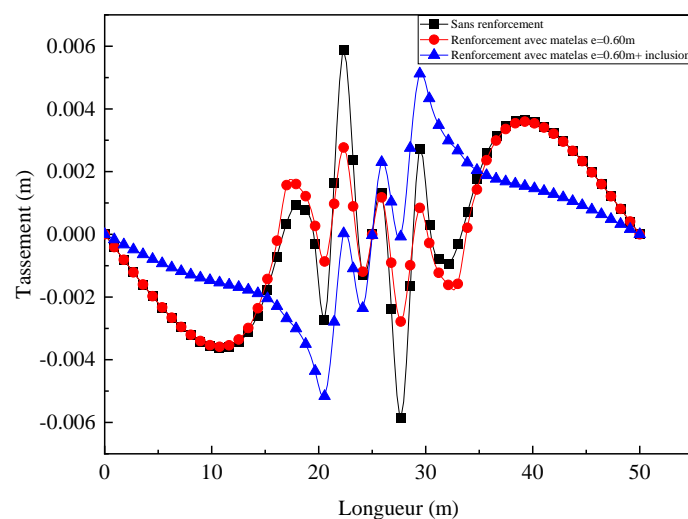


Figure 5.20. Evolution des déplacements horizontaux selon la longueur sous les fondations au profil horizontal 1 ($H = 0.6$ m).

Au profil horizontal 1 (Figure 5.20), le sol sans renforcement présente un tassement maximal de 0.006 m et un soulèvement atteignant 0.006 m. Après la mise en place d'un matelas granulaire, ces valeurs sont réduites à 0.004 m, soit un taux de réduction de 33 %. En revanche, l'installation des inclusions rigides a conduit à un tassement et un soulèvement de 0.005 m, correspondant à une réduction de seulement 16.67 % par rapport à l'état naturel.

Nous constatons que les inclusions rigides n'ont pas amélioré significativement les performances du sol au profil horizontal 1. Au contraire, le matelas granulaire seul a montré une meilleure efficacité que la combinaison matelas-inclusions.

5.7. Conclusion

Le modèle étudié à l'aide de PLAXIS 2D a permis de détailler les caractéristiques géométriques, géotechniques ainsi que les conditions aux limites adoptées pour analyser le comportement du sol dans différentes configurations, avec et sans renforcement. Les résultats obtenus, notamment en termes de tassements et de déplacements horizontaux, mettent en évidence une amélioration significative du comportement du sol grâce au renforcement. L'utilisation d'inclusions rigides s'est révélée être une solution efficace pour optimiser les performances du sol sous fondation. Cette modélisation offre une base solide pour la compréhension du comportement du sol renforcé.

Conclusion générale et perspectives

Cette étude a porté sur l'évaluation de l'efficacité des inclusions rigides couplées à un matelas de transfert de charges pour améliorer le comportement des sols compressibles sous fondations superficielles. L'objectif principal était d'analyser la réduction des tassements et des déplacements horizontaux induite par cette technique de renforcement, en vue d'assurer une meilleure stabilité des ouvrages et d'optimiser la conception géotechnique.

Les simulations numériques effectuées à l'aide du logiciel PLAXIS 2D, reposant sur la méthode des éléments finis, ont permis de quantifier les bénéfices liés à l'amélioration du sol. La comparaison entre un sol naturel et un sol renforcé a mis en évidence une réduction notable des tassements : 66 % sous la fondation, 69,20 % sous la fondation centrale, et 68,13 % sous le matelas de transfert de charge. Ces résultats soulignent l'efficacité des inclusions rigides pour limiter les déformations du sol, renforçant ainsi la stabilité et la durabilité des structures superficielles.

Le matelas de transfert de charges occupe une place clé dans le dispositif modélisé. Les résultats numériques mettent en évidence son rôle dans la redistribution homogène des efforts verticaux, grâce à l'effet de voûte simulé, permettant de concentrer les charges sur les têtes des inclusions rigides. Cette redistribution contribue à la réduction des tassements différentiels et à l'amélioration du comportement global du sol renforcé. La modélisation numérique confirme ainsi l'apport significatif du matelas de transfert dans l'efficacité du renforcement par inclusions rigides.

En perspective, cette étude pourrait être élargie à des configurations géotechniques plus complexes, notamment en présence de nappes phréatiques ou de sollicitations sismiques. L'utilisation de modèles tridimensionnels représenterait une avancée significative pour mieux appréhender les effets spatiaux. Par ailleurs, l'intégration de techniques de modélisation avancées, telles que l'intelligence artificielle ou l'apprentissage automatique, offrirait des perspectives prometteuses pour l'optimisation des paramètres de renforcement et l'amélioration de la précision des simulations. Le recours à ces approches numériques permettrait ainsi de développer des outils d'aide à la décision plus performants pour la conception et l'analyse des ouvrages géotechniques.

Cette recherche met en évidence l'efficacité notable des inclusions rigides dans la maîtrise des tassements et des déplacements horizontaux, offrant ainsi une solution de renforcement fiable et adaptée aux fondations superficielles implantées sur des sols compressibles.

Références bibliographiques

- ASIRI, P. (2012). Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur sols améliorés par inclusions rigides verticales : Presses des Ponts, Paris, France.
- Baban, T. M. (2016). Shallow foundations: discussions and problem solving: John Wiley & Sons.
- Bouassida, M. (2015). Amélioration des sols en place. Introduction à la géotechnique. Université Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie, 139-163.
- Briançon, L. (2002). Renforcement des sols par inclusions rigides-Etat de l'art en France et à l'étranger. IREX.
- Brinkgreve, D. R. B. J. Modélisation Numérique : Le Modèle de Creep Soft-Soil et Soft-Soil. Retrieved from <https://www.geoengineer.org/education/numerical-constitutive-modeling/numerical-modelling-the-soft-soil-and-soft-soil-creep-model>
- Brinkgreve R.B.J., Swolfs W.M., Engin E. PLAXIS finite element code. Delft University of Technology & PLAXIS bv, The Netherlands, 2011
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Waterman, D., Chesaru, A., & Bonnier, P. G. (2016). PLAXIS 2016. PLAXIS bv, the Netherlands, 1-16.
- Bruce, D. A., & Geosystems, E. (2000). An introduction to the deep soil mixing methods as used in geotechnical applications. Retrieved from
- Budhu, M. (2010). Soil mechanics and foundations: John Wiley and Sons.
- Bulbul Ahmed, M. A. A., & Sayeed, M. A. (2013). Improvement of soil strength using cement and lime admixtures. Earth Science, 2(6), 139-144.
- Chatzigogos, C. (2007). Comportement sismique des fondations superficielles: vers la prise en compte d'un critère de performance dans la conception. Ecole Polytechnique X.
- Chu, J., & Yan, S. (2005). Application of the vacuum preloading method in soil improvement projects Elsevier Geo-Engineering Book Series (Vol. 3, pp. 91-117): Elsevier.
- Clough, R. W. (1960). The finite element in plane stress analysis. Proc. 2nd ASCE Confer. On Electric Computation, 1960.
- Das, B. M. (2008). Advanced Soil Mechanics.
- Das, B. M. (2011). Geotechnical engineering handbook: J. Ross publishing.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018). Principles of foundation engineering: Cengage learning.
- Dhaybi, M. (2015). Renforcement de fondations superficielles par soil mixing: analyses par modélisation physique et numérique. INSA de Lyon.
- Dinh, A. Q. (2009). Étude sur modèle physique des mécanismes de transfert de charge dans les sols renforcés par inclusions rigides. Application au dimensionnement. Ecole des Ponts ParisTech.

- Ferber, V., Bourguet, R., Ouvry, J., Cibot, L., & Gautier-Bret, Y. (2015). Conception d'un matelas en sols traités renforcé par géosynthétique sur inclusions rigides: Rocade de Bourges. Actes des 10e Rencontres Géosynthétique, 24-26.
- Geoengineer.org. (5 octobre 2023). How the Past 30 Years of PLAXIS History Pave the Way for a Promising Future. Retrieved from <https://www.geoengineer.org/news/how-the-past-30-years-of-plaxis-history-pave-the-way-for-a-promising-future>
- Gilleron, N., Bourgeois, E., & Saitta, A. (2016). Utilisation du hardening soil model dans l'étude du creusement de tunnels superficiels. Paper presented at the JNGG 2016-Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur.
- Girout, R., Blanc, M., Thorel, L., & Dias, D. (2013). Apport des géosynthétiques dans le renforcement par inclusions rigides des sols compressibles. Paper presented at the 9èmes rencontres géosynthétiques.
- Hallaire, V. (1987). Retrait vertical d'un sol argileux au cours du dessèchement. Mesures de l'affaissement et conséquences structurales. *Agronomie*, 7(8), 631-637.
- Hatem, A. (2009). Comportement en zone sismique des inclusions rigides: Analyse de l'interaction sol-inclusion-matelas de répartition-structure.
- Hausmann, M. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*: McGraw-Hill.
- Hewlett, W. (1988). Analysis of piled embankment. *Ground Engrg.*, 21(3), 12-18.
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook-A guide to understanding landslides*: US Geological Survey.
- Knappett, J. (2012). *Craig's soil mechanics (Vol. 8)*: Spon Press London.
- Lambert, N., & Remeysen, K. Utilisation du pressiomètre auto-foreur dans le processus de calibrage de l'analyse régressive d'un essai de chargement Use of Self-boring Pressuremeter in the Calibration Process of the Back-analysis of a Load Test.
- Lee, Y. J., Lee, K. I., & Cho, T. J. (2025). Heating-induced stabilization of weak clayey soils: A model incorporating pore water evaporation. *Soils and Foundations*, 65(1), 101576.
- MANUAL, C. (2004). *Lime-Treated Soil Construction Manual Lime Stabilization & Lime Modification*. published by National Lime Association, USA, Bulletin, 326.
- Murthy, V. (2002). *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*: CRC press.
- Nicholson, P. G. (2014). *Soil improvement and ground modification methods*: Butterworth-Heinemann.
- Philipponat, G. (1979). *Fondations et ouvrages en terre*.
- Probaha, A. (1998). State of the art in deep mixing technology, Part 1: Basic concepts and overview of technology. *Ground Improvement*, 2(2), 81-92.
- Queyroi, D., Chaput, D., & Pilot, G. (1985). *AMELIORATION DES SOLS DE FONDATION-CHOIX DES METHODES D'EXECUTION*.

- Queyroi, D., Chaput, D., & Pilot, G. (1985). AMELIORATION DES SOLS DE FONDATION-CHOIX DES METHODES D'EXECUTION.
- Raju, V., & Valluri, S. (2008). Practical applications of ground improvement. Paper presented at the Symposium on Engineering of Ground & Environmental Geotechniques (SEG2).
- Reese, L. C., Isenhower, W. M., & Wang, S.-T. (2005). Analysis and design of shallow and deep foundations (Vol. 10): John Wiley & Sons.
- Schanz, T., Vermeer, P. A., & Bonnier, P. G. (2019). The hardening soil model: Formulation and verification Beyond 2000 in computational geotechnics (pp. 281-296): Routledge.
- Shen, S., Du, Y., & Luo, C. (2010). Evaluation of the effect of double-o-tunnel rolling-correction via apply one-side block loading. *Can Geotech J*, 47(10), 1060-1070.
- Swift, S. S., & Pearlman, S. L. Rigid Inclusions: A Spectrum of Applicability IFCEE 2024 (pp. 315-325).
- Terashi, M., & Juran, I. (2000). Ground improvement-state of the art. Paper presented at the ISRM International Symposium.
- Tran, V. D. (2013). Étude de l'amélioration des sols par traitement à la chaux.
- Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., & Topp, L. (1956). Stiffness and deflection analysis of complex structures. *journal of the Aeronautical Sciences*, 23(9), 805-823.
- Vautrain, J. (1980). Comportement et dimensionnement des colonnes ballastées. *Revue française de géotechnique* (11), 59-73.
- Vulpe, C. (2011). Développements d'indicateurs de qualité dans la modélisation des ouvrages géotechniques par la méthode des éléments finis : applications aux soutènements. Université Paris-Est.
- Zdravković, L. (1999). Finite element analysis in geotechnical engineering: theory: Thomas Telford.