

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERRI DE TIZI-OUZOU (UMMTO)  
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de master académique

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

*Thème*

### INFLUENCE DES INCLUSIONS SUR LES TASSEMENTS SOUS DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

Présenté par :  
M<sup>r</sup> TIMHADJELT Lotfi

Devant le jury composé de :

Monsieur : KHELIL N

Monsieur : KAHIL A

Madame : IDRES S

Président.

Promoteur.

Examineur.

Promotion : 2023 / 2024

## Remerciements

*Je commence par exprimer ma profonde gratitude envers **Dieu**, le Tout-Puissant et Miséricordieux, qui ma a donné la force et la persévérance nécessaires pour mener ce travail à bien **ALHAMDOULILLAH**.*

*Je souhaite ensuite adresser mes plus vifs remerciements à mon promoteur **M.***

***KAHIL Amar***

*Pour avoir accepté de diriger mon projet. Je suis très reconnaissant pour ses conseils avisés, son soutien constant, sa bienveillance, ainsi que sa disponibilité infallible.*

*Veillez recevoir l'expression de mes sincère reconnaissance et de mon grand respect.*

*Mes remerciements vont aussi aux membres du jury et **Mme IDRES** et **M.KHELIL** qui me font l'honneur d'évaluer mon travail*

*Enfin, j'exprime ma gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.*

*Je dédie ce travail*

*À mes très chers parents*

Je dédie ce modeste travail à mes parents Kamel et Karima envers les quels les mots ne suffirons jamais pour exprimer ma profonde gratitude ma fierté et mon amour

*À mon très cher frère Ramy*

Sans lequel tout cela n'aurais pas été possible et Pour m'avoir soutenu tout au long de mon cursus universitaire Je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

*À la mémoire de ma tante, Wassila*

Puisse Dieu tout puissant t'accorder sa clémence, sa miséricorde et T'accueillir dans son saint paradis.

*À mes très chères tantes et mon oncle*

Lila , Naima, Amina, Salima et Aziz pour leur encouragements, et leur soutient infailible

*À tout mes amis*

Qui m'ont aidé durant toute ma vie estudiantine

*Lotfi*

# Table des matières

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux.....	IV
Liste des abréviations et notations.....	V
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 01 : généralités sur les techniques de renforcement des sols</b>	
1.1.Introduction.....	3
1.2. But d'amélioration des sols.....	4
1.3. Évolution du sol.....	4
1.4. Éléments constitutifs d'un sol.....	5
1.4.1. La phase gazeuse.....	5
1.4.2. La phase liquide.....	5
1.4.3. La phase solide.....	6
1.4.4. Classification des sols : sols grenus, sols fins.....	6
1.4.4.1. Sols organiques.....	7
1.5. Techniques adaptées à la complexité du sol et à chaque domaine d'utilisation.....	8
1.5.1. Méthodes mécaniques.....	9
1.5.1.1. Compactage de surface.....	9
1.5.1.2. Vibrocompactage.....	10
1.5.1.3. Colonnes ballastées.....	11
1.5.2. Méthodes hydromécaniques.....	12
1.5.2.1. Amélioration des conditions de drainage.....	12
1.5.2.2. Amélioration par Inclusions de géo synthétiques.....	13
1.5.2.3. Amélioration par inclusion des nappes de géotextile.....	13
1.5.2.4. Amélioration par couche sandwich.....	14
1.5.2.5. Amélioration par inclusion de fibres et mailles géo synthétiques.....	15
1.5.2.6. Renforcement géo synthétiques (polyester).....	16
1.5.2.7. Le rabattement.....	16
1.5.3. Méthodes thermiques.....	17
1.5.3.1. Déshydratation.....	17
1.5.3.2. Amélioration temporaire par congélation.....	17

---

1.5.4. Méthodes chimiques.....	18
1.5.4.1. Amélioration des sols par injection.....	18
1.6. Conclusion.....	27
<b>CHAPITRE 02 : Principe de fonctionnement des inclusions rigides</b>	
2.1. Introduction.....	28
2.2. Description de la technique et domaines d'application.....	29
2.2.1. Le principe de fonctionnement.....	29
2.3. Domaine d'application.....	32
2.3.1. Inclusions sous dallage (des dallages des bâtiments industriels et commerciaux) .....	32
2.3.2. Inclusions sous remblai.....	32
2.4. But d'utilisation.....	32
2.5. Les éléments constitutifs des Inclusions rigides.....	33
2.6. Les inclusions préfabriquées.....	35
2.6.1. Les principaux types d'inclusions préfabriquées.....	35
2.6.1.1. Les pieux bois.....	35
2.6.1.2. Les pieux métalliques préfabriqués.....	36
2.6.1.3. Les pieux bétons préfabriqués.....	36
2.6.1.4. Pieux en béton armé.....	36
2.6.1.5. Pieux muraux.....	37
2.6.1.6. Pieux porteurs.....	37
2.6.1.6.1. Pieux porteurs d'extrémité.....	37
2.6.1.6.2. Pieux de friction.....	38
2.6.1.7. Pieux d'amélioration du sol.....	38
2.6.1.8. Pieux composites.....	38
2.6.1.9. Pieux en acier.....	38
2.6.2. Principaux avantages et les désavantages des pieux préfabriqués.....	38
2.6.2.1. Avantage.....	38
2.6.2.2. Désavantage.....	39
2.6.3. Les nclusions construites in-situ.....	39
2.6.3.1. Les principaux types d'inclusions construites in-situ.....	39
2.6.3.1.1. Les pieux forés.....	39
2.6.3.1.2. Les pieux battus tubés.....	40

---

2.6.3.1.3. Les pieux de type « Vibro Concrete Column » .....	40
2.6.3.1.4. Les colonnes à module contrôlé.....	40
2.6.3.1.5. Les inclusions par mélange d'un liant avec le sol.....	41
2.6.3.2. Principaux avantages et désavantages des pieux construits in situ.....	42
2.7. Principe de fonctionnement des sols par inclusions rigides.....	42
2.8. La plate-forme de transfert.....	44
2.8.1. Matériaux constituant la plate-forme de transfert.....	44
2.8.2. Renforcements horizontaux.....	46
2.9. Conclusion.....	47
<b>CHAPITRE 03 : Les Fondations Superficielles et Les Tassements</b>	
3.1. Introduction.....	49
3.2. Rôle d'une fondation.....	50
3.2.1. Rôle principal.....	50
3.2.1.1. Charges verticales.....	50
3.2.1.2. Charge horizontale.....	50
3.2.2. Rôles secondaires.....	51
3.3. Choix du type de Fondation.....	52
3.4. Définition des fondations superficielles.....	52
3.5. Types de fondations superficielles.....	53
3.6. Schématisation et description.....	54
3.6.1. Les fondations filantes.....	54
3.6.2. Les fondations isolées.....	55
3.6.3. Les fondations radiers (les dalles) .....	55
3.6.3.1. Les différents types de radier.....	55
3.7. Phénomène interne de poinçonnement.....	57
3.8 Les Tassements.....	58
3.8.1 Définition.....	58
3.8.2. Composantes du tassement.....	58
3.9. Tassement des sols saturés.....	59
3.10. Courbes de tassement.....	59
3.11. Fonctionnement des fondations superficielles.....	61
3.11.1. Comportement d'une semelle sous charge verticale centrée.....	61

---

3.12. Mécanisme de rupture d'une fondation superficielle.....	62
3.13. Capacité portante des fondations superficielles.....	64
3.14. Conclusion.....	65

#### **CHAPITRE 04 : Logiciel de modélisation Plaxis**

4.1. Introduction.....	66
4.2. Présentation de la méthode des éléments finis.....	67
4.3. Le calcul par la méthode des éléments finis.....	67
4.4. La Géotechnique et PLAXIS.....	69
4.5. Le logiciel Plaxis.....	69
4.5.1. Le programme d'entrée de données (Input).....	70
4.5.2. Le programme de calcul (Calculations).....	70
4.5.3. Le programme de résultats (Output).....	71
4.5.4. Le programme courbe (Curves).....	71
4.6. Système d'options du code Plaxis.....	71
4.6.1. Le Maillage.....	71
4.6.2. Les conditions aux limites en déplacement.....	71
4.6.3. Les contraintes initiales dues au poids des terres.....	72
4.6.4. Les pressions interstitielles.....	72
4.6.5. Le coefficient de sécurité.....	72
4.7. Types de modèle en Plaxis.....	72
4.8. Types d'éléments utilisés par Plaxis.....	73
4.9. Modèles de comportement utilisés dans le Plaxis.....	74
4.9.1. Modèle de comportement élasto-plastique.....	75
4.9.1.1. Elasto-plasticité.....	75
4.9.1.2. Comportement élastoplastique.....	75
4.10. Conclusion.....	76

#### **Chapitre 05 : Modélisation numérique et interprétations des résultats**

5.1. Introduction.....	77
5.2. Etude paramétrique.....	78
5.3. Caractéristiques des matériaux.....	79

5.3.1. Caractéristiques du massif de sol.....	79
5.3.1.1. Argile Limoneuse .....	79
5.3.1.2. Limon Marneux .....	80
5.3.1.4. Sable Grossier Graveleux Caillouteux .....	81
5.3.2. Caractéristiques du Matelas .....	82
5.3.3. Caractéristiques de la Fondation .....	83
5.4. Génération du maillage .....	83
5.4.1. Matelas 0.35 m.....	83
5.5. Calcul .....	84
5.6. Interprétation des résultats.....	91
5.7. Conclusion.....	94
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>93</b>
<b>Références bibliographiques</b>	

## Liste des figures

<b>Figure 1.1.</b> Différentes phases de sol.....	05
<b>Figure 1.2.</b> Classification des sols .....	07
<b>Figure 1.3.</b> Compactage de surface ; matériels utilisés .....	09
<b>Figure 1.4.</b> Chantier d'un compactage dynamique profond (Compactage dynamique à très haute énergie (4000 t.m) aéroport de Nice (1978) .....	10
<b>Figure 1.5.</b> Vibro-compactage : Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques .....	11
<b>Figure 1.6.</b> Colonnes ballastés : Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques .....	12
<b>Figure 1.7.</b> Influence du renforcement sur la résistance à la liquéfaction.....	14
<b>Figure 1.8.</b> .Influence d'épaisseurs de couches de sable sur le déviateur .....	15
<b>Figure 1.9.</b> Amélioration par congélation (Sotraisol fondations).....	18
<b>Figure 1.10.</b> Technique de jet-Groutitng (Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques) .....	19
<b>Figure 1.11.</b> Les injections solides .....	20
<b>Figure 1.12.</b> Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides verticales.....	21
<b>Figure 1.13.</b> Réseau d'inclusions soumis à un chargement .....	21
<b>Figure 1.14.</b> Traitement à la chaux (Projet Lhoist-Chantier Pilote).....	23
<b>Figure 1.15.</b> Chantier de traitement du sol au ciment.....	25
<b>Figure 2.1.</b> Grands travaux placement d'inclusions .....	29
<b>Figure 2.2.</b> Type de construction sur sols renforcés et améliorer par inclusions rigides .....	30
<b>Figure 2.3.</b> Schéma de principe du renforcement par inclusions rigides.....	31
<b>Figure 2.4.</b> Géométrie d'une maille élémentaire .....	33
<b>Figure 2.5.</b> Exemple des dalles .....	34
<b>Figure 2.6.</b> Système de fondation par pieux en bois .....	35
<b>Figure 2.7.</b> Système de fondation par pieux métalliques préfabriqués.....	36
<b>Figure 2.8.</b> Pieux en béton armé.....	37
<b>Figure 2.9.</b> . Pieux forés grand diamètre.....	40

<b>Figure 2.10.</b> Principe de réalisation d'un pieu foré en béton armé .....	41
<b>Figure 2.11.</b> Schéma de principe d'un renforcement par Inclusions Rigides en 3D.....	43
<b>Figure 2.12.</b> Différentes dispositions du renforcement horizontal dans la plate-forme de transfert de charge .....	46
<b>Figure 3.1.</b> : La structure porteuse transmet toutes ces charges au sol par l'intermédiaire des fondations.....	51
<b>Figure 3.2.</b> Caractéristique géométrique d'une fondation superficielle .....	53
<b>Figure 3.3.</b> Types de fondations superficielles.....	53
<b>Figure 3.4.</b> Fondation filante .....	54
<b>Figure 3.5.</b> Fondation isolée .....	55
<b>Figure 3.6.</b> Fondation radier .....	55
<b>Figure 3.7.</b> Les différents types de radier .....	56
<b>Figure 3.8.</b> Courbe de tassement .....	60
<b>Figure 3.9.</b> Courbe chargement-tassement d'une semelle superficielle .....	61
<b>Figure 3.10.</b> Mécanisme de rupture d'une semelle rigide .....	63
<b>Figure 3.11.</b> Nature de la rupture d'une fondation dans un sable.....	64
<b>Figure 4.1.</b> Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique .....	73
<b>Figure 4.2.:</b> Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol .....	74
<b>Figure 4.3.</b> Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique .....	75
<b>Figure 4.4.</b> Représentation du comportement élastique parfaitement plastique .....	76
<b>Figure 5.1.</b> Présentation du model numérique.....	79
<b>Figure 5.2.</b> Matelas 0.35 m.....	82
<b>Figure 5.3.</b> Génération du maillage.....	84
<b>Figure 5.4.</b> Tassements sous une force de $F=300$ KN.....	84
<b>Figure 5.5.</b> Tassements selon le profil horizontal ( $H=3$ m).....	85
<b>Figure 5.6.</b> Courbe de tassements selon le profil horizontal.....	85
<b>Figure 5.7.</b> Tassements sous la fondation.....	86
<b>Figure 5.8.</b> Courbe de tassement sous la fondation.....	86
<b>Figure 5.9.</b> Tassements sous une force $F=300$ KN.....	87

<b>Figure 5.10.</b> Tassement sous profil horizontal.....	87
<b>Figure 5.11.</b> Courbe de tassements sous profil horizontal.....	88
<b>Figure 5.12.</b> Tassements sous la fondation.....	88
<b>Figure 5.13.</b> Courbe de tassements.....	89
<b>Figure 5.14.</b> Tassements sous une force $F=300$ KN.....	89
<b>Figure 5.15.</b> Tassements sous profil horizontal.....	90
<b>Figure 5.16.</b> Courbe représentative des tassements sous profil horizontal.....	90
<b>Figure 5.17.</b> Courbe de tassements sous la fondation.....	91
<b>Figure 5.18.</b> Différentes couches de matelas.....	91
<b>Figure 5.19.</b> Tassements sous fondation.....	92



## **Liste des tableaux**

<b>Tableau 1.1.</b> Composants principaux du ciment portland.....	24
<b>Tableau 1.2.</b> Composition chimique en pourcentage des cendres volantes et du ciment portland .....	26
<b>Tableau 5.1.</b> Propriétés de la première couche de sol (AL).....	80
<b>Tableau 5.2.</b> Propriétés de la deuxième couche de sol (LM).....	81
<b>Tableau 5.3.</b> Propriétés de la troisième couche de sol (SG).....	81
<b>Tableau 5.4.</b> Propriétés du Matelas.....	82
<b>Tableau 5.5.</b> Propriétés de la Fondation.....	83

## **Liste des principales notations et indices**

<b>Notation</b>	<b>Dénomination</b>
Dr	densité relative
PEHD	polyéthylène avec surface lisse
PEHDT	polyéthylène de très grande densité avec surface rugueuse
NTB	géotextile constitué de fibres polyester non tissé
TT	géotextile constitué de mono-filament polyester
AR	Aspect ratio
DCM	Le Deep Cement Mixing
DSM	Le Deep Soil Mixing
LC	Les Lime Columns
LCC	Lime Cement Columns
CBR	California Bearing Ratio
LCPC	Laboratoire Centrale Ponts et Chaussées
qu	La contrainte de rupture de la semelle
qa	La contrainte admissible
F	Coefficient de sécurité
R	le rayon hydraulique de la fondation
MEF	Méthode des éléments finis
E	le module d'Young
$\nu$	Le coefficient de Poisson
c	la cohésion
$\varphi$	l'angle de frottement
$\psi$	l'angle de dilatance
$\epsilon_e$	déformation élastique
$\epsilon_p$	déformation plastique
$\epsilon$	déformation totale
K	ressort de raideur

## **Introduction Générale**

Les fondations superficielles jouent un rôle essentiel dans la stabilité et la durabilité des structures. L'un des aspects clés à prendre en compte lors de la conception des fondations est le tassement, c'est-à-dire la déformation verticale du sol sous l'effet des charges appliquées. Les tassements excessifs peuvent entraîner des dommages structurels, des fissures et des déformations indésirables, compromettant ainsi la performance globale de la structure.

Les fondations superficielles sont largement utilisées dans la construction pour supporter les charges des structures en les transmettant au sol. Cependant, dans certains cas, les sols peuvent présenter une faible capacité portante. Pour remédier à ces problèmes, différentes techniques de renforcement des sols ont été développées, et l'une de ces techniques est l'utilisation d'inclusions rigides.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'influence des inclusions rigides et les différentes couches de matelas sur les tassements sous des fondations superficielles. L'étude vise à évaluer comment leurs présences modifie le comportement du sol, en particulier en termes de réduction des tassements et de distribution des contraintes. Comprendre ces mécanismes est crucial pour optimiser la conception des fondations et garantir leur stabilité à long terme.

L'influence des inclusions rigides sur les tassements des fondations superficielles est un domaine de recherche en géotechnique qui suscite un intérêt croissant surtout dans des pays en voie de développement comme l'Algérie. Les inclusions rigides, telles que les pieux, les colonnes ballastées ou les géosynthétiques renforcés, peuvent être utilisées pour améliorer les caractéristiques mécaniques du sol et réduire les tassements. Elles permettent de redistribuer les charges appliquées, d'augmenter la capacité portante du sol et de limiter les déformations.

La recherche existante dans ce domaine a permis de mettre en évidence certains avantages des inclusions rigides et la couche de matelas, mais des lacunes subsistent. Les études antérieures se concentrent souvent sur des cas spécifiques et ne fournissent pas toujours une compréhension approfondie des mécanismes. De plus, les méthodes d'évaluation des tassements et des contraintes induites par les inclusions rigides peuvent varier, ce qui rend difficile la comparaison des résultats entre différentes études.

Ainsi, ce mémoire vise à combler ces lacunes en fournissant une analyse approfondie de l'influence des inclusions rigides et des matelas sur les tassements des fondations superficielles.

Le premier chapitre de ce mémoire introduit les principales techniques de renforcement des sols, en mettant en lumière les principes fondamentaux, les applications et les enjeux associés. Nous explorerons les différentes méthodes, telles que le compactage, l'injection de résines, et bien sûr, les inclusions rigides, en discutant de leurs avantages et inconvénients. Cette revue générale permettra de situer notre étude dans le contexte des techniques modernes de renforcement.

Le deuxième chapitre se concentrera sur le principe de fonctionnement des systèmes de renforcement des sols basés sur les inclusions rigides. Nous examinerons les mécanismes par lesquels ces inclusions rigides réduisent les tassements et améliorent la capacité portante des fondations superficielles.

Le troisième chapitre aborde les fondations superficielles, qui constituent une solution courante dans la construction. Nous discuterons des critères de conception, des méthodes d'analyse et des approches de dimensionnement. L'intégration des techniques de renforcement, notamment celles basées sur les inclusions rigides, sera également explorée, mettant en avant leur impact sur la stabilité des structures, mais aussi la problématique principale les tassements.

Le chapitre numéro quatre est dédié à la présentation du logiciel Plaxis, un outil de modélisation numérique reconnu dans le domaine de la géotechnique. Nous discuterons de ses fonctionnalités, de son interface utilisateur et des types d'analyses qu'il permet d'effectuer. L'utilisation de Plaxis pour modéliser le comportement des fondations superficielles renforcées par inclusions rigides sera également mise en évidence, illustrant ainsi l'importance des outils numériques dans l'évaluation des performances des structures.

Le dernier chapitre l'étude Paramétrique (Variation de l'épaisseur de la couche du Matelas sur les Tassements) et interprétations des résultats, visant à évaluer l'impact de la variation de l'épaisseur de la couche du matelas sur les tassements sous les fondations superficielles renforcées par inclusions rigides. Nous exposerons la méthodologie adoptée, les paramètres sélectionnés et les résultats obtenus à partir de simulations numériques. Une analyse des résultats sera effectuée pour en tirer des interprétations significatives.

Enfin, nous terminons ce mémoire par des conclusions et une liste des références bibliographiques.

## **CHAPITRE 01**

# **Généralités sur les techniques de renforcement des sols**

# **CHAPITRE 01**

## **Généralités sur les techniques de renforcement des sols**

### **1.1. Introduction**

Les méthodes d'amélioration des sols sont de précieux outils utilisés par les ingénieurs pour résoudre les problèmes de stabilité et de déformations auxquels ils sont confrontés lors de la réalisation de projets. Au cours du 20e siècle, grâce à l'énorme développement industriel, de nombreuses techniques de renforcement et d'amélioration des sols ont été développées. Parmi celles-ci, on trouve l'ajout de chaux, de ciment, le compactage mécanique ou dynamique du sol, ainsi que l'utilisation d'inclusions rigides et de colonnes ballastées.

Cependant, ces techniques présentent certaines limites dans certains cas in situ, tels que les ouvrages de grande profondeur ou les structures anciennes et sensibles. De plus, elles sont souvent considérées comme coûteuses et agressives pour l'environnement. Ces dernières années, de nouvelles approches basées sur des processus biologiques ont émergé, offrant des alternatives aux techniques classiques d'amélioration des sols.

Ces processus biologiques exploitent la capacité des micro-organismes et des organismes vivants à influencer les propriétés des sols. Par exemple, les procédés de biogaz, la formation de biofilms et la bio cimentation sont recommandés pour surmonter certains inconvénients des techniques traditionnelles. Ces approches considèrent le sol non plus comme un matériau inerte, mais comme un écosystème vivant.

L'objectif de cette section du mémoire est de présenter une vue d'ensemble des techniques de renforcement et d'amélioration des sols.

Nous examinerons les principes de base de ces techniques, les mécanismes impliqués et les avantages qu'elles offrent par rapport aux méthodes conventionnelles.

Nous aborderons également les domaines d'application potentiels et les défis associés à leur mise en œuvre.

## **1.2. But d'amélioration des sols**

L'amélioration des sols vise à renforcer et à stabiliser des sols de qualité médiocre afin de garantir la sécurité et la durabilité des structures et des infrastructures. Avec la croissance de la population mondiale et de ses activités, il est de plus en plus nécessaire d'aménager des sols qui présentaient auparavant des caractéristiques mécaniques faibles.

Les techniques d'amélioration des sols sont largement utilisées et sont présentes dans notre vie quotidienne, même si elles sont souvent invisibles pour le grand public car elles sont enfouies dans le sol.

Elles sont utilisées dans la construction de fondations, de murs de soutènement, de remblais routiers, de voies ferrées, et bien d'autres infrastructures.

La réalisation d'infrastructures dans des zones initialement considérées comme inconstructibles représente un défi technologique, mais aussi un enjeu stratégique, économique et environnemental. Dans de nombreux cas courants, les techniques d'amélioration des sols sont essentielles pour la réalisation de projets d'infrastructures.

L'amélioration des sols permet d'optimiser les coûts de construction, d'exploiter des sites auparavant considérés comme inutilisables et de garantir la sécurité des ouvrages dans des conditions géotechniques difficiles.

Dans la suite de ce mémoire, nous examinerons en détail les différentes techniques d'amélioration des sols, en mettant l'accent sur leurs principes, leurs avantages et leurs domaines d'application. Nous aborderons également les aspects économiques et environnementaux liés à ces techniques, ainsi que les défis et les limites à prendre en compte lors de leur mise en œuvre.

## **1.3. Évolution du sol**

Le sol ne se reproduit pas. Il se forme progressivement à partir d'une roche mise au contact de la biosphère sous l'influence surtout de facteurs bioclimatiques. Comme il ne reste pas toujours semblable à lui-même, on dit qu'il évolue. Mais, on ne sait pas avec certitude qu'elles sont toutes les étapes par lesquelles il est passé, ni le temps exact pris par chacune d'elles.

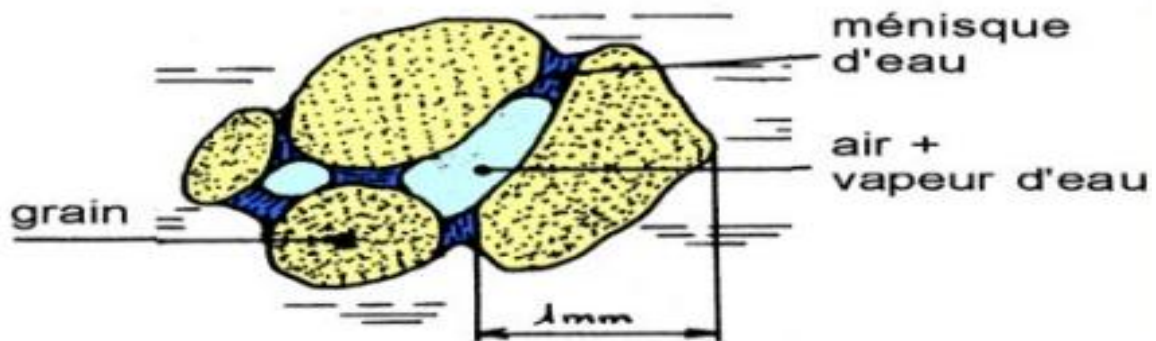
L'examen détaillé de certains caractères fait penser que des étapes peuvent être courtes, d'autres beaucoup plus longues ne font l'objet que de changements très lents, au point qu'on peut parler d'état stationnaire.

#### 1.4. Éléments constitutifs d'un sol

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau pouvant circuler ou non entre les particules et d'air ou de gaz (figure 1.1). Il est donc, en général, constitué de trois phases

$$\text{Sol} = \text{phase solide} + \text{phase liquide} + \text{phase gazeuse}$$

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



**Figure 1. 1.** Différentes phases de sol ([UNIT]. Université Numérique Ingénierie et Technologie)

##### 1.4.1. La phase gazeuse

En Génie Civil, le gaz contenu dans le sol est généralement de l'air pour les sols secs ou un mélange d'air et de vapeur d'eau pour les sols humides. Lorsque tous les vides sont remplis d'eau le sol est dit saturé.

##### 1.4.2. La phase liquide

Au sein d'un échantillon de sol fin, on distingue plusieurs catégories d'eau

- L'eau de constitution qui rentre dans la composition chimique des feuillets.

- L'eau liée ou eau adsorbée qui constitue un film autour de chaque grain. Elle n'est pas mobile et ne s'évacue qu'à des températures très élevées.

- L'eau Interstitielle qui peut être soit l'eau libre soit l'eau capillaire. L'eau libre a la faculté de circuler librement entre les grains ; l'eau capillaire est une partie de l'eau libre qui remonte par capillarité entre les grains. L'eau interstitielle s'évapore complètement si l'échantillon de sol est porté à une température supérieure à 100° C.

Lorsque le sol est humide et non saturé, l'eau libre est en général concentrée aux points de contact entre les grains. Elle est retenue à ces endroits par des forces de capillarité qui créent entre les grains des forces d'attraction.

### **1.4.3. La phase solide**

Trois types de sols ressortent comme étant les plus souvent rencontrés sur un chantier

- Sols grenus
- Sols fins
- Sols organiques.

### **1.4.4. Classification des sols : sols grenus, sols fins**

Première classification : limite adoptée : 20µm

Sols grenus  $d > 20\mu\text{m}$

Sols fins  $d < 20\mu\text{m}$

Cailloux, grave, sable Limon, argile

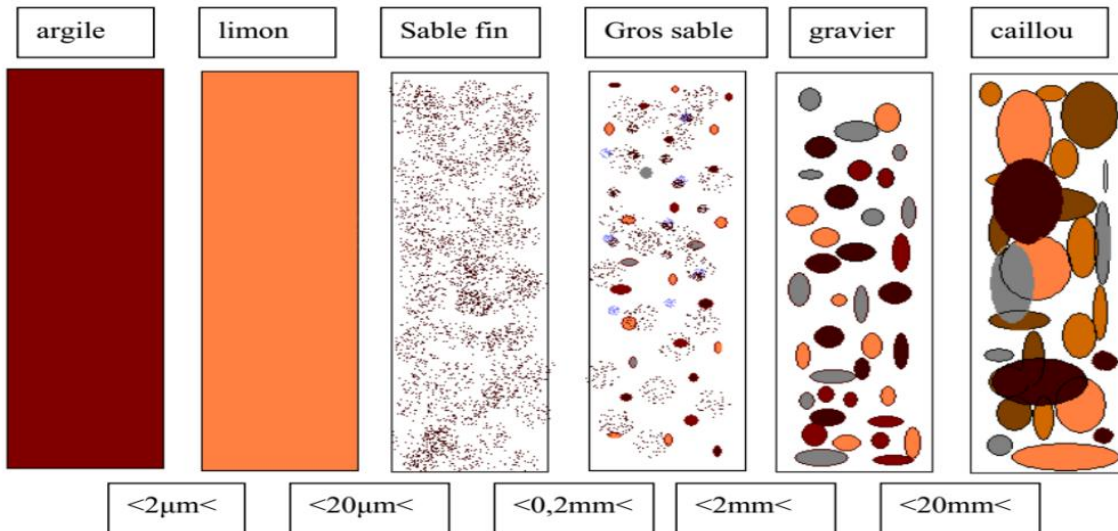
- Blocs, cailloux (fragments de la roche mère) : éboulis de pente, alluvions grossières, moraines  
 $20\text{mm} < d < 200\text{mm}$ .

- Grave (fragment de roche mère) : sédiments détritiques généralement formés de plusieurs minéraux  
 $2\text{mm} < d < 20\text{mm}$ .

- Sables (fragment de roche mère) : sédiment détritique généralement formés d'un seul minéral :  
 $20\mu\text{m} < d < 2\text{mm}$ .

- Limons (fragment de roche mère) : mélange de très fins de sable, mêlés en général à des particules argileuses :  $2\mu\text{m} < d < 20\mu\text{m}$ .

- Les argiles (altération physico-chimique de certains minéraux des roches) : particules  $< 2\mu\text{m}$ .



**Figure 1. 2.** Classification des sols.

#### 1.4.4.1. Sols organiques

Les vases et les tourbes renferment 2 types de matières organiques

- Matière organique libre : débris végétaux et résidus animaux
- Matière organique liées : colloïde humiques fixés à la phase minérale

La transformation de la matière organique fraîche en humus colloïdal est l'humification. La transformation des tourbes franches en tourbe amorphe est la tourbification ; suivant les degrés de tourbification les propriétés physicochimiques seront différents.

Le complexe argilo humique est l'association de la phase argileuse et des matières humiques.

La matière organique a un rôle important dans le comportement des sols. Si la matière organique est un peu évoluée et abondante (tourbe fraîche) sa texture retient beaucoup d'eau et est très compressible

### **1.5. Techniques adaptées à la complexité du sol et à chaque domaine d'utilisation**

La complexité des sols et les exigences spécifiques de chaque projet nécessitent l'adoption de techniques de renforcement appropriées. Ces techniques prennent en compte à la fois la nature du sol en place et son environnement. Deux approches majeures sont couramment utilisées pour accroître les caractéristiques mécaniques des sols : la modification de la structure interne du sol et le renforcement par l'ajout d'inclusions.

La première approche, la modification de la structure interne du sol, vise à améliorer la compacité du sol en réduisant les vides. Par exemple, l'application d'une surcharge sur un sol saturé, suivie d'une expulsion de l'eau en surpression, permet de consolider et de tasser un sol fin saturé sous charge.

Ce processus, connu sous le nom de consolidation tassement, implique l'évacuation de l'eau en surpression, qui s'écoule plus ou moins rapidement en fonction de la perméabilité du sol. Une autre technique consiste à utiliser des vibrations pour provoquer le réarrangement des grains du sol, ce qui conduit à une densification, appelée compactage dynamique. Cette méthode permet de compacter le sol sur une profondeur inférieure à 10 mètres en utilisant des impacts générés par une masse de 15 à 150 tonnes tombant de 20 à 40 mètres.

La deuxième approche, le renforcement du sol par l'ajout d'inclusions, fait intervenir des éléments de renfort verticaux ou horizontaux dans le sol. Ces éléments de renfort peuvent prendre différentes formes, notamment des colonnes ballastées, des pieux ou des géo synthétiques rigides. L'objectif de ces techniques est de renforcer le sol en lui conférant une capacité portante accrue et une résistance aux déformations. Les inclusions rigides transfèrent les charges sur une plus grande surface, réduisant ainsi la contrainte sur le sol et prévenant les déformations excessives. Elles peuvent également stabiliser les sols mous en augmentant leur résistance et leur rigidité.

En résumé, les techniques de renforcement des sols doivent être sélectionnées en fonction de la complexité du sol et des exigences spécifiques du projet. La modification de la structure interne du sol et le renforcement par l'ajout d'inclusions rigides offrent des solutions efficaces pour améliorer les caractéristiques mécaniques des sols. Ces techniques permettent de garantir la stabilité des ouvrages et de limiter les déformations indésirables, assurant ainsi leur durabilité et leur fonctionnalité à long terme.

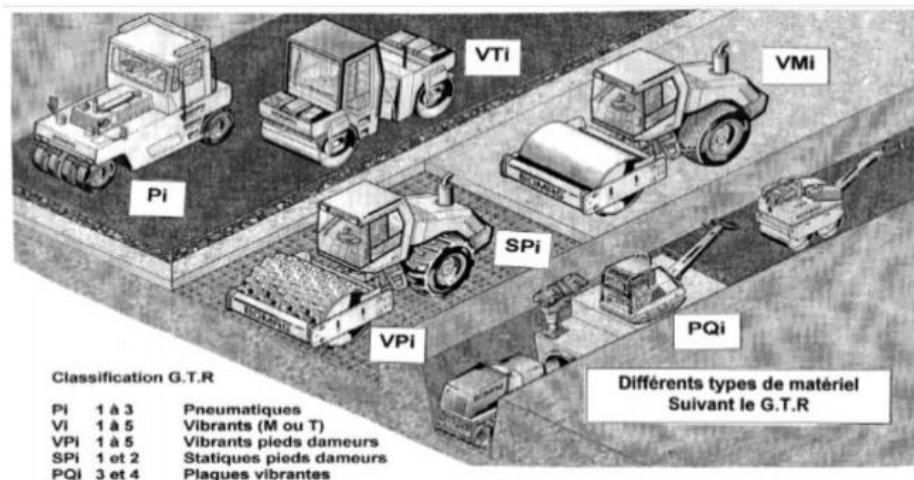
### 1.5.1. Méthodes mécaniques

#### 1.5.1.1. Compactage de surface

Le compactage ou le tassement des sols est l'augmentation de leur densité apparente résultant de l'application d'une charge sur ces derniers (figure 1.3). L'utilisation de cette méthode permet de réduire le volume d'air dans le sol, réduire la diffusion des gaz par asphyxie des racines, des vers de terre et de la vie dans le sol, réduire la circulation de l'eau dans le sol, augmenter l'énergie de l'unité motrice pour effectuer le travail de sol, décomposer lentement la matière organique. L'action du compactage se traduit par :

- Rapprochement des grains du sol entre eux (tassement T) ;
- Une expulsion d'air.

Le compactage de surface est utilisé pour une profondeur maximale d'environ 3m à 4m



**Figure 1. 3.** Compactage de surface ; matériels utilisés. [LOKAMAT]

Le compactage dynamique permet de densifier les sols à grande profondeur sous l'effet d'impacts de forte énergie obtenus par la chute d'une masse en surface (figure 1.4).

Le principe de base consiste à transmettre des chocs de forte énergie à la surface d'un sol initialement compressible et de faible portance afin d'en améliorer en profondeur les caractéristiques mécaniques. Le pilonnage est associé à un contrôle géotechnique particulièrement intensif de manière à atteindre le plus rationnellement possible le but recherché.

Le compactage dynamique est applicable dans tous les types de sols à comportement granulaire. Il s'applique particulièrement bien aux remblais hétérogènes inertes ainsi qu'aux terrains rapportés de composition variable, y compris lorsqu'ils contiennent des blocs. Le compactage dynamique peut s'appliquer aussi bien à des sols non saturés qu'à des sols situés sous la nappe.



**Figure 1. 4.** Chantier d'un compactage dynamique profond (Compactage dynamique à très haute énergie (4000 t.m) aéroport de Nice (1978).

### 1.5.1.3. Vibrocompactage

La pénétration du vibreur dans le sol jusqu'à la profondeur souhaitée sous l'effet des vibrations et du lancement à l'eau ou à l'air (figure 1.5), compactage du sol in-situ sous l'effet des vibrations dans un domaine de profondeur de 3m à 65m avec une de traitement de 2m à 5.5m et une densité relative atteinte :  $D_r = 60\%$  à  $80\%$ .

#### \* Remblaiement

Le compactage s'effectue avec remblaiement depuis la surface, ou simplement en laissant s'abaisser le niveau du sol en place.

#### \* Compactage

L'aiguille vibrante est remontée par passes de 50cm à 1m. Le sable ou le gravier en place descend vers la pointe du vibreur. Ce procédé consiste à provoquer une vibration entretenue dans le sol granulaire au moyen d'une aiguille vibrante.

La densification du matériau provoquée par la vibration de l'aiguille, se traduit donc par l'affaissement du sol autour du vibreur.

L'application de cette méthode contribue à augmenter la capacité de portance, la réduction du tassement, l'augmentation de la résistance au cisaillement des sols de fondation, des remblais de barrages et enfin la réduction du potentiel de liquéfaction des sables lâches saturés et des limons



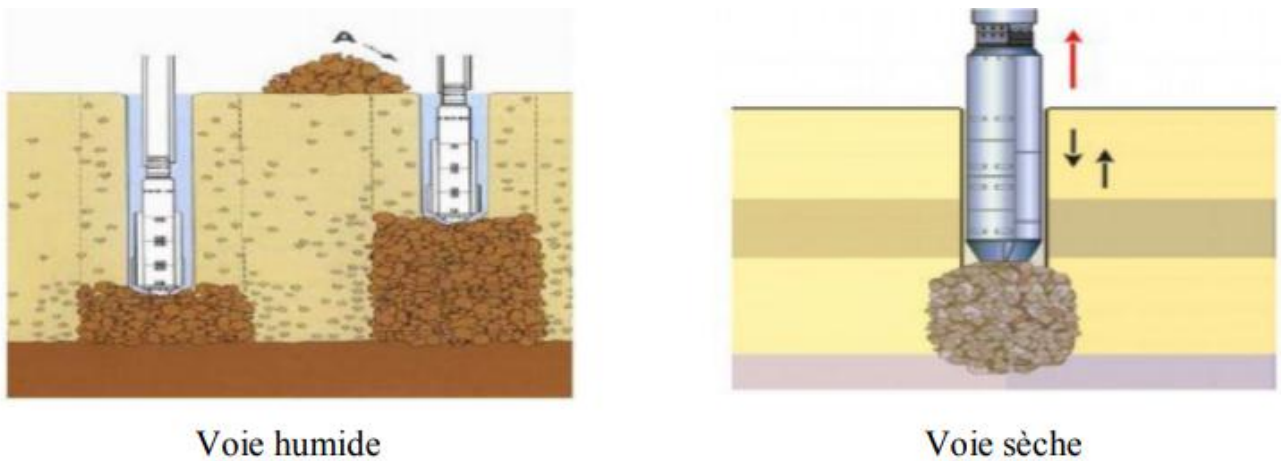
**Figure 1. 5.** Vibro-compactage : Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques. (Centre de formation [CFMS])

#### 1.5.1.4. Colonnes ballastées

Les colonnes renforcent et drainent le sol (figure 1.6). Améliorer le sol encaissant est aussi un but. But principal pour la diminution du risque de liquéfaction. Domaine de profondeur : 3m à 30m, maille de traitement : 1.0m à 3.0m, diamètre de colonne : 0.6m à 1.5m. Pendant le traitement : enregistrements profondeur / intensité et consommation de ballast par niveau. Après : Essais de chargement, essais in-situ dans et entre colonnes.

### \* Les avantages

- Diminution de la sollicitation de cisaillement dans le sol ;
- Effet bénéfique du drainage ;
- Diminuer les tassements totaux et différentiels ;
- Diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant ;
- Diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des séismes.



**Figure 1. 6.** Colonnes ballastées : Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques.

## 1.5.2. Méthodes hydromécaniques

### 1.5.2.1. Amélioration des conditions de drainage

La méthode consiste à placer des drains verticaux dans la couche sujette à la liquéfaction. Le plan d'implantation, le nombre et le diamètre de ces drains seront déterminés de façon qu'ils puissent être capables à dissiper la surpression dans les limites du temps de passage du séisme.

Généralement on utilise comme matériaux de drainage le gravier, mais actuellement il est de plus remplacé par des grilles recouvertes par des géotextiles. La figure montre les résultats obtenus sur table vibrante par Watari et Fujiwara (1977).

On note que pour un pouvoir drainant identique des drains et pour un même temps d'excitation, l'évolution maximale de la surpression interstitielle diminue avec le rapprochement des drains. Le développement de la pression interstitielle dépendait du nombre et de l'espacement des drains.

### **1.5.2.2. Amélioration par Inclusions de géo synthétiques**

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de matériaux synthétiques sur la résistance à la liquéfaction (Vercueil et al 1997, Unnikrishan et al 2002, Boominathan et Sari 2002). Par leurs expériences, ils ont montré que l'apport du géo synthétiques à un effet significatif sur la résistance à la liquéfaction.

### **1.5.2.3. Amélioration par inclusion des nappes de géotextile**

Vercueil, Billet et Cordary (1997) ont étudié le comportement du sable d'Hostun Rf renforcé par des nappes de géotextiles. (Figure 1.7) montre les résultats obtenus et met en évidence l'influence du renforcement sur la résistance à la liquéfaction. On note que pour des valeurs de NI la finition de surface du géotextile joue un rôle déterminant dans le gain pour la résistance à la liquéfaction, après cinq cycles la résistance à liquéfaction coïncide pour les matériaux testés avec du PEHD et PEHDT (PEHD = polyéthylène avec surface lisse, PEHDT = polyéthylène de très grande densité avec surface rugueuse) ; tandis que pour des valeurs NI > 20 les courbes de résistance à la liquéfaction se disperse graduellement à la baisse. Pour les valeurs NI < 20, le matériau renforcé par NTB7 (NTB = géotextile constitué de fibres polyester non tissé, TT = géotextile constitué de mono-filament polyester) et avec une meilleure compressibilité donne de bons résultats. Le géotextile NTB4 avec la même finition de surface et une compressibilité différente présente presque la même résistance à la liquéfaction que le NTB7 pour des valeurs de NI > 20 et une faible résistance pour NI < 20. On note aussi que pour des valeurs de NI (nombre de cycles) inférieur à 20, la compressibilité est un facteur déterminant dans l'amélioration de la résistance à la liquéfaction

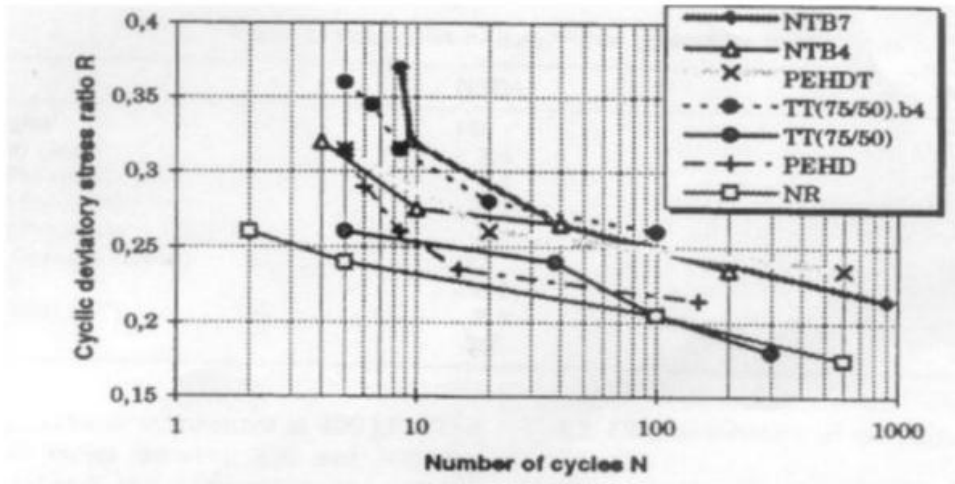


Figure 1. 7. Influence du renforcement sur la résistance à la liquéfaction.

#### 1.5.2.4. Amélioration par couche sandwich

L'interaction entre le sol et le renforcement est plus importante dans le cas de la structure des sols renforcés soumis aux charges de cycle (chemin de fer, routes, digue etc.). La résistance des sols sous chargement cyclique dépend d'un certain nombre de facteurs comme le nombre de cycles, la fréquence de chargement et la magnitude de la contrainte cyclique (Seed et Lee, 1966 ; Diyaljee et Raymond 1982, Krishnaswamy et Isaac 1994 et 1995), ces derniers ont rapporté que le renforcement aide à réduire le potentiel de liquéfaction des sols. Plusieurs études ont été réalisées à l'appareil triaxial en variant le type de renforcement, les couches sandwichs (sandwich layer), magnitude de la pression de cellule, nombre et renforcement des couches, la teneur en eau etc (figure 1.8).

Unnikrishnan, Rajagopal et Krishnaswamy (2002) ont étudié l'influence du renforcement par la technique de couche sandwich (couche de sable de chaque côté du géotextile) sur un sol argileux du nord de Chennai city (Inde). Le sable provient des couches de sable de la rivière Ennore du même périmètre que l'argile. Des échantillons de diamètre 38 et 100 mm avec des hauteurs respectives de 76 et 200mm ont été testés à l'appareil triaxial en cisaillement monotone sur chemin UU (non drainé non consolidé) avec une vitesse de déformation axiale constante de 1.5%/min ; simulant le comportement d'un sol sujet à un chargement rapide après construction.

Trois types de renforcement ont été utilisés dans cette étude, à savoir géotextile tissé et non tissé, et micro-grille.

La micro-grille est un écran de plastique très fin avec de petites ouvertures de 0.5mm, très approprié pour les essais à petite échelle.

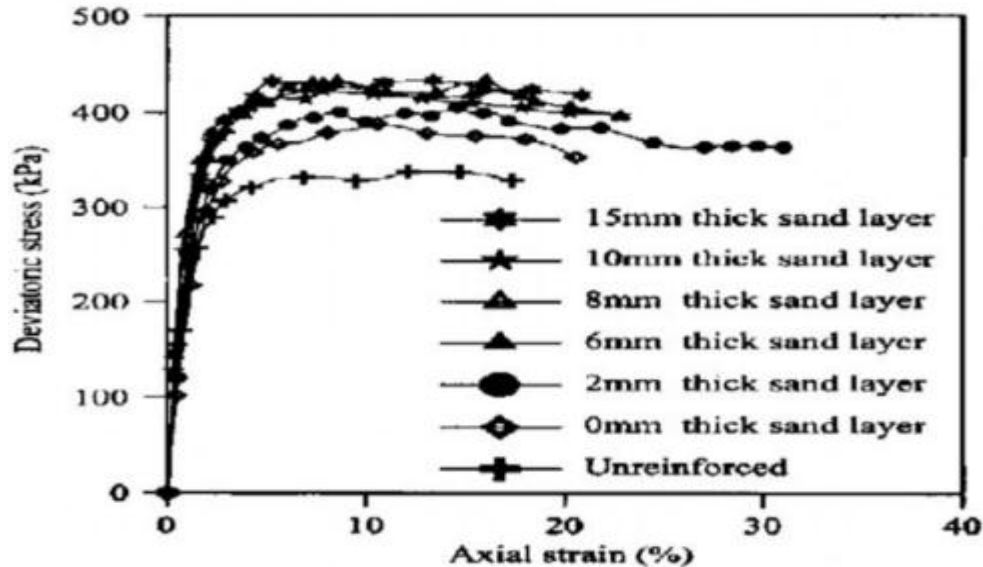


Figure 1. 8. Influence d'épaisseurs de couches de sable sur le déviateur.

#### 1.5.2.5. Amélioration par inclusion de fibres et mailles géo synthétiques

Le renforcement des sols par la technique d'inclusion de fibres synthétiques aléatoirement est utilisé dans les structures de soutènement, digues etc. Divers types d'éléments répartis aléatoirement, comme éléments de mailles polymères, fibres métalliques, fibres synthétiques sont utilisés pour le renforcement des sols. Cependant, l'étude du comportement des sols renforcés par la technique aléatoire d'inclusion des éléments synthétiques sous chargement cyclique est très limitée dans la littérature.

Boominathan et Hari (2002) ont étudié le comportement du matériau " Fly Ash" renforcé par des fibres et mailles géosynthétiques. Le matériau de renforcement a été utilisé avec une proportion d'aspect AR (Aspect ratio) de 20 pour les fibres ( $AR = l/L$ ) et 10 pour les mailles ( $AR = l/L$ ). Les essais ont été réalisés sur des échantillons de densité  $D_r = 50\%$  et une teneur en fibres synthétiques de 0.5 à 2% du poids sec du FLY ASH. On note que la pression interstitielle

diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres. Il est à noter qu'avec une plus grande teneur en fibre l'homogénéité de l'échantillon n'est pas là même à cause de la ségrégation entre les particules du FLY ASH et le renforcement. On observe que l'effet sur la résistance à la liquéfaction est très significatif, l'échantillon renforcé par des mailles (AR = 20) donne une faible valeur de pression interstitielle que l'échantillon renforcé par avec un AR = 10 qui montre une meilleure résistance à la liquéfaction. On note que le renforcement par mailles indique une supériorité sur le renforcement par fibres sur la résistance à la liquéfaction. On peut conclure que l'inclusion de mailles synthétiques dissipe facilement la pression interstitielle et fournit un meilleur emboîtement dans le matériau.

#### **1.5.2.6. Renforcement géo synthétiques (polyester)**

D'après Madhavi et al (2006), ont étudié l'influence du renforcement du sol par des différentes formes de géo synthétiques. On note que la présence du polyester améliore d'une manière considérable la résistance du sable. L'échantillon renforcé par huit couches de polyester donne une meilleure valeur de résistance (2500kPa) que les autres échantillons. On observe l'utilisation du sable renforcé par un film polyester présenté une résistance plus élevée par rapport l'échantillon renforcé par géotextiles et géo grilles.

#### **1.5.2.7. Le rabattement**

Il consiste à abaisser la pression des nappes à l'intérieur d'un volume de terrain déterminé, en dessous de la surface extérieure du volume considéré. Il est obtenu par approprier un nombre de captages disposés autour de volume à rabattre et dans lesquels un pompage permanent est assuré.

Plusieurs procédés de rabattement peuvent être distingués, en fonction de la nature des terrains rencontrés

- Le rabattement à pleine fouille, qui consiste à pomper l'eau dans un puisard aménagé au fond de la fouille et sur creusé d'environ 0.5 à 1m par rapport à ce dernier ;
- Le rabattement par puits filtrant est employé pour les terrains perméables ; les puits sont perforés au moyen d'une technique appropriée, adaptée au terrain, à l'eau claire, à la boue autodestructrice ou tubés.

### **1.5.3. Méthodes thermiques**

#### **1.5.3.1. Déshydratation**

La déshydratation par la chaleur est très une technique rarement appliquée en géotechnique, elle permet de durcir certaines argiles par exemple. En pratique, la méthode consiste à brûler un carburant dans un forage en utilisant un forage voisin communiquant avec le premier et servant de cheminée de tirage.

#### **1.5.3.2. Amélioration temporaire par congélation**

Cette technique permet d'aller excaver des terrains dans des sols saturés en eau (dans une nappe aquifère ou même sous une rivière ou un fleuve) (figure 1.9). La congélation des terrains aquifères instables à l'azote liquide ou à la saumure est un procédé ancien, à caractère provisoire, et permet une consolidation et un étanchement temporaire du sol. La première est reconnue sûre, rapide mais reste très onéreuse de par la quantité d'azote liquide nécessaire.

Le recours à ce procédé nécessite de bien connaître les transports thermiques liés à la congélation et de bien maîtriser la technologie de mise en œuvre.

De plus, dans certains cas, cette technique peut permettre de faire des économies substantielles dans le cadre d'une bonne mise en œuvre et d'un contrôle rigoureux des opérations.

La congélation fut employée dès la fin du XIXe siècle avec de la saumure puis plus tardivement avec de l'azote liquide, plus onéreux



**Figure 1. 9.** Amélioration par congélation (Sotraisol fondations).

#### **1.5.4. Méthodes chimiques**

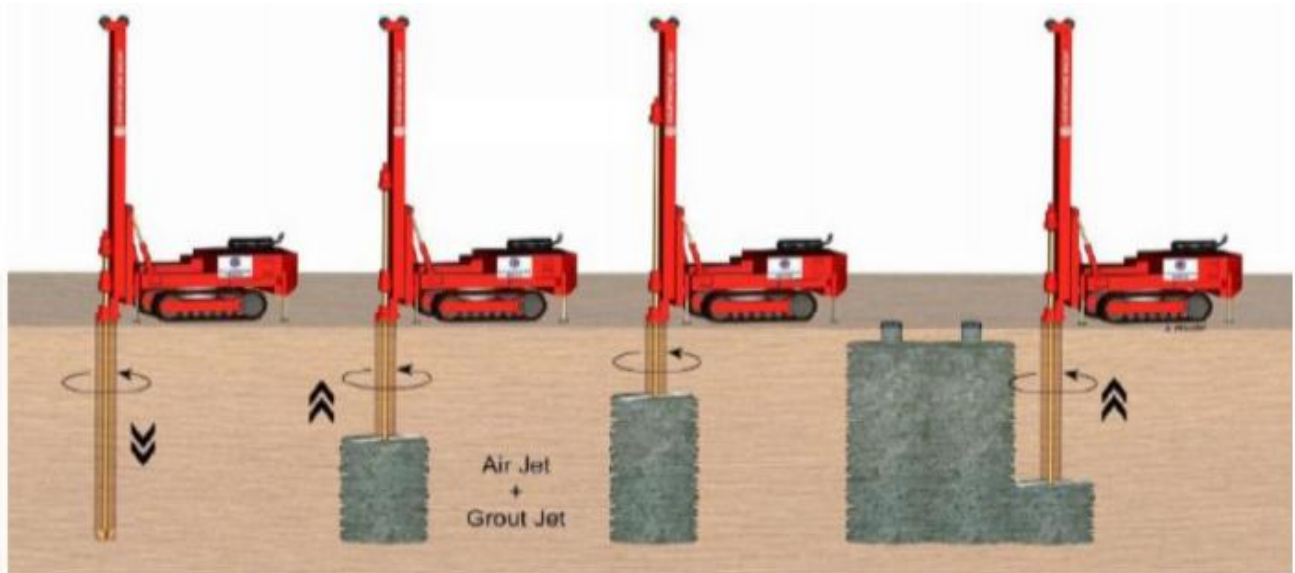
##### **1.5.4.1. Amélioration des sols par injection**

###### **Jet-Grouting**

Le procédé Jet Grouting s'applique aux terrains difficilement injectables par les procédés classiques. Il correspond à un traitement de sol dans la masse par mise en œuvre sous haute pression d'un jet de coulis à base de ciment réalisant in-situ un mélange sol-ciment. Le terrain est déstructuré par la pression du jet et devient un mélange sol-coulis aux caractéristiques mécaniques et dimensionnelles recherchées.

Le terrain est déstructuré par la pression du jet et devient un mélange sol-coulis aux caractéristiques mécaniques et dimensionnelles recherchées.

L'atelier se compose d'une partie fixe (stockage du ciment, centrale de fabrication du coulis, pompe haute pression) reliée par une conduite à une foreuse mobile sur chenilles. La tête de forage est munie de buses d'injection spécifiquement choisies en fonction des terrains rencontrés et des caractéristiques du résultat recherché.

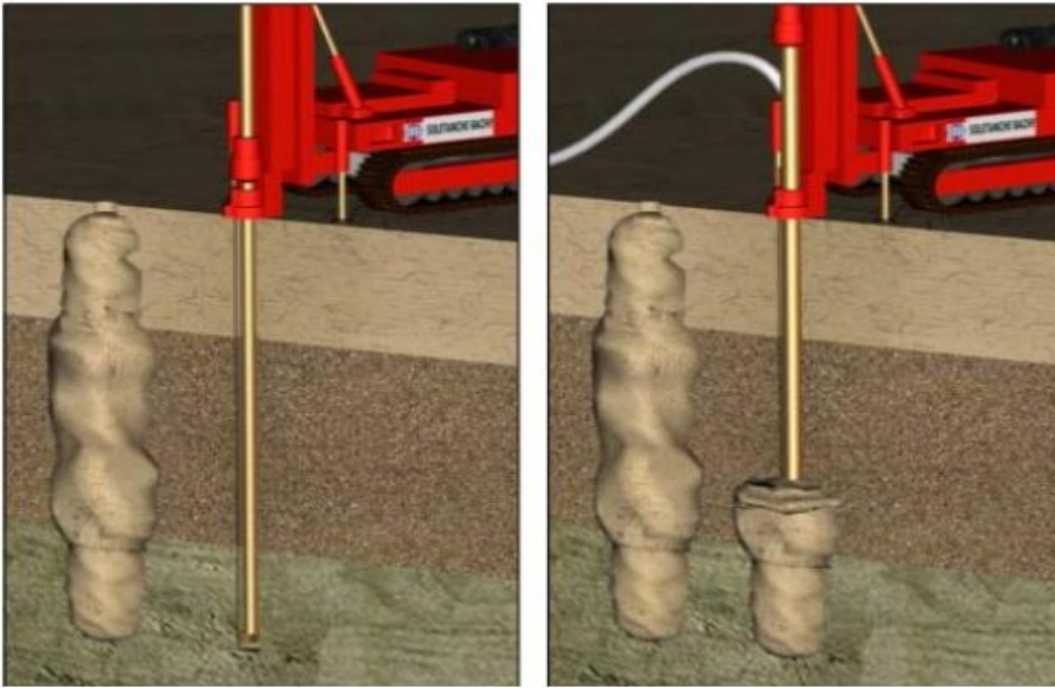


**Figure 1. 10.** Technique de jet-Groutitng (Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques).

### **Amélioration par injection (rigides et souples)**

Utilisée pour le traitement des terrains sableux, limoneux ou argileux, humides ou saturés, la technique d'injection solide ou de densification statique horizontale consiste à injecter sous pression un mortier très visqueux suivant un quadrillage spécifique établi en fonction de la structure du terrain.

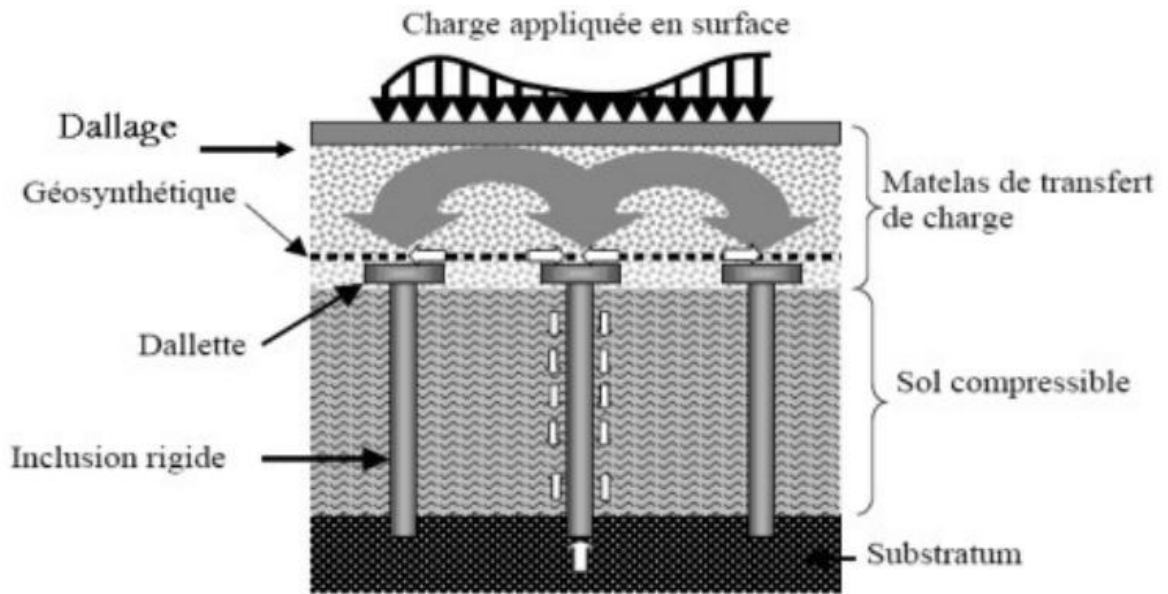
Technique éprouvée, économique et souple, elle permet en outre de réduire le potentiel de liquéfaction en cas de séisme. Elle peut être utilisée sous des constructions existantes.



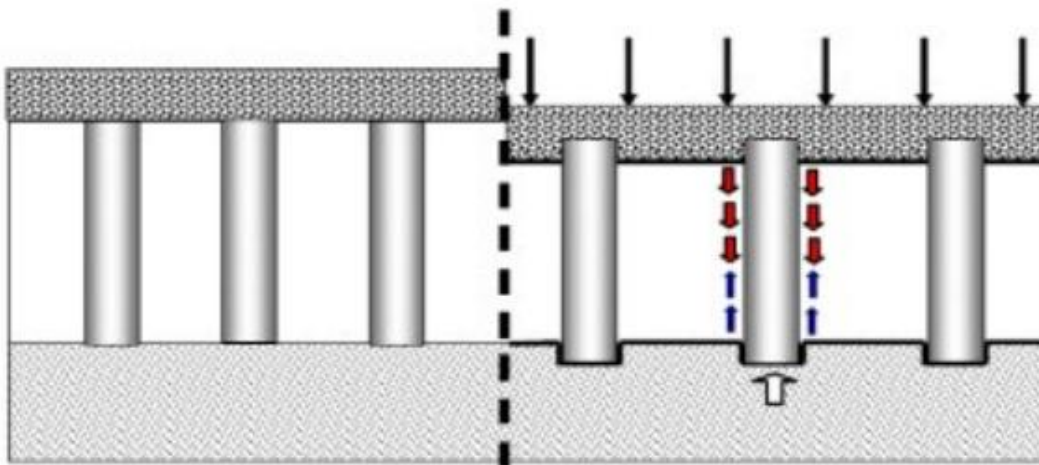
**Figure 1. 11.** Les injections solides. [Y Iagolnitzer · 1996]

Le rôle des inclusions est de transmettre la charge due au poids de l'ouvrage et les charges de service vers le substratum afin de réduire ou même annuler les tassements. Pour cela, les inclusions sont posées sur la couche dure ou légèrement ancrées dans celle-ci. Les inclusions peuvent aussi être coiffées par une tête plus large afin d'augmenter le taux de couverture et optimiser l'efficacité du dispositif. Ces inclusions sont mobilisées d'une part par la charge directement appliquée sur leur tête ; mais aussi par l'effet d'accrochage du sol encaissant lorsque celui-ci tasse sous le chargement appliqué par le poids de l'ouvrage.

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



**Figure 1. 12.** Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides verticales. *Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides verticales [ J Eng Mech, 131 (7) (2005)]*



**Figure 1. 13.** Réseau d'inclusions soumis à un chargement d'après Berthelot et al [13].

### Amélioration des sols par addition d'ajout minéraux

Traiter un sol consiste à mélanger intimement ses éléments à une certaine quantité d'addition. Cette opération provoque une modification physico-chimique qui intervient dans la stabilisation

du sol tel que réaction d'échange de base avec les particules d'argile (cation) et réaction pouzzolanique (cimentation), qui corrige ses défauts de perméabilité et améliore ses qualités de résistance (capacité portante) et de durabilité. Pratiquement tous les sols peuvent être traités. La stabilisation peut être utilisée, avant compactage, in situ ou avec des sols excavés ou amenés d'ailleurs. Cependant une analyse préalable de leur nature est nécessaire avant chaque traitement. Elle détermine la technique et les moyens les plus appropriés à mettre en œuvre, fonction spécificités du terrain

- Utilisation d'addition (chaux, ciment, minéraux...);
- Dosage à respecter ;
- Epaisseur du sol à traiter.

Le traitement des sols en place ou rapportés est aujourd'hui très largement employé sur le territoire.

Il est par ailleurs d'une grande simplicité de mise en œuvre. Les ajouts minéraux les plus utilisés :

- La chaux ;
- Le ciment ;
- Les ajouts cimentaires (laitier, pouzzolane naturelle, cendres volantes et fumée de silice...).

### **Utilisation de la chaux**

Le traitement à la chaux des sols trop humides et/ou trop plastiques, tels les sols argileux ou limoneux, est une solution souvent préconisée pour rendre les terrassements réalisables et stabiliser les sols.

Lors du traitement de ceux-ci à la chaux deux réactions différentes se produisent :

- Une réaction directe et rapide responsable des effets immédiats produits par la chaux (amélioration du sol). La réaction d'hydratation de la chaux vive avec l'eau présente dans les sols diminue la teneur en eau de ceux-ci. Les raisons en sont multiples : la réaction chimique d'hydratation fixe un volume d'eau ; cette réaction exothermique dégage de la chaleur, ce qui réchauffe le sol et entraîne l'évaporation de l'eau et enfin l'aération du sol qui se produit lors du malaxage facilite l'évaporation et contribue à réduire le taux d'humidité. La chaux hydratée peut

alors réagir avec les minéraux argileux, provoquant une floculation des argiles. Cette floculation augmente l'aptitude au compactage du sol.

- Une réaction lente, qui durcit progressivement le mélange sol-chaux compacté, responsable des effets à long terme (stabilisation du sol). L'alcalinité de la chaux augmente le pH du sol, ce qui libère les aluminates et les silicates. Ces derniers peuvent alors réagir avec le calcium apporté par la chaux et l'eau présente dans le sol. Dès ce moment débute le durcissement du sol, sa stabilisation.

Le résultat final, principalement la portance du sol, dépend de la nature et de la réactivité des minéraux argileux présents dans le sol ainsi que de la quantité de chaux ajoutée. Par ailleurs, la réussite de la stabilisation à la chaux d'un sol nécessite d'une part une source de silice et/ou d'alumine et d'autre part des particules de petites dimensions susceptibles à l'échange cationique ainsi que le temps.



**Figure 1. 14.** Traitement à la chaux (Projet Lhoist-Chantier Pilote).

### Utilisation du ciment

Le ciment portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories de sols utilisés pour les routes et les revêtements de pistes d'aéroports. Alors qu'il existe

plusieurs similarités entre la chaux et le ciment portland comme stabilisants, le ciment portland fournit en plus la chaux et la source de silice.

Le ciment portland est un matériau fin formé à partir d'un mélange de clinker et de gypse. Le clinker est composé principalement de quatre phases d'oxydes ; deux phases de silice calcique et deux phases d'alumine calcique. Les deux phases de silice calcique sont les plus importantes dans le processus de stabilisation. Lors de l'hydratation ces deux phases produisent l'hydroxyde de calcium et l'hydrate de silice calcique. Le premier composant fournit l'apport en calcium nécessaire à l'échange cationique, à la floculation de l'argile et son agglomération tandis que le deuxième composant quant à lui apporte la résistance ainsi que la structure au sol traité.

**Tableau 1. 1.** Composants principaux du ciment portland.

Name of compound	Chemical formula	Abbreviation
Tricalcium silicate	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C3S
Dicalcium silicate	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C2S
Tricalcium aluminate	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Terracalciumaluminoferrite	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF

Lorsque le ciment portland est mélangé à l'initiation de l'hydratation occasionne une augmentation rapide de la concentration de calcium dans le sol (figure1.15). A mesure que les ions de calcium sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile.



**Figure 1. 15.** Chantier de traitement du sol au ciment.

Le ciment portland possède donc des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux soit celle de l'hydratation par cimentation. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine ont besoin d'un apport de ciment si les réactions pouzzolanique sont désirées. Par conséquent, le ciment portland peut généralement être utilisé dans les mêmes types de sols que la chaux.

### **Utilisation des ajouts cimentaires**

Parmi les ajouts cimentaires les plus utilisés il y a les cendres volantes, le laitier, la fumée de silice les cendres volcaniques, et le calcaire. Les coûts élevés de la chaux et du ciment ont poussé les chercheurs à trouver d'autres types de liants dans le but d'améliorer les sols instables à faible coût tout en respectant l'environnement. Les cendres volantes sont intimement liées quant à leur processus de stabilisation. Elles sont souvent utilisées conjointement avec la chaux dans les travaux de stabilisation.

Deux types de cendres volantes sont produits par la combustion du charbon à savoir la cendre volante et la cendre de base (Tableau 1.2).

Les cendres volantes ont une composition très semblable à celle du ciment. Comme les cendres volcaniques, elles présentent des propriétés pouzzolanique car elles fixent lentement la chaux présente dans le mélange pour donner naissance à des composés stables ayant des propriétés

hydrauliques. Elles peuvent être siliceuses ou calciques selon leur teneur en chaux libre, les cendres volantes se comportent différemment en présence d'eau. Il existe deux classes de cendre volante à savoir la cendre silico-alumineuse (classe F) et la cendre sulfo-calcique (classe C).

Le tableau ci-dessous indique la composition chimique des deux classes en comparaison avec le ciment portland (Lav et al. 1997).

**Tableau 1. 2.** Composition chimique en pourcentage des cendres volantes et du ciment portland (Lav et al. 1997).

Composés chimiques	classe F silico-alumineuse(%)	Classe C Sulfo-calcique(%)	Ciment portland (%)
SiO <sub>2</sub>	55	29	23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26	133	4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7	9	4
CaO(chaux)	9	41	65
MgO	2	1	2
SO <sub>3</sub>	1	7	2

Le laitier est un sous-produit de la fabrication de la fonte. Il renferme principalement de la chaux, de la silice et de l'alumine. Le laitier est le constituant primaire le plus utilisé dans la fabrication des liants hydrauliques routiers. Les liants à base de laitier sont excellents pour le traitement des sols et pour la stabilisation des matériaux de remblai.

La plupart des sols peuvent être traités avec un mélange chaux-cendres volant. L'approche générale du dosage du mélange consiste à ajouter suffisamment de cendres volantes afin de bien remplir les vides du mélange ainsi que d'y apporter une densité maximale.

L'étape suivante consiste à ajouter suffisamment de chaux permettant de favoriser les réactions pouzzolaniques entre la chaux et les pouzzolaniques disponibles dans les cendres volantes.

L'addition des cendres volantes à l'argile réduit considérablement sa perméabilité. Par conséquent, tout dépend du type des sols, d'addition de cendres volantes et de chaux peut donner de meilleurs résultats qu'avec la chaux seule. Ainsi, un mélange de cendres volantes et de chaux semble avoir les propriétés d'un liant hydraulique, soit d'être capable de durcir non seulement dans l'air mais également dans l'eau. Avec un bon dosage, l'addition des cendres volantes peut augmenter les propriétés mécaniques d'un sol notamment sa résistance au cisaillement.

En conséquence, grâce à leurs propriétés pouzzolaniques, la chaux et les cendres volantes peuvent continuer à augmenter la résistance mécanique d'un sol pendant plusieurs années. Il est important de noter que les cendres volantes peuvent se comporter différemment en raison de leur teneur en chaux.

### **1.6. Conclusion**

En conclusion, l'amélioration des sols est essentielle pour résoudre les problèmes géotechniques et permettre la réalisation d'infrastructures sûres et durables.

Elle représente un défi technique majeur et joue un rôle crucial dans le développement des sociétés moderne.

Les techniques de renforcement et d'amélioration des sols ont connu une évolution significative au fil du temps surtout dans les pays en voie de développement comme l'Algérie., offrant aux ingénieurs une gamme d'options pour résoudre les problèmes géotechniques. Les approches basées sur des processus biologiques ouvrent de nouvelles perspectives en exploitant le potentiel des micro-organismes et des organismes vivants. Comprendre ces techniques et leur application dans des contextes spécifiques est essentiel pour une conception géotechnique efficace et durable.

## **Chapitre 02**

# **Principe de fonctionnement des inclusions rigides**

## **Chapitre 02**

# **Principe de fonctionnement des inclusions rigides**

### **2.1 Introduction**

Le renforcement des sols par inclusions rigides constitue une technique novatrice et efficace, visant à améliorer la capacité portante des terrains. Cette méthode repose sur l'insertion de colonnes en béton, en mortier ou d'éléments préfabriqués directement dans le sol. Connue sous le nom d'inclusions rigides, cette approche permet de concevoir des fondations superficielles sur des sols dont les caractéristiques géotechniques auraient, par ailleurs, nécessité des fondations profondes ou semi-profondes.

L'utilisation des inclusions rigides se révèle particulièrement pertinente dans des contextes variés, tels que la construction de dalles, de remblais, ainsi que d'ouvrages industriels et commerciaux, sans oublier les réservoirs et bassins. Cette technique est particulièrement adaptée pour les sols compressibles, où elle vise à minimiser les tassements, tant absolus que différentiels. En évitant le recours à des superstructures rigides et coûteuses, ainsi qu'à des solutions traditionnelles comme le préchargement, qui peut prolonger les délais de construction, les inclusions rigides offrent une réponse pragmatique et économique aux défis géotechniques.

L'usage de poteaux en bois comme inclusions rigides remonte à des temps anciens, mais le développement systématique de cette technique, tel que nous le connaissons aujourd'hui, a pris son essor dans les années 1970, en particulier dans les pays scandinaves, où les conditions géologiques variées ont favorisé son adoption. Les avancées technologiques et méthodologiques ont permis d'optimiser la conception et la mise en œuvre de ce type de renforcement, rendant son utilisation de plus en plus répandue.

En somme, le renforcement des sols par inclusions rigides (Figure 2.1) représente une alternative prometteuse aux fondations superficielles, semi-profondes ou bien même profondes.

Cette technique innovante permet de maîtriser efficacement les tassements, tout en évitant les structures rigides ou les méthodes de renforcement conventionnelles, contribuant ainsi à des projets

de construction plus durables et plus adaptés aux exigences modernes. Son essor depuis les années 1970 témoigne de son efficacité et de sa pertinence dans le domaine du génie civil.



**Figure 2. 1.** Grands travaux placement d'inclusions.

## **2.2. Description de la technique et domaines d'application**

### **2.2.1. Le principe de fonctionnement**

La technique de renforcement par inclusions rigides repose sur l'interaction de deux éléments clés, chacun jouant un rôle spécifique dans la gestion des charges appliquées.

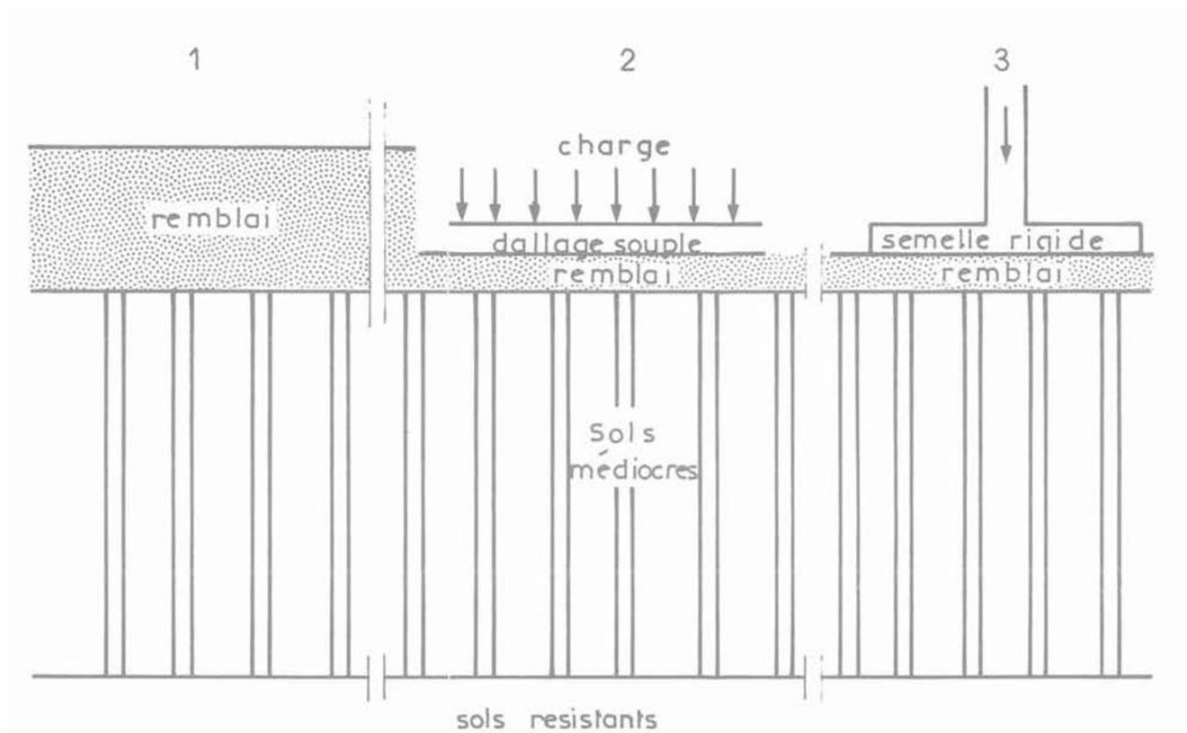
**Inclusions Rigides Verticales :** Ces éléments sont conçus pour transférer efficacement les charges de la structure vers des couches de sol plus résistantes, situées sous des horizons compressibles. En dirigeant la charge vers le substratum peu compressible, ces inclusions réduisent la contrainte sur les couches supérieures, minimisant ainsi les risques de tassement.

**Plate-forme Granulaire :** Entre les inclusions rigides et l'ouvrage, une plate-forme de sol granulaire est mise en place. Cette plate-forme a pour fonction de répartir une part significative de la charge sur le sommet des inclusions rigides. Cette approche est distincte de celle des fondations mixtes, où la structure repose directement sur les pieux ou autres types d'inclusions. En interposant cette plate-forme granulaire, on limite la charge transmise aux couches compressibles du sol. Cela a pour effet de réduire à la fois le tassement absolu et le tassement différentiel, ce qui est crucial pour la stabilité des structures.

L'interface entre la charge appliquée et les inclusions rigides joue un rôle mécanique essentiel (Figure 2.2).

Pour améliorer cette interface, il est possible d'utiliser des traitements spécifiques du sol ou d'intégrer des nappes géosynthétiques horizontales. Ces améliorations augmentent la capacité portante et optimisent le comportement mécanique de la plate-forme granulaire, renforçant ainsi l'efficacité globale de la technique de renforcement par inclusions rigides.

En résumé, cette technique innovante combine des inclusions rigides et une plate-forme granulaire pour améliorer la répartition des charges, réduire les tassements, et assurer la stabilité des structures dans des sols compressibles.



**Figure 2. 2.** Type de construction sur sols renforcés et améliorés par inclusions rigides.

Il est important de noter que c'est bien la combinaison des inclusions et de la plate-forme granulaire qui assure la réduction des tassements différentiels sous l'ouvrage tout en évitant l'interposition d'un élément de structure rigide et onéreux. La désolidarisation entre les inclusions permet ainsi

de simplifier les liaisons et peut apporter aussi une solution efficace vis à-vis ses sollicitations sismiques (Pecker et Teyssandier, 1998).

La charge est appliquée à la surface de la plate-forme de transfert. Celle-ci doit permettre le développement de voûtes prenant appui sur les inclusions et transférant une part importante des charges sur la tête des inclusions (Figure 2.3). Le développement de cet effet voûte suppose d'une part que la plate-forme granulaire ait une résistance au cisaillement suffisante, et que d'autre part son épaisseur permette à la voûte de se former. Les inclusions peuvent aussi être coiffées par une tête plus large afin d'augmenter le taux de couverture et optimiser l'efficacité du dispositif.

Par ailleurs, les efforts résiduels sur la couche compressible vont faire tasser celle-ci, induisant un frottement négatif sur les inclusions rigides qui va transférer ainsi une part supplémentaire de la charge due à l'ouvrage.

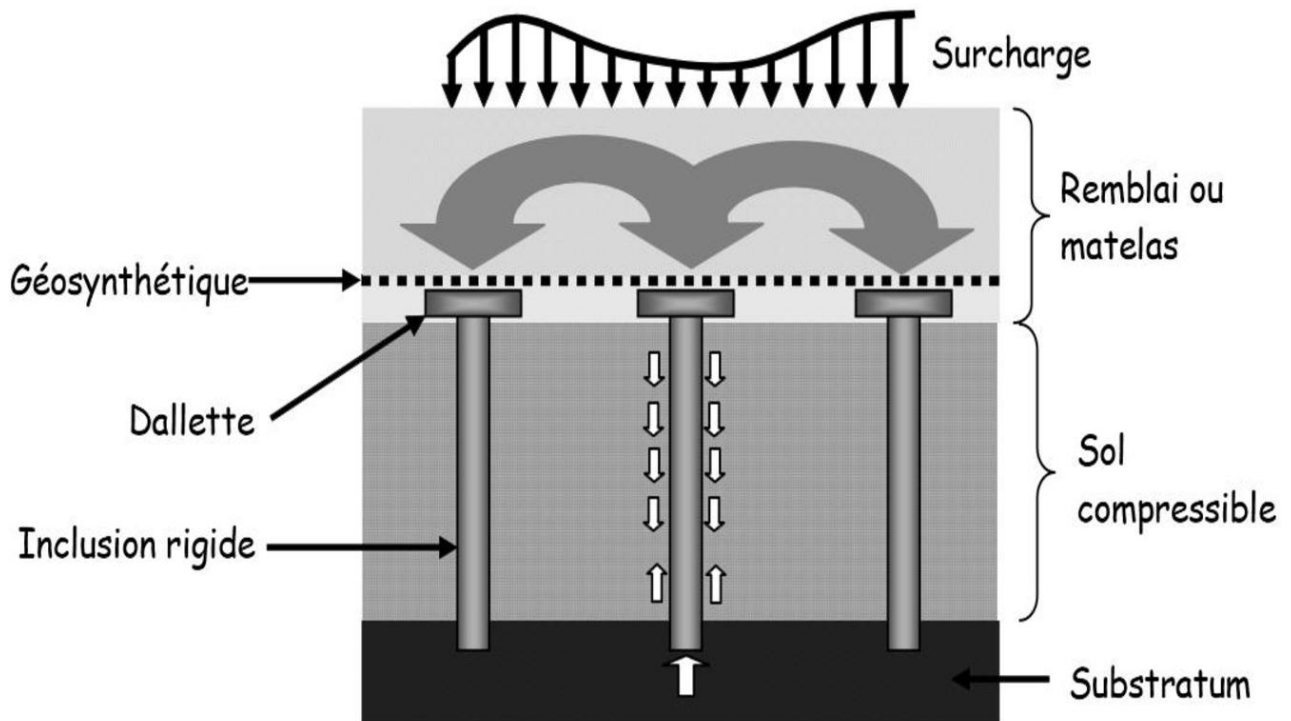


Figure 2.3. Schéma de principe du renforcement par inclusions rigides.

### **2.3. Domaine d'application**

Les solutions d'amélioration de sols sont utilisées d'une façon générale pour des ouvrages de grande emprise au sol.

Dans cette technique de renforcement des sols, il existe généralement deux types d'ouvrage

**2.3.1. Inclusions sous dallage (des dallages des bâtiments industriels et commerciaux) :** pour ce type d'ouvrage une dalle rigide est intercalée entre la PTC et la structure, une attention particulière doit être prise au dimensionnement de la plateforme de transfert de charge à cause des moments fléchissant pouvant se développer et la charge d'exploitation sur le dallage qui n'est pas forcément uniforme.

**2.3.2. Inclusions sous remblai :** la charge dans ce cas est permanente, la surcharge d'exploitation est faible et il n'y a pas de structure. La base du remblai doit être traitée, spécifiquement, pour assurer le rôle de la PTC. La stabilité du remblai et les tassements à la surface de ce dernier sont les critères de dimensionnement pour ce type de réalisation.

### **2.4. But d'utilisation**

- Augmenter sa résistance en place, pour augmenter sa capacité portante ;
- Diminuer la compressibilité des sols en place ;
- Arrêter le mouvement d'une pente instable pour permettre des travaux de confortement permanent
- Accélérer la consolidation d'un dépôt d'argile.
- Homogénéiser les sols pour réduire le risque de tassement différentiel
- Diminuer le potentiel de déformation volumique des sols ;
- Stabiliser le remblai ;
- Améliorer la stabilité d'un talus existant ;
- Réduire la gélivité.

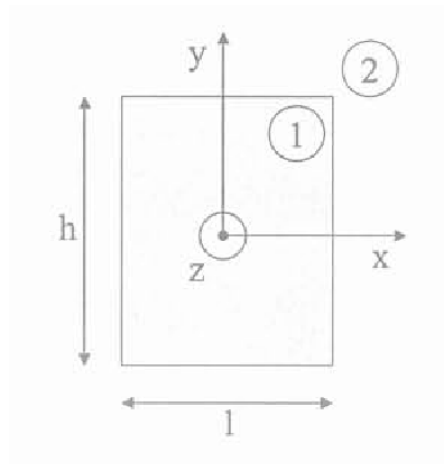
## 2.5. Les éléments constitutifs des Inclusions rigides

Les inclusions rigides, également connues sous le nom d'INCLUSOL, sont des éléments constitutifs utilisés dans le procédé de renforcement des sols. L'objectif de ces inclusions est d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols en place en incorporant un maillage d'éléments verticaux cylindriques ayant un diamètre de 250 à 600 mm. Ces éléments sont composés d'un matériau à base de liant hydraulique, tel que du mortier, du coulis ou du béton.

Dans certains cas, il peut être nécessaire d'associer ces inclusions à la mise en place d'une épaisseur de matériau noble intercalée entre la structure et les inclusions. Cette épaisseur de matériau, connue sous le nom de matelas de répartition, permet de répartir les charges de manière uniforme sur les inclusions rigides et de garantir une meilleure répartition des contraintes.

En résumé, les inclusions rigides sont des éléments cylindriques composés de liant hydraulique, utilisés pour renforcer les sols. Elles sont intégrées dans le sol existant afin d'améliorer ses caractéristiques mécaniques. Dans certains cas, un matelas de répartition peut être utilisé pour assurer une répartition uniforme des charges.

Au niveau de la partie supérieure des inclusions, le sol compressible tasse plus que les inclusions et entraîne du frottement négatif le long de l'inclusion, ce qui contribue au report de la charge sur les inclusions, ainsi le sol de fondation participe aux mécanismes. Au niveau de la partie inférieure, les inclusions poinçonnent le substratum qui n'est jamais parfaitement rigide, ce qui entraîne du frottement positif. Au niveau de la base de l'inclusion se développe un effort de pointe.



**Figure 2. 4.** Géométrie d'une maille élémentaire.

Afin d'augmenter le taux de recouvrement, on peut utiliser un maillage plus serré ou bien coiffer les têtes des inclusions par des dallettes (Figure 2.6).



**Figure 2. 5.** Exemple des dallettes.

Suivant la nature, les propriétés mécaniques et la géométrie de la couche compressible, de nombreux types d'inclusions rigides peuvent être envisagés, allant des pieux classiques aux colonnes de sol traité. On présente ici les principaux types d'inclusions, en les différenciant selon quelle sont préfabriquées et ou fabriquées in situ.

Parmi les inclusions fabriquées in situ, on peut encore distinguer deux familles: les inclusions de type pieux et les inclusions fabriquées par Mélange d'un liant avec le sol en place.

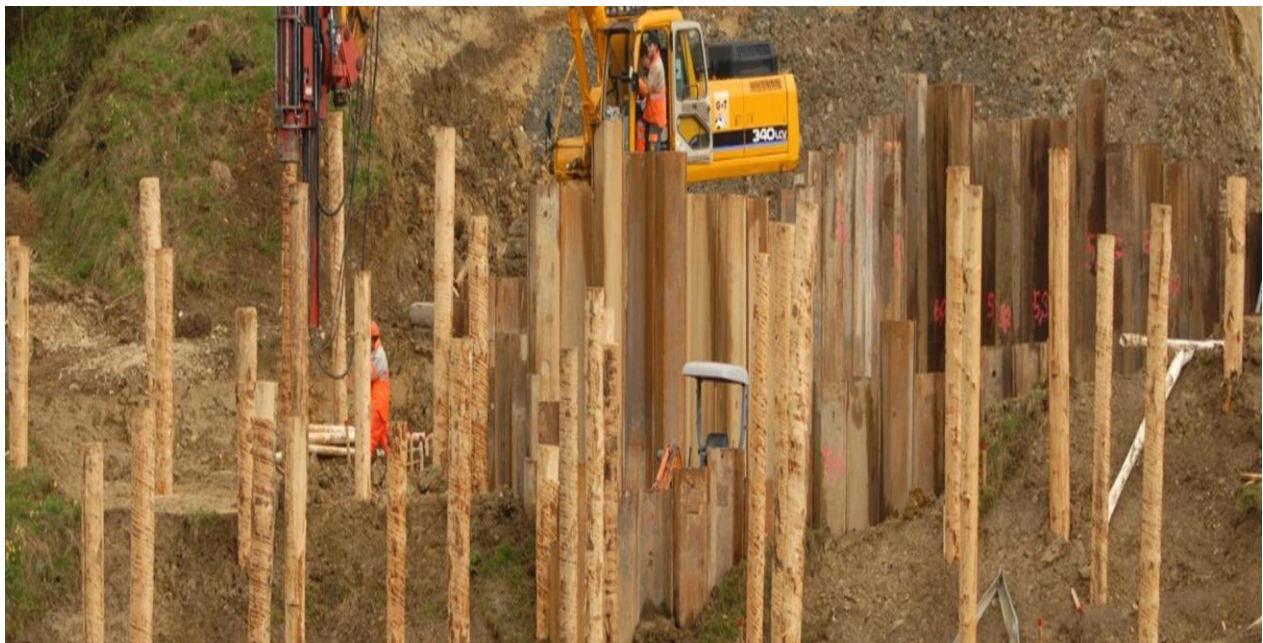
## **2.6. Les inclusions préfabriquées**

Parmi les inclusions préfabriquées, on retrouve principalement tous les types de pieux mis en place par battage ou fonçage ; leur avantage est d'être constituées d'un matériau manufacturé et contrôlé, dont les propriétés géométriques et mécaniques sont connues. Elles sont généralement mises en place par refoulement et ne sont donc pas sources de déblais. Souvent faciles à mettre en œuvre dans des sols mous, elles peuvent être peu économiques si leur dimensionnement est contrôlé par leur fonçage. Plus généralement, leur mise en œuvre peut être source de nuisances (bruits, vibrations) et dans certains cas, le refoulement latéral du sol peut affecter les structures ou les pieux adjacents.

### **2.6.1. Les principaux types d'inclusions préfabriquées**

On distingue principalement

**2.6.1.1. Les pieux bois :** c'est probablement la plus vieille méthode de renforcement des fondations (2.7), encore utilisée dans certains pays. Mis en place par battage, leur principal inconvénient est le risque de détérioration dans les zones de battement de la nappe.



**Figure 2.6.** Système de fondation par pieux en bois.

**2.6.1.2. Les pieux métalliques préfabriqués :** ils sont souvent constitués de profilés en H ou de tubes cylindriques. Parfois rejetés en raison du risque de corrosion (généralement faible sauf conditions agressives), ils ont une grande capacité et les profilés en H génèrent un faible déplacement de sol.



**Figure 2.7.** Système de fondation par pieux métalliques préfabriqués.

**2.6.1.3. Les pieux béton préfabriqués :** en béton armé ou précontraint, et disponibles pour une large gamme de charge, ils ont l'avantage d'être utilisables dans les sols corrosifs.

**2.6.1.4. Pieux en béton armé :** Aussi appelés pieux en béton, ils sont produits soit par pré moulage, soit par coulage en place. Les pieux préfabriqués sont installés par battage tandis que les pieux coulés sur place sont formés en forant un trou suivi de la mise en place de béton frais. Les pieux en béton sont utilisés comme éléments de fondation qui supportent presque tous les types de structures (2.9), en particulier dans les zones où la corrosion est certaine ou très attendue. Les pieux en béton massif ont généralement une section transversale circulaire et rectangulaire.

Les pieux en béton creux ou les pieux filés ont la forme d'un beignet avec des parois plus minces.



**Figure 2.8.** Pieux en béton armé.

**2.6.1.5. Pieux muraux :** Dans cette application, de nombreux pieux individuels sont interconnectés pour former un mur qui contrebalance la pression latérale et les forces verticales minimales. Les pieux muraux ou les palplanches sont utilisés comme retenues pour le sol meuble et parfois l'eau dans de nombreuses applications temporaires et permanentes telles que la construction de batardeaux, de voies navigables, de protection des rives, de tranchées, etc.

**2.6.1.6. Pieux porteurs :** Ces types de pieux sont utilisés pour transférer les charges verticales de la superstructure à travers des strates à faible capacité portante vers une couche solide de sol ou de roche. Les pieux porteurs ont deux types selon la manière dont ils transmettent la charge

**2.6.1.6.1. Pieux porteurs d'extrémité :** l'extrémité inférieure du pieu repose ou est ancrée à une couche solide de sol ou de roche, il agit exactement comme une colonne.

**2.6.1.6.2. Pieux de friction :** Il développe la stabilité à partir du frottement créé entre toute la surface du pieu contre le sol environnant. Le pieu de friction est idéal pour les sols tels que l'argile raide.

**2.6.1.7. Pieux d'amélioration du sol :** Empilés à des intervalles déterminés, ils augmentent la densité et la capacité portante du sol en comprimant ou en compactant tout en agissant également comme un groupe de pieux à friction.

**2.6.1.8. Pieux composites :** Il s'agit d'une application qui combine différents matériaux pour créer le pieu le plus efficace et le plus économique qui s'adapte aux conditions environnementales existantes. Dans ce système, les supériorités et les infériorités des différents matériaux sont prises en compte pour les utiliser stratégiquement avec un maximum d'avantages.

**2.6.1.9. Pieux en acier :** Les tuyaux en acier peuvent être en acier en forme de I ou en tube creux et sont installés par enfoncement à l'aide de marteaux à percussion ou à vibration. Les pieux tubulaires en acier, qui sont les plus courants, sont faciles à enfoncer et peuvent être utilisés comme pieux permanents dans les petits diamètres et comme caissons temporaires ou battants pour les grands diamètres. Les pieux en acier sont privilégiés comme pieux porteurs en raison de leur capacité à être enfoncés dans des strates profondes en raison de leur faible section transversale, ce qui minimise la résistance du sol. Un autre facteur est leur soudabilité pour fournir des extensions plus longues si nécessaire. Les tuyaux en acier peuvent être enfoncés dans des extrémités ouvertes ou fermées.

## **2.6.2. Principaux avantages et les désavantages des pieux préfabriqués**

### **2.6.2.1. Avantage**

Nous distinguons plusieurs avantages

- Matériau des pieux peut être contrôlé avant l'insertion dans le sol,
- Stabilité dans les sols compressibles,
- Pas de dégâts engendrés sur le pieu par soulèvement du sol lors de l'insertion des pieux adjacents,
- Procédure de mise en œuvre non affectée par le niveau de la nappe,
- de très grandes longueurs de pieux peuvent être mises en œuvre

### **2.6.2.2. Désavantage**

Tel que

- Risque de casse lors de la mise en place occasionnant des délais supplémentaires pour le remplacement,
- Peu économique si le choix et donc le coût des matériaux est guidé par les contraintes de mise en œuvre plutôt que par les contraintes en service,
- Cause de nuisance et risque de dégâts par le bruit et les vibrations,
- impossibilité d'insérer de gros diamètres,
- Risques de dégâts sur les structures adjacentes dus au déplacement du sol lors de

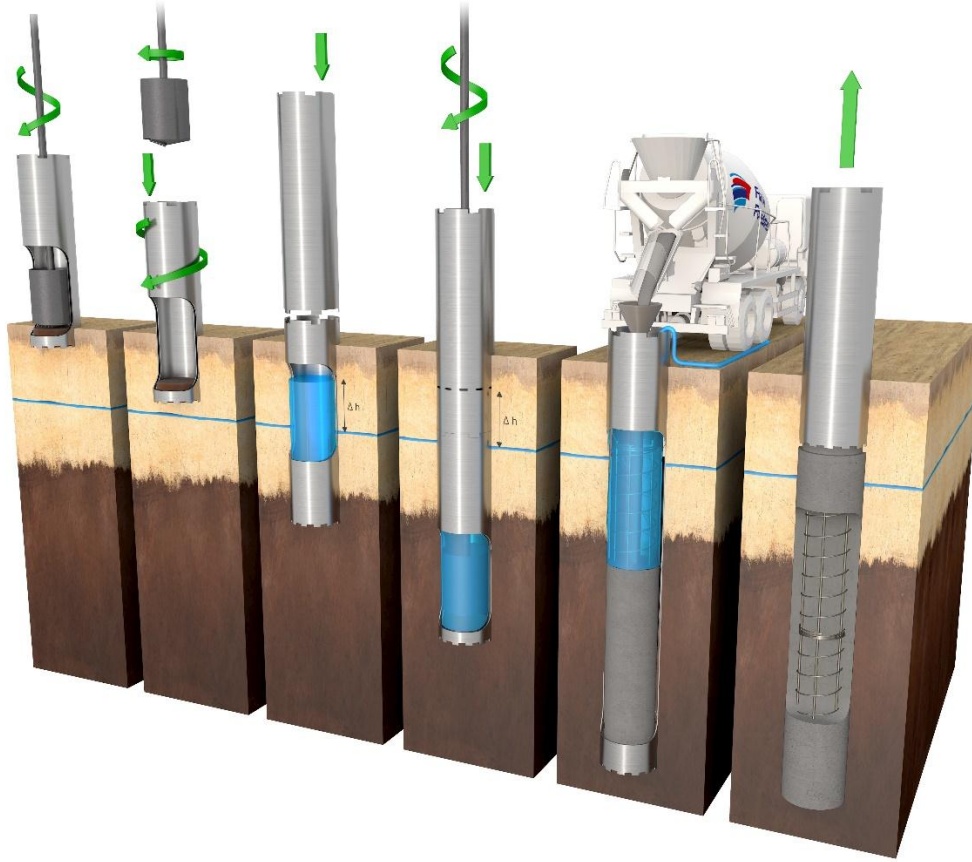
La mise en œuvre.

### **2.6.3. Les inclusions construites in-situ**

De mise en œuvre plus souple que les pieux préfabriqués avec peu de risques de soulèvement du sol adjacent, leur longueur peut s'adapter aux variations des conditions de site. Toutefois, la fabrication in situ rend le risque de défauts locaux voire de malfaçons plus important.

#### **2.6.3.1. Les principaux types d'inclusions construites in-situ**

**2.6.3.1.1. Les pieux forés** : après réalisation d'un forage au diamètre du pieu et mise en place éventuelle d'une cage d'armature, le forage est rempli de béton qui après prise va constituer le pieux. Différentes variantes existent, qui diffèrent principalement par la technique de forage : pieux forés simples lorsque le sol hors d'eau est assez cohérent pour assurer la tenue de l'excavation, pieux forés à la boue ou tubés pour assurer la stabilité du forage, pieux forés à la tarière creuse avec injection de béton à la base de la tarière lors de sa remontée puis insertion éventuelle de la cage d'armature dans le béton frais.



**Figure 2.9.** Pieux forés grand diamètre.

**2.6.3.1.2. Les pieux battus tubés :** un tube bouchonné est battu à la cote voulue, le ferrailage et le bétonnage gravitaire étant réalisés à l'abri du tube qui est ensuite extrait du sol.

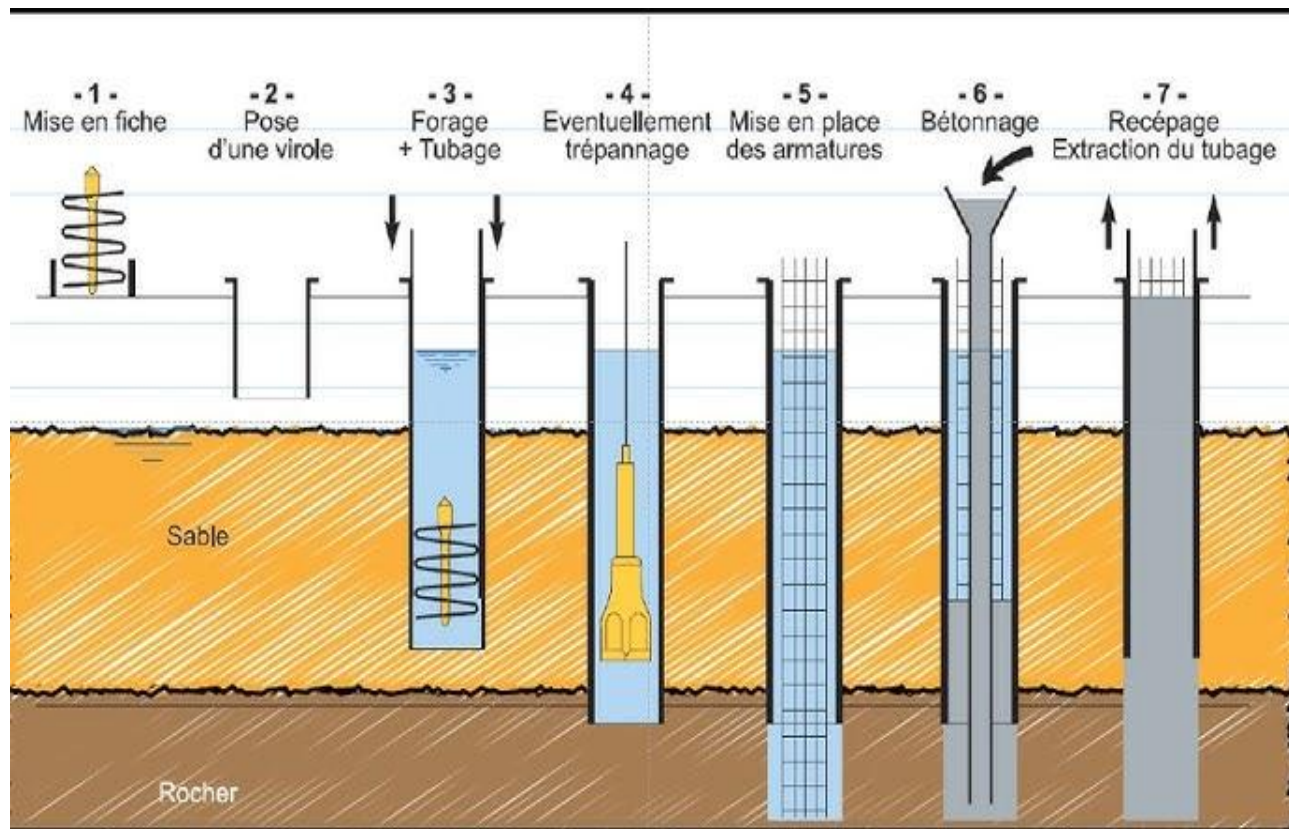
**2.6.3.1.3. Les pieux de type « Vibro Concrete Column » :** le forage est réalisé à l'aide d'une aiguille vibrante. On injecte ensuite le béton à la base de l'aiguille en la remontant. Cette technique faite par refoulement du sol ne génère pas de déblais et permet dans certaines conditions (sols granulaires) d'améliorer simultanément les propriétés du sol encaissant lors de la fabrication des colonnes.

**2.6.3.1.4. Les colonnes à module contrôlé :** le forage est réalisé à l'aide d'une vis refoulant vissée dans le sol jusqu'à la profondeur désirée puis lentement remontée sans déblais. Un mortier fluide est libéré au cours de la remontée dans la cavité de sol par l'âme de la vis, de façon à constituer une colonne de 40 à 50 cm de diamètre. Selon les formulations, le module de déformation à long terme

de ces inclusions semi-rigides et cimentées varie de 500 à 10000 MPa, entre celui des pieux et celui des colonnes ballastées.

**2.6.3.1.5. Les inclusions par mélange d'un liant avec le sol :** diverses techniques ont été développées pour réaliser des colonnes où le sol en place est mélangé avec un liant, constituant ainsi des inclusions nettement plus rigides que le sol en place. Le module d'élasticité et la résistance à la compression simple sont typiquement 5 à 10 fois inférieurs à ceux du béton. Diverses variantes ont été développées, couvrant la plupart des terrains et parmi les plus connues on peut citer

- le Jet Grouting,
- le Soil Mixing,
- le Deep Cement Mixing (DCM),
- le Deep Soil Mixing (DSM),
- les Lime Columns (LC) et Lime Cement Columns (LCC)



**Figure 2.10.** Principe de réalisation d'un pieu foré en béton armé.

### **2.6.3.2. Principaux avantages et désavantages des pieux construits in situ**

#### **a-Les avantages**

- Possibilité de varier la longueur des pieux pour s'adapter aux conditions spécifiques du sol.
- Capacité à insérer des pieux de gros diamètres.
- Installation sans bruit ni vibrations significatives.
- Absence de risque de soulèvement du sol.
- Possibilité d'obtenir des pieds d'inclusions deux à trois fois plus larges que le diamètre de la colonne, notamment dans les argiles.

#### **b-Les désavantages**

- Risque de striction dans les sols compressibles.
- Installation du béton dans des conditions moins idéales.
- Impossibilité d'élargir le pied de l'inclusion dans un sol sans cohésion.

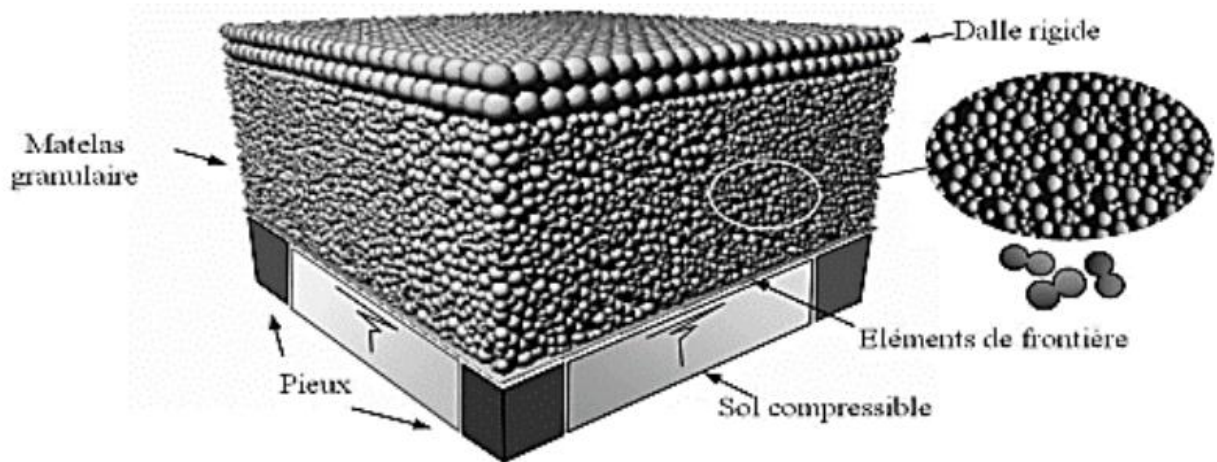
### **2.7. Principe de fonctionnement des sols par inclusions rigides**

Le renforcement des sols par inclusions rigides verticales repose sur la combinaison d'inclusions qui assurent le renforcement et d'une plateforme de transfert de charge positionnée entre le réseau d'inclusions et la structure à fonder. Cette plateforme a pour rôle de répartir la charge entre les inclusions et le sol compressible.

Ce type de fondation se distingue des méthodes de fondation traditionnelles par le fait que la charge s'applique simultanément aux têtes des inclusions et au sol compressible. Le dimensionnement du réseau d'inclusions et de la plateforme de transfert de charge doit être tel que la part de charge transmise aux inclusions soit bien supérieure à celle transmise au sol. Les inclusions ont pour rôle de transférer la charge due au poids de la structure et aux charges d'exploitation vers le substratum, afin de réduire voire d'éliminer les tassements. Pour cela, les inclusions sont posées sur une couche rigide ou légèrement ancrées dans celle-ci. Il est également possible de coiffer les inclusions d'une tête plus large afin d'augmenter la surface de contact avec le sol, améliorant ainsi la répartition des charges.

Dans le renforcement des sols par inclusions rigides, la charge est appliquée directement sur la tête des inclusions, mais également par l'effet d'accrochage du sol environnant lorsque celui-ci se tasse sous le poids de la structure. La plateforme de transfert de charge joue un rôle crucial dans la répartition de la charge. Cette plateforme peut être constituée de matériaux granulaires traités ou non traités (Figure 2.12). Elle peut être renforcée par une ou plusieurs nappes géo synthétiques. La hauteur et les caractéristiques mécaniques de la plateforme sont des paramètres importants pour assurer le bon transfert de charge.

Ce qui distingue cette technique des fondations mixtes est l'interposition de la plateforme granulaire entre la structure et les inclusions. Dans les fondations mixtes, la structure repose directement sur les pieux ou autres inclusions sans l'intermédiaire d'une plateforme. En limitant la charge transmise au sol compressible, la plateforme permet de réduire à la fois les tassements absolus et différentiels. Elle joue un rôle mécanique essentiel en assurant l'interface entre la charge et les inclusions. L'efficacité de la plateforme peut être améliorée par des traitements spécifiques ou l'utilisation de nappes géo synthétiques horizontales.



**Figure 2.11.** Schéma de principe d'un renforcement par Inclusions Rigides en 3D.

Il est essentiel de souligner que la réduction des tassements différentiels sous la structure, tout en évitant l'utilisation d'un élément de structure rigide et coûteux, est assurée par la combinaison des

inclusions et de la plateforme granulaire. La désolidarisation entre les inclusions permet de simplifier les connexions et peut également offrir une solution efficace face aux sollicitations sismiques.

La charge est appliquée à la surface de la plateforme de transfert, qui doit favoriser le développement de voûtes prenant appui sur les inclusions et transférant une part significative des charges vers les têtes des inclusions. Pour que cet effet de voûte se développe, la plateforme granulaire doit avoir une résistance au cisaillement adéquate et une épaisseur suffisante pour permettre la formation de la voûte. De plus, les inclusions peuvent être coiffées d'une tête plus large, appelée dalle, afin d'augmenter la couverture et optimiser l'efficacité du dispositif.

Par ailleurs, les contraintes résiduelles exercées sur la couche compressible entraînent son tassement, ce qui génère un frottement négatif sur les inclusions rigides. Cela permet un transfert supplémentaire de charge provenant de la structure vers les inclusions.

En résumé, la combinaison des inclusions rigides et de la plateforme granulaire permet de réduire les tassements différentiels sans recourir à un élément de structure rigide. La charge est répartie sur la plateforme, favorisant la formation de voûtes qui transfèrent une part importante des charges vers les têtes des inclusions. De plus, les inclusions peuvent être coiffées d'une tête plus large pour améliorer l'efficacité du dispositif. Les contraintes résiduelles sur la couche compressible contribuent également au transfert de charge vers les inclusions.

## **2.8. La plate-forme de transfert**

La plate-forme de transfert assure la transition entre les inclusions rigides et les charges appliquées au sol. Elle doit permettre de passer graduellement d'une charge répartie à un chargement concentré au droit des inclusions rigides : réduisant les tassements différentiels entre les points situés au droit des inclusions et ceux situés entre les inclusions, il diminue les sollicitations des ouvrages ainsi fondés

### **2.8.1. Matériaux constituant la plate-forme de transfert**

En raison de son importance dans le système de renforcement par inclusions rigides, la plateforme de transfert de charge est couramment constituée par un matériau noble (grave, ballast).

L'utilisation de tels matériaux pouvant entraîner un surcoût élevé, on utilise parfois des matériaux traités (par exemple à la chaux ou au ciment).

Les mécanismes de transfert de charge couramment admis sont la création de voûtes ou l'effet silo tel qu'il a été décrit notamment par Terzaghi (1943). Dans ces conditions, les caractéristiques importantes sont le comportement au cisaillement et le module de déformation du matériau constitutif. A priori, un module de déformation et un angle de frottement élevés, une forte dilatance sous cisaillement sont des caractéristiques favorables au développement de voûtes ou d'un effet silo. A défaut de caractéristiques suffisantes, le matériau peut être traité.

Toutefois, les connaissances concernant le développement de ces reports de charge en fonction de la nature et des propriétés du sol constitutif de la plate-forme granulaire méritent encore d'être largement approfondies.

Dans la bibliographie concernant les ouvrages renforcés par inclusions rigides, on ne trouve généralement pas de données caractérisant la plate-forme. D'après Glandy et Frossard (2002), la couche de répartition doit être mise en œuvre suivant les critères routiers, qu'elle soit constituée de matériaux frottants (sables ou graves) et/ou renforcée de liants (ciments, chaux...) ou de nappes géo synthétiques.

Cette couche pourra être caractérisée par des essais in situ de type routiers ou des essais géotechniques plus classiques (pressiomètre ou pénétromètre), et des essais de laboratoire : caractéristiques physiques, indice CBR, essais à la plaque, mesure de la cohésion et de l'angle de frottement interne.

En fait, la caractérisation mécanique approfondie de ces matériaux est difficile du fait de leur granulométrie ; elle a fait l'objet d'expérimentations pour d'autres applications telles que les voies ferrées ou les chaussées souples. Il s'agit là cependant d'un domaine qui reste largement à explorer, nombre de références concernant encore davantage le développement d'appareillages d'essais et de modes opératoires que la caractérisation elle-même. Parmi ces expérimentations, on peut citer celle de Indraratna et al. (1998) sur des ballasts de voies ferrées ainsi que l'étude entreprise par le LCPC pour caractériser les graves non traitées au triaxial à chargements répétés (Paute et al., 1994). Les résultats obtenus méritent sans doute d'être examinés en vue d'une meilleure compréhension du comportement de la plate-forme granulaire dans le domaine du renforcement par inclusions rigides.

### 2.8.2. Renforcements horizontaux

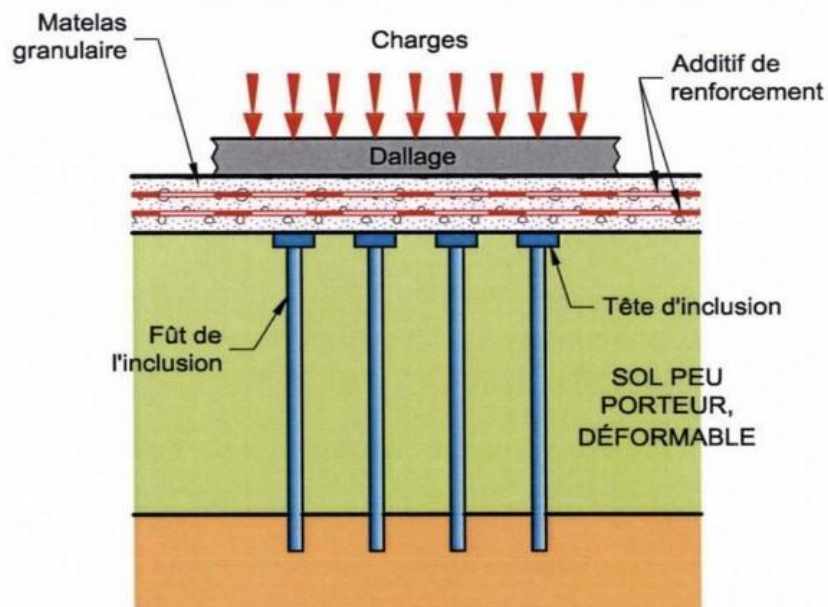
Bien que peu courant en France, le renforcement de la plate-forme de transfert par des nappes géo synthétiques horizontales est assez répandu dans nombre d'autres pays : les seules normes ou recommandations existantes dans le domaine (norme anglaise BS 8006, 1995 ; recommandations allemandes EBGEO, 2004) préconisent son utilisation.

Selon leur disposition dans la plate-forme granulaire, ces nappes peuvent avoir des rôles différents

- Lorsque la géo synthétique est mise en œuvre directement sur les têtes d'inclusion il assure, par effet membrane, le transfert de toute ou d'une partie de la charge qui serait appliquée sur le sol compressible (Figure 2.9) vers les têtes d'inclusions.

- Lorsqu'une ou plusieurs nappes mis en œuvre au sein de la plate-forme granulaire

, à l'effet membrane se rajoute alors un effet d'armature rigidifiant la plateforme Cette augmentation de raideur a été mesurée par Seiler (1995), pour les voies de chemin de fer : pour une même épaisseur de ballast, l'apport d'une géo grille double le module EV2 déterminé à la plaque et une couche de ballast renforcée de 400 mm d'épaisseur a la même raideur qu'une couche de ballast non renforcée de 600 mm d'épaisseur.



**Figure 2.12.** Différentes dispositions du renforcement horizontal dans la plate-forme de transfert de charge.

En plus de son rôle dans le renforcement, les géo synthétiques empêchent également par frottement l'extension latérale du remblai, ce qui favorise également la création ou la pérennité de l'effet voûte.

## **2.9. Conclusion**

En somme, les inclusions rigides constituent une approche novatrice et efficace pour le renforcement des sols, jouant un rôle fondamental dans la résolution des problématiques géotechniques contemporaines. Leur capacité à améliorer les caractéristiques mécaniques des terrains, tout en intégrant un réseau d'éléments verticaux, permet de répondre aux exigences croissantes en matière de sécurité et de performance des infrastructures. En effet, ces éléments cylindriques, réalisés à partir de matériaux à base de liant hydraulique, offrent une solution robuste face aux défis posés par des conditions de sol défavorables, notamment dans le cadre de projets d'envergure tels que la construction de bâtiments de grande hauteur, d'infrastructures routières et ferroviaires, ou encore dans des zones sensibles aux risques sismiques.

L'intégration d'un matelas de répartition constitue un élément clé de cette méthode, facilitant une dissipation homogène des charges appliquées et minimisant ainsi les risques de tassements différentiels. Ce dispositif permet non seulement d'optimiser la répartition des contraintes sur les inclusions, mais également de mobiliser efficacement le sol de fondation dans le soutien des charges, renforçant ainsi la stabilité globale du système.

De plus, les mécanismes de charge inhérents au fonctionnement des inclusions rigides, tels que le frottement négatif et positif, illustrent la complexité et l'efficacité de cette technique. Ces interactions, qui se nouent entre les inclusions et le sol environnant, témoignent d'une ingénierie de précision, visant à tirer parti des propriétés mécaniques du sol pour assurer une meilleure performance des infrastructures.

Les avantages des inclusions rigides ne se limitent pas à leurs performances mécaniques. Leur installation génère un impact environnemental réduit par rapport aux méthodes traditionnelles de renforcement, notamment en diminuant la quantité de matériaux de remblai nécessaires. Par ailleurs, l'essor des technologies modernes et des méthodes de modélisation numérique ouvre de nouvelles perspectives d'application, permettant d'envisager des solutions adaptées à des contextes géotechniques de plus en plus complexes, y compris la réhabilitation de sites contaminés et la consolidation de terrains instables.

Ainsi, les inclusions rigides se positionnent comme un élément clé dans la conception contemporaine des fondations, répondant aux défis variés et croissants de l'ingénierie civile. En garantissant une durabilité accrue et une sécurité optimale des infrastructures, elles incarnent une avancée significative vers des pratiques d'ingénierie plus résilientes et adaptées aux enjeux environnementaux et sociétaux actuels. Au regard de ces considérations, il est évident que les inclusions rigides continueront à jouer un rôle prépondérant dans les projets futurs, marquant une étape essentielle dans l'évolution des techniques de renforcement des sols.

## **CHAPITRE 03**

# **Les Fondations superficielles et les tassements**

## Chapitre 03

# Les fondations superficielles et les tassements

### 3.1. Introduction

Du point de vue du génie civil, une structure n'est jamais isolée. Elle est le plus souvent en interactions multiples avec le sol d'assise, ainsi qu'avec les constructions avoisinantes.

Le degré d'importance des répercussions réciproques des comportements d'ouvrages appartenant à des domaines connexes est étroitement lié à leurs caractéristiques mécaniques et géométriques. Les réflexions sur les aléas, provenant du milieu extérieur, susceptibles d'affecter l'aptitude d'une structure à remplir ses fonctions par rapport à l'exploitation, à la sécurité et à l'environnement, ont amené les concepteurs à intégrer attentivement cette notion d'interaction lors de la phase de dimensionnement.

Les fondations représentent la partie inférieure d'un bâtiment, jouant un rôle essentiel dans son infrastructure. Leur fonction principale est de soutenir et d'ancrer la superstructure tout en transmettant les charges de manière sécurisée au sol. Étant cruciales pour la répartition et la dissipation des charges, les fondations doivent être adaptées à la forme et à la configuration de la structure, tout en tenant compte des caractéristiques variées du sol, des roches et des eaux souterraines.

La nature du sol ou de la roche détermine le type de fondation à utiliser : superficielles, semi-profondes ou profondes. Lorsque le sol résistant se trouve à faible profondeur et est facilement accessible (comme dans le cas d'une nappe phréatique absente ou rabattue), on peut établir les fondations directement sur le sol proche de la surface. Cela implique souvent un élargissement de la base des murs ou des piliers. De nombreuses constructions anciennes reposent sur des massifs avec empattement, correspondant aux fondations superficielles.

Lorsque le sol de surface ne possède pas une résistance suffisante pour supporter la structure à travers une fondation superficielle, des fondations profondes doivent être mises en œuvre. Ce type de fondation, qui inclut des techniques comme les puits, pieux forés ou battus, micropieux et parois moulées porteuses, permet de transférer les charges vers des couches de sol situées à des profondeurs allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres.

Les tassements, quant à eux, sont des déformations verticales du sol qui se produisent lorsque des charges sont appliquées sur une fondation. Ils peuvent être immédiats, résultant de la compression du sol lors de l'application de la charge, ou différés, liés aux processus de consolidation qui se produisent avec le temps. Ces tassements peuvent avoir des conséquences significatives sur la stabilité et l'intégrité des structures, entraînant des fissures, des désalignements et, dans les cas extrêmes, des défaillances structurelles. Par conséquent, une compréhension approfondie des mécanismes de tassement est essentielle pour concevoir des fondations efficaces qui garantissent la durabilité et la sécurité des constructions.

### **3.2. Rôle d'une fondation**

Un ouvrage quelle que soient sa forme et sa destination, prend toujours appui sur un sol d'assise. Les éléments qui jouent le rôle d'interface entre l'ouvrage et le sol s'appellent fondations. Ainsi, Quel que soit le matériau utilisé, sous chaque porteur vertical, mur, voile ou poteau, il existe une fondation.

#### **3.2.1. Rôle principal**

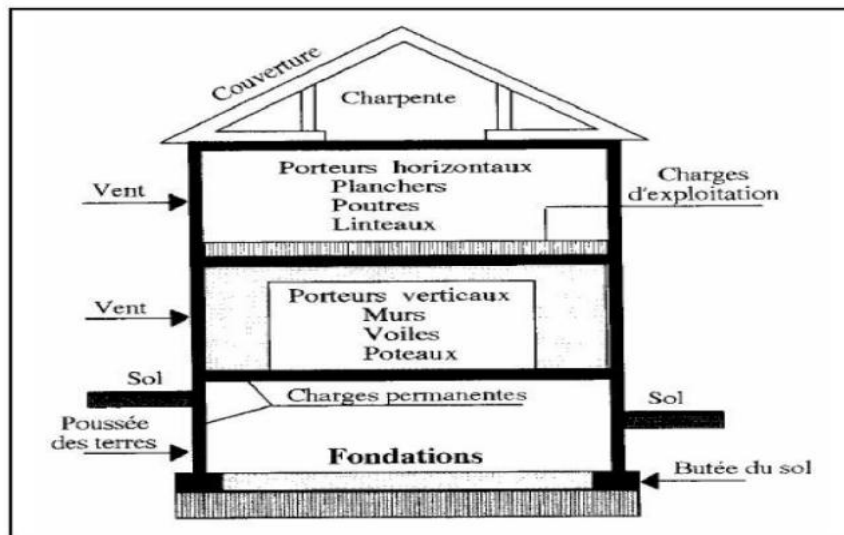
La structure porteuse d'un ouvrage supporte différentes charges telles que

##### **3.2.1.1. Charges verticales**

- comme les charges permanentes telles que le poids des éléments porteurs, le poids des éléments non porteurs,
- comme les charges variables telles que le poids des meubles, le poids des personnes..., le poids de la neige,

##### **3.2.1.2. Charge horizontale**

- comme des charges permanentes telles que la poussée des terres,
- comme les charges variables telles que la poussée de l'eau ou du vent.



**Figure 3.1.** La structure porteuse transmet toutes ces charges au sol par l'intermédiaire des fondations.

### 3.2.2. Rôles secondaires

Outre le rôle principale les fondations doit aussi

- La fondation doit résister elle-même aux charges et doit être calculée en conséquence.
- L'ensemble ouvrage – fondation - sol doit être en équilibre stable. Il ne doit pas y avoir possibilité de mouvement.
- pas de glissement horizontal : L'adhérence sol – fondation doit empêcher les forces horizontales (poussées du vent, des terres...) de pousser l'ouvrage horizontalement.
- pas de basculement : Les charges horizontales ont tendance à faire basculer l'ouvrage car elles créent un moment. Les forces verticales (poids) doivent les contrebalancer.
- pas de déplacement vertical : Le sol doit être suffisamment résistant pour éviter l'enfoncement du bâtiment de manière uniforme ou dissymétrique (tassements différentiels entre deux parties solidaires de l'ouvrage) et le bâtiment doit être suffisamment lourd pour éviter les soulèvements dus à l'action de l'eau contenue dans le sol (poussée d'Archimède).
- Une fondation doit être durable. Toutes les précautions devront être prises dans les dispositions constructives, le choix et l'emplacement des matériaux, ainsi que dans la mise en œuvre.

- Une fondation doit être économique. Le type de fondation, les matériaux employés et la mise en œuvre doivent être le moins coûteux possible.

### 3.3. Choix du type de Fondation

Le choix du type de fondation la plus appropriée est dicté par certains facteurs tels que

- La nature de la structure ;
- Les charges appliquées par la structure ;
- Les caractéristiques du sol sous la fondation ;
- Les coûts des fondations.

Cependant, afin de décider du type de fondation à utiliser, on doit d'abord explorer les Couches du sol concernées, évaluer minutieusement les caractéristiques du sol sous la construction, puis évaluer par la suite la charge admissible que peut supporter le terrain. C'est à ce moment-là qu'on peut se prononcer sur le choix du type de fondation ; Superficielle ou profonde.

### 3.4. Définition des fondations superficielles

Les fondations superficielles sont des fondations faiblement encastrées (figure 3.2) qui reportent les charges au niveau des couches superficielles de terrains. Les fondations profondes reportent les charges dans les couches profondes, mais aussi dans, les couches superficielles, qu'elles traversent.

Pour différencier ces deux types de fondations on est amené à définir la notion de profondeur critique qui est la profondeur au-dessous de laquelle la résistance sous la base de la fondation n'augmente plus. Les fondations des ouvrages d'art ou des bâtiments sont classées en différentes catégories selon leur forme et notamment le rapport  $D/B$  :

- Fondation superficielle :  $D/B \leq 4$  à  $5$
- Fondation profonde :  $D/B \geq 10$
- Fondation semi-profonde :  $4 \leq D/B \leq 10$

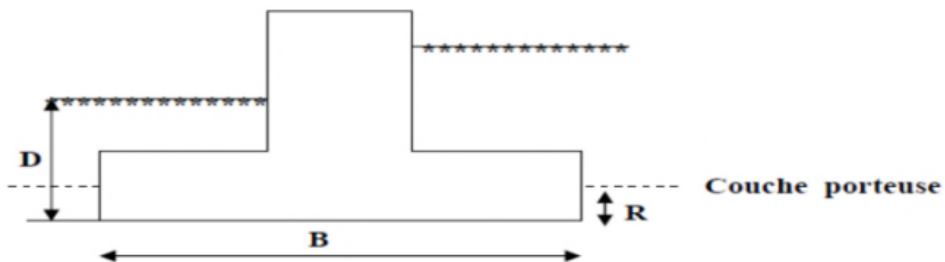


Figure 3.2. Caractéristique géométrique d'une fondation superficielle.

### 3.5. Types de fondations superficielles

On distingue (figure 3.3)

- les semelles filantes, de longueur L importante devant la largeur B ( $L/B > 5$ ) ;
- les semelles isolées, dont les dimensions en plan B et L sont toutes deux modestes ; entre autres les semelles carrées ( $L/B = 1$ ) et les semelles circulaires (de diamètre B) ;
- les radiers ou dallages, de dimensions B et L importantes.

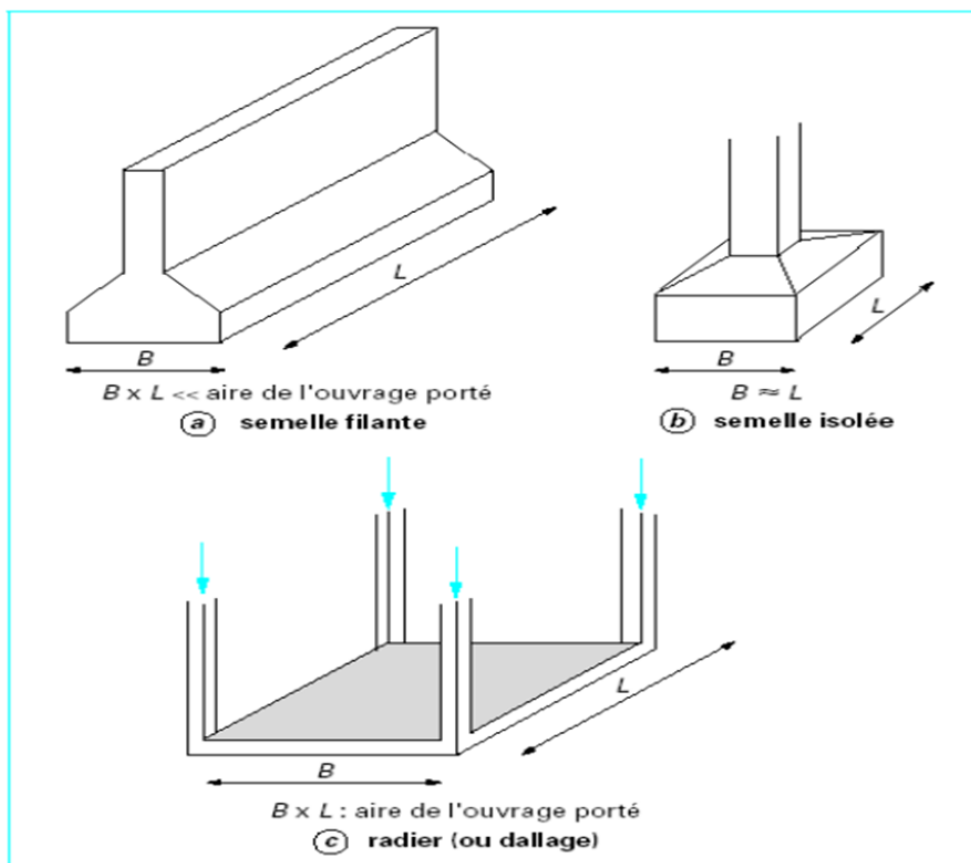


Figure 3.3. Types de fondations superficielles.

### 3.6. Schématisation et description

#### 3.6.1. Les fondations filantes

Les fondations filantes sont généralement de largeur  $B$  modeste (au plus quelques mètres) et de grande longueur  $L$  ( $L/B > 10$  pour fixer les idées).

Lorsque la descente de charges n'est plus concentrée, on met logiquement en œuvre une fondation de type filante, c'est à dire continue sous l'objet fondé.

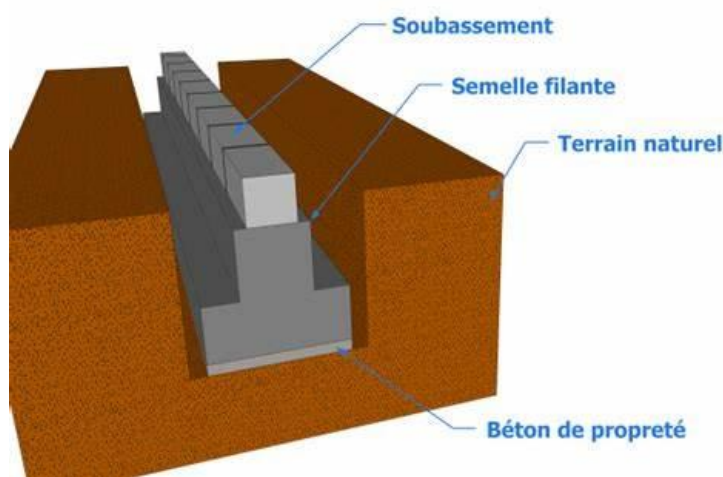
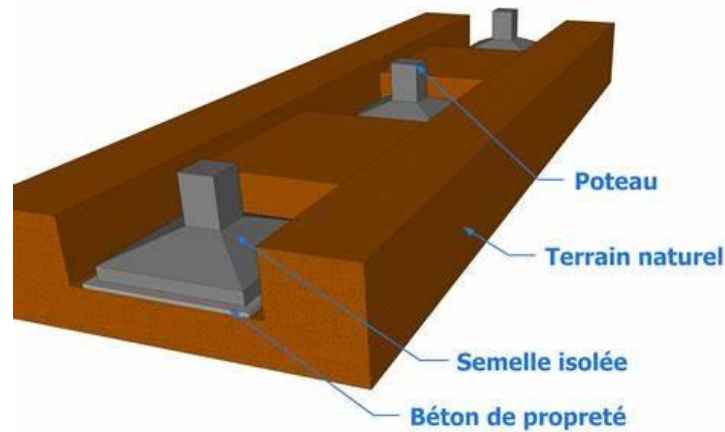


Figure 3.4. Fondation filante.

#### 3.6.2. Les fondations isolées

Les fondations isolées présentant une géométrie proche du carré (ou du rond), les dimensions en plan  $B$  et  $L$  sont toutes deux au plus de quelques mètres ; cette catégorie inclut les semelles carrées ( $B/L = 1$ ) et les semelles circulaires de diamètre  $B$ .

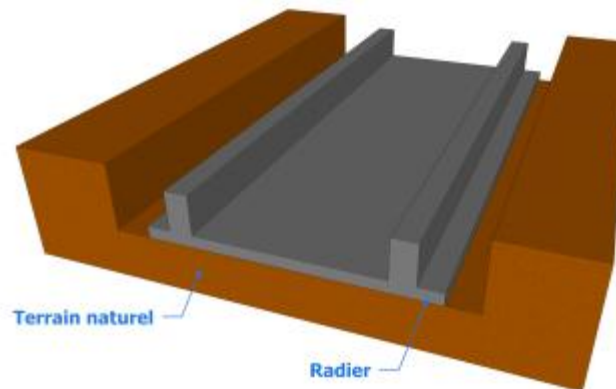
Ce type de fondation est mis en œuvre dans le cadre d'un bâtiment présentant des descentes de charges concentrées (poteaux, longrines sous murs).



**Figure 3.5.** Fondation isolée.

### 3.6.3. Les fondations radiers (les dalles)

Les radiers ou les dalles ont des dimensions B et L importantes ; cette catégorie inclut les radiers généraux



**Figure 3.6.** Fondation radier.

#### 3.6.3.1. Les différents types de radier

##### A- Radier champignon

Dans le cas d'une construction ossature on peut traiter le radier selon le principe des planchers champignons ; il ne comporte pas de nervure, ce qui permet d'avoir une surface plate et dégagée pour de grandes portées.

##### B-Radier voute

Les voûtes permettent d'augmenter les portées (distance entre les éléments porteurs) sans augmenter sensiblement l'épaisseur du radier.

C-Radier plat d'épaisseur constante

Convient aux charges assez faibles et aux constructions de petite emprise.

D- Radier nervurer

Lorsque les charges sont importantes, pour que l'épaisseur du radier ne devienne pas excessive, on dispose des travures de poutres (nervures) pour rigidifier la dalle ; elles peuvent être disposées dans un seul sens ou dans deux ; cela dépend de la portée, de la disposition des murs ou des poteaux.

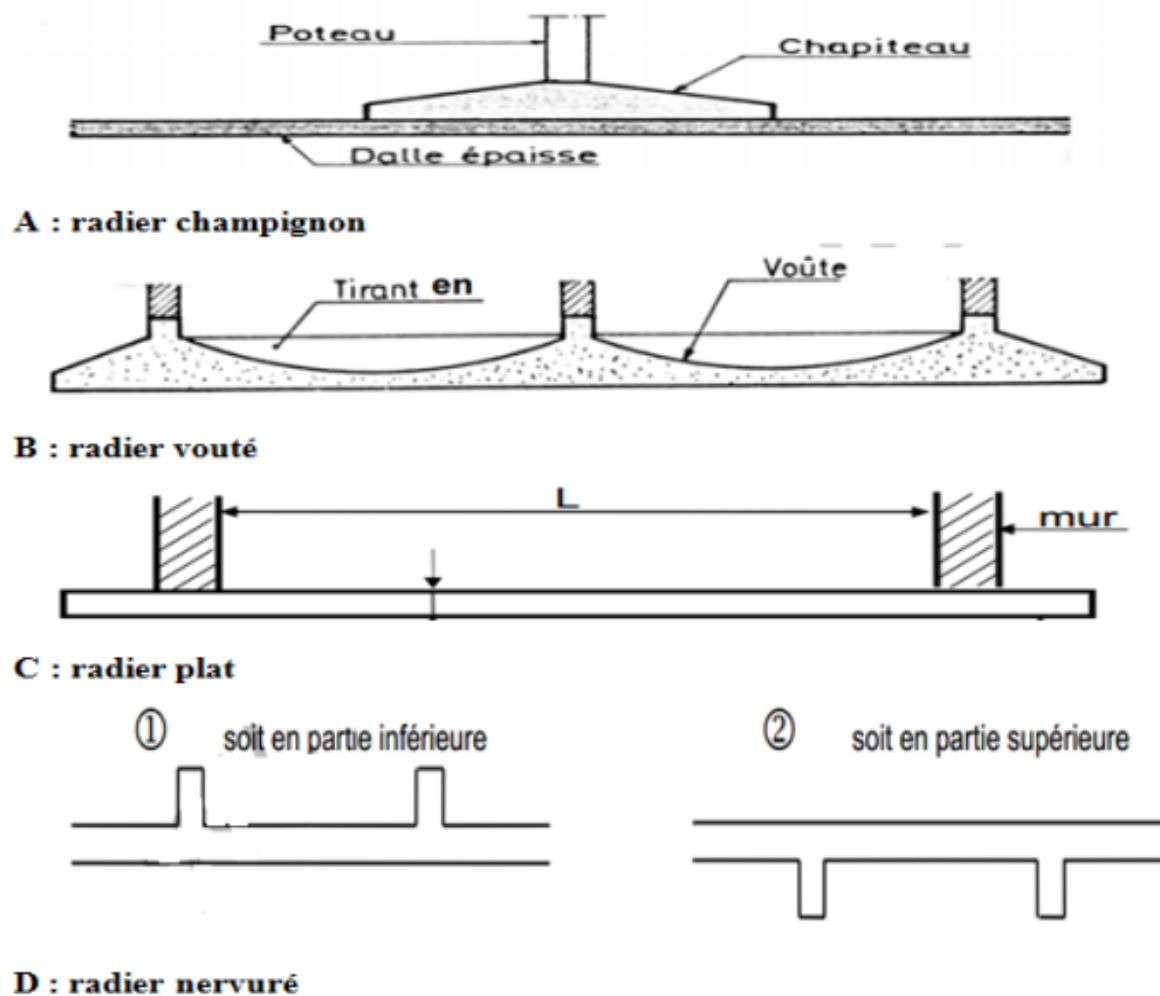


Figure 3.7. Les différents types de radier.

### 3.7. Phénomène interne de poinçonnement

Les études théoriques relatives à l'état d'équilibre plastique sous les semelles filantes conduisent aux conclusions générales suivantes

Lorsque l'on exerce un effort verticale poussé jusqu'à la rupture sur une semelle horizontale ancrée à faible profondeur dans un matériaux meuble, des surfaces de cisaillement apparaissent dans l'assise ; l'ensemble des observations ayant trait à la rupture des fondations superficielles conduisent à penser qu'il existe, à ce moment-là, un coin de sol qui reste lié à la fondation dont la pointe est tournée vers le bas et qui refoule le sol de part et d'autre de la fondation c'est le cas des sols relativement résistants; de la pointe partent des surfaces de rupture courbes inclinées d'abord vers le bas et qui se redressent ensuite vers le haut pour atteindre la surfaces libre. Lorsque l'enfoncement continue, on observe en surface autour de la semelle un gonflement du sol qui a été refoulé. Quand le sol est très compressible un tassement relativement important est nécessaire pour que le refoulement apparaisse. D'une façon générale, le phénomène est d'autant plus net que l'assise est moins déformable.

Pour les sols cohérents, l'application du chargement est accompagnée d'une augmentation de la pression interstitielle. Mais comme la vitesse de chargement est souvent supérieure à la vitesse nécessaire pour la dissipation de ces surpressions, il est raisonnable de supposer que l'enfoncement s'effectue à volume constant (en conditions non drainées).

Pour les sols pulvérulents, l'application du chargement entraîne une" variation de volume due à la réorganisation des grains (dés enchevêtrement ou compaction des grains selon les niveaux de contrainte atteints).

La charge de rupture (ou capacité portante) peut être estimée par des calculs relativement simples en supposant connus les paramètres de résistance des sols au voisinage de la fondation. Cependant, de très nombreux facteurs peuvent affecter cette valeur comme : Des phénomènes se produisant au cours de la construction (soulèvement du fond de fouille après une excavation, gonflement ou ramollissement des argiles, effets du gel, etc.), Des interactions avec d'autres constructions à proximité (battage de pieux, vibrations, excavation de tranchée, creusement de galeries, rabattement de la nappe phréatique, etc.)

### 3.8 Les Tassements

#### 3.8.1 Définition

Le tassement d'une structure est le résultat de la déformation du sol de fondation. L'origine de cette déformation peut être un ou plusieurs suivants

- La déformation sous une charge totale croissante est appelée "mouvement" ou "déplacement". Le changement de volume associé à la diminution du volume d'air, provenant d'un effet dynamique ou d'un chargement statique, est appelé "compactage".
- Les changements de volume progressifs associés à une réduction de la teneur en eau du sol est appelé "consolidation".
- La déformation sous contrainte effective constante est appelée "fluage".

#### 3.8.2. Composantes du tassement

-Pour les sols argileux, le tassement total,  $s_t$  est défini par :

$$s_t = s_i + s_c + s_s$$

Où

$s_i$  = tassement immédiat (déformation élastique des fondations structurales, fûts de pieu par exemple) ;

$s_c$  = tassement de consolidation (variation de teneur en eau) ;

$s_s$  = tassement secondaire (fluage).

-Pour les sables, le tassement total,  $s_t$  :

$$s_t = s_i + s_s$$

Où

Le tassement immédiat,  $s_i$ , comprend le tassement élastique,  $s_e$ , et le tassement de consolidation (appelé plutôt "compression").

### 3.9. Tassement des sols saturés

La consolidation : Analogie mécanique : En milieu sec (sable sec, roches, ...) la déformation est quasi instantanée. Par contre, dans un milieu parfaitement saturé (sol fin ou sol grenu), au début c'est l'eau qui prend tout l'effort.

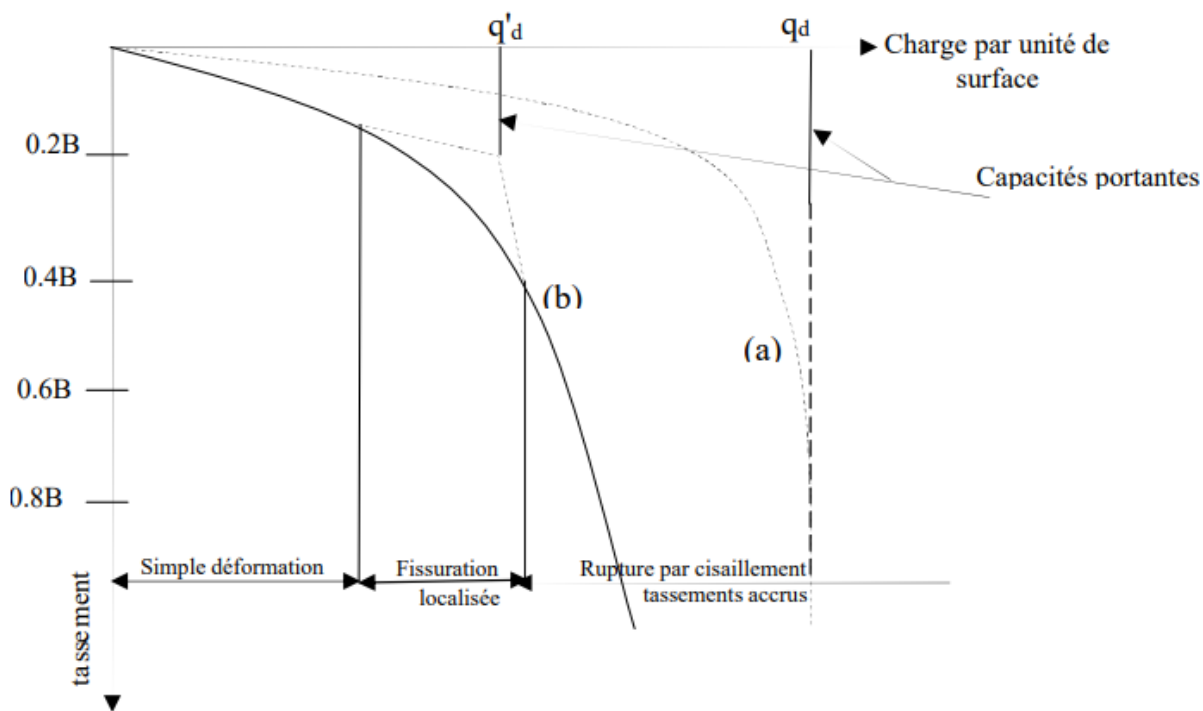
Celle-ci se met alors en mouvement conformément à la loi de DARCY ( $V = k.i$ ) et s'écoule à une vitesse qui est fonction de la perméabilité du milieu.

Au bout d'un certain temps, toutes les charges se transmettent directement de grain à grain, l'eau interstitielle ayant repris, en chaque point, la pression initiale telle qu'elle existait avant la mise en charge du milieu. Progressivement, les grains solides se substituent à l'eau pour la transmission des charges.

### 3.10. Courbes de tassement

Dès qu'une charge est appliquée sur une certaine surface d'un sol, elle provoque un tassement. On peut étudier l'importance du tassement final constaté en fonction de l'intensité de la charge appliquée.

Cette relation peut être représentée par une « courbe de tassement » (Figure 3.8)



**Figure 3.8** Courbe de tassement.

Pour un sol relativement résistant ou compacte (sable dense) la courbe pression tassement [courbe « a »] présente un palier d'écoulement plastique très marqué, le tassement s'accroît sans augmentation de la pression. L'abscisse  $q_d$  de l'asymptote représente sans ambiguïté la pression maximale que le sol supporter avant la rupture, C'est ce que l'on appelle la capacité portante.

On notera que cette pression  $q_d$  est définie par le rapport de la charge qui provoque la rupture à la surface de la fondation, c'est une contrainte moyenne et non une contrainte maximale réelle mesurée sous la fondation. Pour un sol mou ou peu compact (sable lâche), cette courbe [courbe « b »] a tendance à augmenter indéfiniment jusqu'aux très grandes déformations.

Chacune de ces courbes comprend trois phases successives :

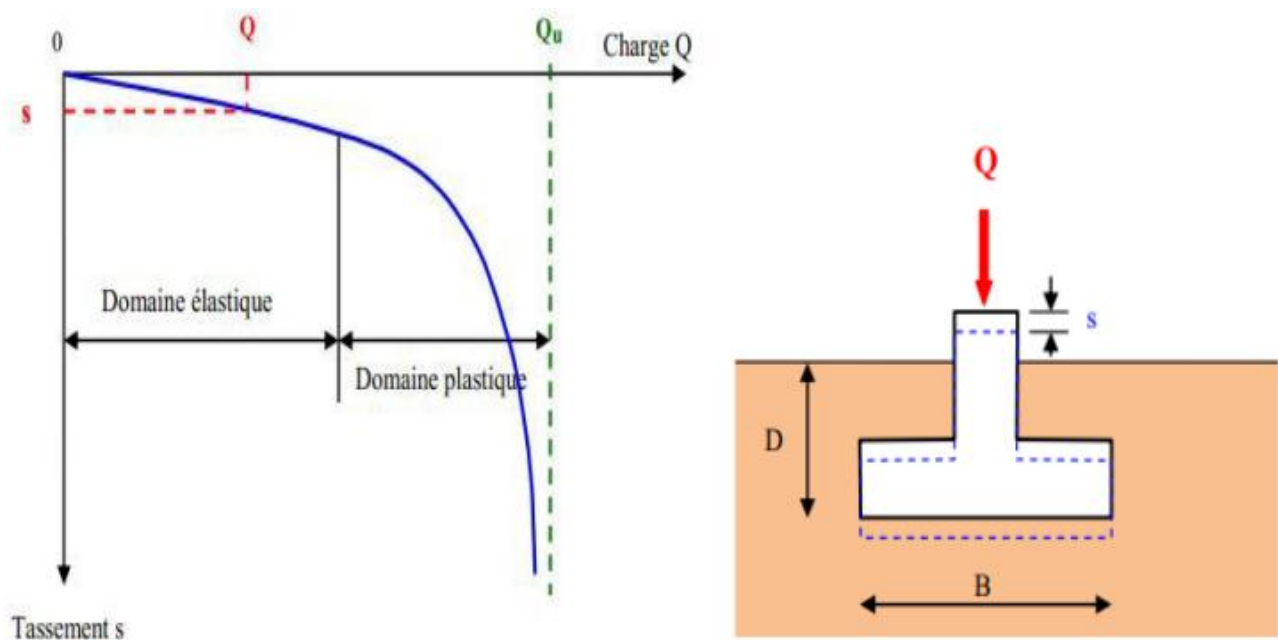
- Une phase quasiment élastique, qui peut se produire au cours de la construction au à la fin de celle-ci au moment de l'application des charges de service.
- Une phase dans laquelle se développe la plastification du sol avec l'augmentation des charges et où se forme une surface de glissement qui s'étend progressivement.

-Une phase plastique ultime, à partir d'une certaine charge  $Q_L$ , il y a une rupture par poinçonnement du sol ou tout de moins un tassement qui n'est plus contrôlé. Le sol n'est pas capable de supporter une charge supérieure ; On peut dire que l'on atteint l'écoulement plastique libre.

### 3.11. Fonctionnement des fondations superficielles

#### 3.11.1. Comportement d'une semelle sous charge verticale centrée

La figure (3.9) présente la courbe chargement-tassement d'une fondation superficielle. On peut remarquer que tant que la charge est raisonnable, les tassements sont élastiques linéaires avec le chargement. La rupture pour une charge  $Q_u$ , appelée charge ultime qui provoque la rupture du sol de fondation dès qu'elle est atteinte.



**Figure 3.9.** Courbe chargement-tassement d'une semelle superficielle.

A, étant la surface d'impact de la semelle, la contrainte de rupture de la semelle est :  $q_u = Q_u/A$ . La contrainte admissible  $q_a$ , est obtenue en divisant la contrainte ultime par un coefficient de sécurité  $F$ ,

$q_a = q_u / F$ , avec généralement  $F = 3$ . Les contraintes ultime et admissible sont par ailleurs à la base de la conception des fondations.

### 3.12. Mécanisme de rupture d'une fondation superficielle

Avant l'application de la charge sur une semelle, le sol est en état d'équilibre élastique. Lorsque la charge augmente au-delà d'une certaine valeur critique, le sol passe progressivement à l'état d'équilibre plastique. Au cours du passage d'un état à l'autre, la répartition des réactions du sol sur la base de la semelle et l'orientation des contraintes principales dans le sol, subissent des variations.

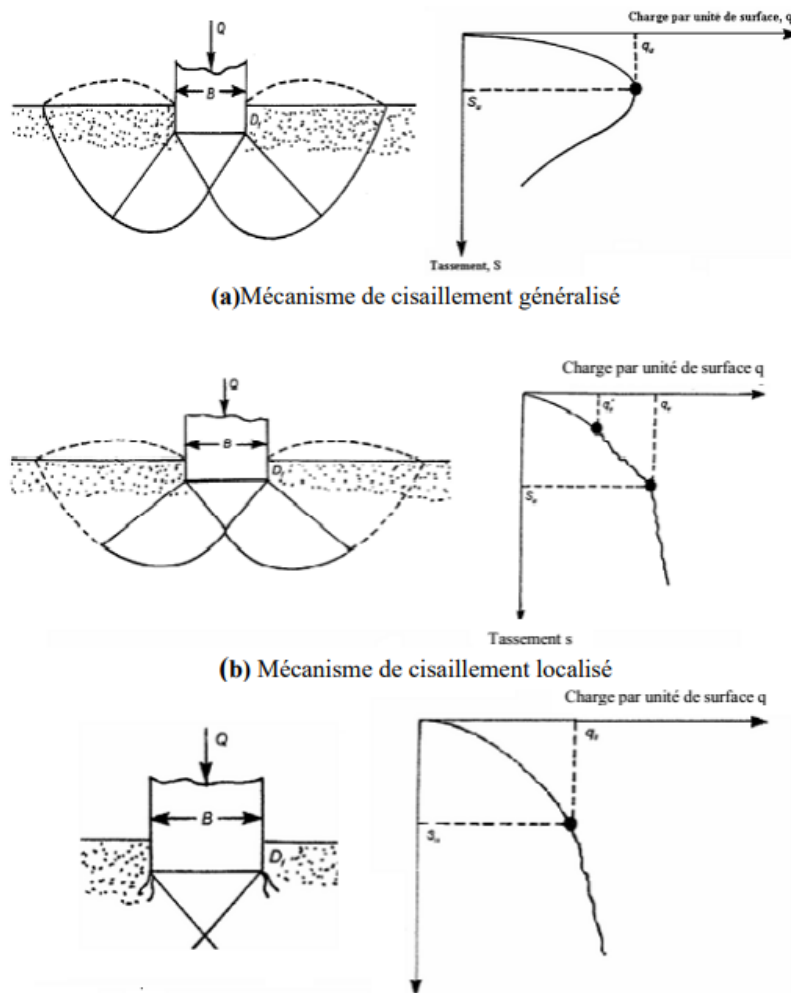
La transition s'opère à partir des bords extérieurs de la fondation et s'étend comme il est indiqué sur la figure (3.9) qui s'applique à une semelle continue (ou filante) reposant sur un massif homogène de sable. Les résultats d'essais sur des semelles rigides montrent qu'il existe trois mécanismes potentiels de rupture mobilisant un volume limité de sol.

-Rupture par cisaillement généralisé : caractérisé par la formation d'un coin sous la base de la fondation, qui refoule le sol latéralement selon des lignes de glissement débouchant à la surface. L'enfoncement de la fondation provoque généralement un soulèvement du sol d'autant plus net que la structure est moins déformable. C'est le cas pour les sols relativement résistants.

-Rupture par cisaillement localisé : qui ne s'étend qu'au voisinage immédiat de la fondation. Il y a également soulèvement du sol, mais après un enfoncement très important. C'est le cas pour les sols très compressibles, comme des sables lâches.

-Rupture par poinçonnement : Pour ce cas, la courbe de chargement-tassement aura une valeur maximale de charge par unité de surface,  $q$ .

La capacité portante ultime ( $q_u$ ) est définie comme le point où le rapport  $\Delta S/\Delta q$  devient le plus grand et à peu près constant. Ce type de rupture dans le sol est appelé rupture par poinçonnement. Dans ce cas, la surface de rupture ne s'étend jamais à la surface du terrain.



**Figure 3.10.** Mécanisme de rupture d'une semelle rigide.

La nature de la rupture dans le sol à la charge ultime est fonction de plusieurs facteurs Tels que la rigidité et la compressibilité relative du sol, la profondeur d'encastrement  $D_f$  par rapport à la largeur de la fondation ( $B$ ), et le rapport de la largeur à la longueur ( $B/L$ ) de la fondation.

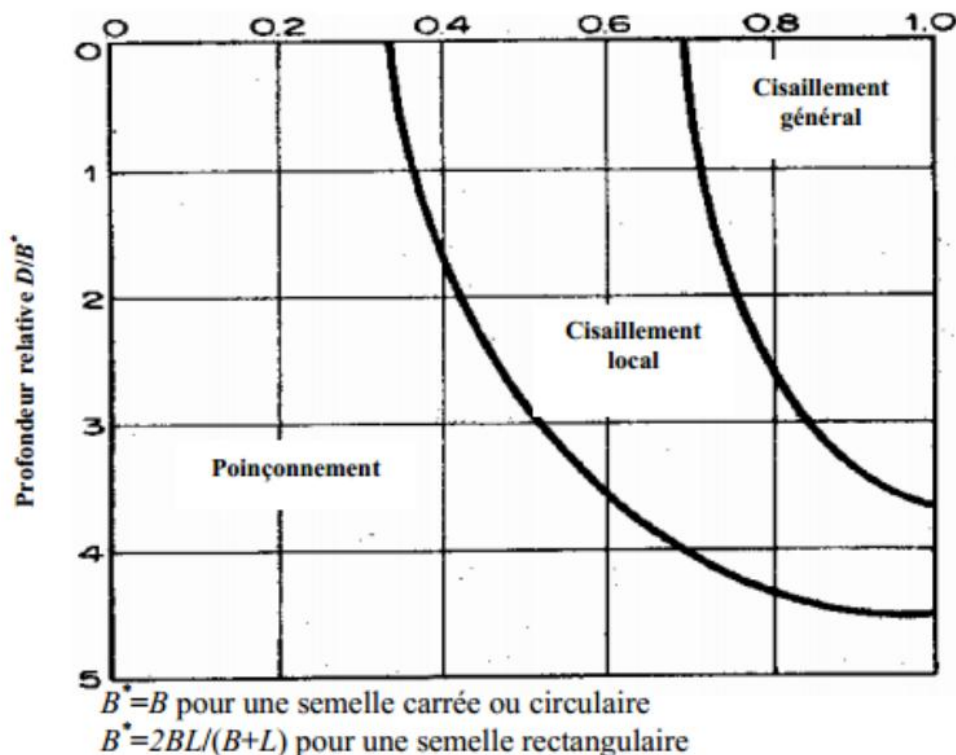
Ceci a été clairement expliqué par Vesic (1973) qui a conduit plusieurs essais réalisés sur modèles réduits au laboratoire dans le cas d'un sable. La conclusion de ces résultats est montrée dans la figure (3.10). Dans cette figure,  $D_r$  est la densité relative du sable, et  $R$  le rayon hydraulique de la fondation qui est défini comme suit :

$$R = A / P$$

Où

$A$  : surface de la fondation =  $B.L$

$P$  : périmètre de la fondation =  $2(B + L)$



**Figure 3.11.** Nature de la rupture d'une fondation dans un sable d'après Vesic (1963).

### 3.13. Capacité portante des fondations superficielles

La capacité portante ultime est l'intensité de la pression à laquelle le sol subit une rupture par cisaillement. La détermination de la capacité portante d'une fondation superficielle, reposant sur une couche de sol de résistance donnée, constitue une des questions les plus anciennes et fondamentales de mécanique du sol.

Un certain nombre de règles de l'art doivent être respectés lorsque l'on construit une fondation superficielle, mais, contrairement aux autres fondations (pieux, caissons, etc.), la méthode précise de construction ou d'installation n'est pas un paramètre qui influe sur sa portance ou son tassement. Le seul paramètre qui influe sur les contraintes d'interaction avec le sol est sa rigidité et, notamment pour le calcul du tassement. On doit distinguer entre fondation souple et fondation rigide.

### **3.14. Conclusion**

L'importance cruciale des fondations dans le domaine du génie civil, en tant qu'éléments déterminants pour la stabilité et la durabilité des structures. À travers une analyse approfondie des différents types de fondations, des méthodes de conception et des innovations récentes, nous avons démontré que le choix approprié des fondations est essentiel pour garantir la sécurité des infrastructures face aux conditions environnementales changeantes et aux charges imposées.

Les études de cas présentées dans cette recherche illustrent les défis rencontrés dans la mise en œuvre de fondations, ainsi que les solutions innovantes qui peuvent être adoptées pour améliorer leur performance. En intégrant des outils numériques et des méthodes de modélisation avancées, nous avons également souligné l'importance de l'optimisation des processus de conception et d'exécution, contribuant ainsi à une approche plus durable et économiquement viable dans le secteur.

Les tassements, qu'ils soient immédiats ou différés, représentent un défi majeur qui peut compromettre l'intégrité des constructions. Une compréhension approfondie des mécanismes de tassement et des facteurs qui les influencent est essentielle pour concevoir des solutions efficaces. Cela implique une analyse rigoureuse des propriétés du sol, une attention particulière aux conditions de chargement et une évaluation des matériaux utilisés pour les couches de matelas.

Ainsi, l'intégration de ces éléments dans le processus de conception permettra non seulement de minimiser les risques de tassement, mais aussi d'optimiser la performance des fondations. À l'avenir, il sera important de continuer à explorer des approches innovantes et durables pour répondre aux défis posés par les conditions géotechniques variées et les exigences des constructions modernes. Ce faisant, nous pourrons garantir des infrastructures sûres, durables et adaptées aux besoins des générations futures.

Enfin, cette partie du mémoire ouvre la voie à de futures recherches sur les fondations, en encourageant l'exploration de matériaux nouveaux et durables.

En somme, les fondations ne sont pas seulement des éléments de support, mais des piliers essentiels qui soutiennent le développement durable de nos infrastructures modernes.

## **Chapitre 04**

# **Logiciel de modélisation Plaxis**

# Chapitre 04

## Logiciel de modélisation Plaxis

### 4.1. Introduction

Depuis environ trois décennies, la méthode des éléments finis (MEF) a connu un essor considérable, devenant un outil incontournable pour la simulation du comportement des massifs de sols et des ouvrages géotechniques. Cette technique numérique permet de modéliser de manière précise et détaillée les interactions complexes entre les structures et leur environnement, ce qui est essentiel dans le domaine du génie civil.

L'intégration des méthodes numériques et des lois de comportement avancées est désormais perçue comme une nécessité dans toute étude géotechnique. En effet, face à la complexité croissante des projets d'infrastructure et aux exigences de sécurité, il est impératif de disposer d'outils fiables pour anticiper les réponses des sols et des structures sous diverses charges et conditions environnementales.

Le développement des méthodes des éléments finis a été particulièrement marqué dans les bureaux d'études et les centres de recherche spécialisés en géotechnique. Ces avancées technologiques ont permis d'améliorer la précision des analyses et de réduire les incertitudes liées à la modélisation.

Aujourd'hui, l'utilisation de la MEF est devenue courante, et elle est intégrée dans le processus de conception de grands projets, qu'il s'agisse de travaux routiers, de fondations de bâtiments, ou d'ouvrages hydrauliques.

Les analyses réalisées par le biais de la MEF permettent non seulement d'évaluer la stabilité des ouvrages en interaction avec leur environnement, mais aussi de contrôler que les valeurs de déplacements et de contraintes demeurent dans des limites admissibles. Cela contribue à garantir la sécurité et la durabilité des infrastructures. De plus, ces analyses jouent un rôle crucial dans le dimensionnement des structures, en fournissant des données essentielles pour optimiser les matériaux et les techniques de construction, tout en minimisant les coûts.

En résumé, la méthode des éléments finis représente un apport majeur à l'ingénierie géotechnique moderne. Son adoption systématique dans les études géotechniques témoigne de son efficacité et de sa capacité à répondre aux défis complexes posés par les projets contemporains.

#### **4.2. Présentation de la méthode des éléments finis**

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

- a. La mécanique des structures : élasticité, résistance des matériaux, dynamique, plasticité, etc.
- b. L'analyse numérique : méthodes d'approximations, résolution des systèmes linéaires, des problèmes aux valeurs propres, ... etc.
- c. L'informatique appliquée : techniques de développement et de maintenance des grands logiciels. La méthode des éléments finis est donc une méthode mathématique qui permet la résolution d'équations différentielles.

Elle a été développée dans les années 60 et permet de décrire le comportement global d'une structure complexe à partir de fonctions simples et paramétrées définies pour chaque zone du modèle. Un maillage du domaine à étudier permet de définir des zones élémentaires appelées éléments. Ceux-ci sont reliés entre eux en différents points dénommés nœuds.

Cette dernière elle consiste à résoudre de manière discrète une équation aux dérivées partielles dont on cherche une solution approchée. Elle comporte des conditions aux limites permettant d'assurer l'existence et l'unicité de la solution.

La discrétisation du problème consiste à vérifier les équations de base en un nombre limité de points (nœuds). Ainsi, on obtient une formulation algébrique du problème initial. La solution algébrique obtenue correspond aux composantes de la solution approchée du problème pour les éléments.

#### **4.3. Le calcul par la méthode des éléments finis**

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

a- Elle nécessite

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

b- Elle permet

- D'effectuer les calculs d'écoulement ;
- De simuler toutes les phases de travaux ;
- De prendre en compte les variations des caractéristiques : des ouvrages, des couches de terrain et des lits de butons ou de tirants ;
- De calculer un coefficient de sécurité.

c- Les sorties fournissent pour les ouvrages sont

- Les déplacements des ouvrages ;
- Les sollicitations internes des ouvrages ;
- Les efforts dans les butons ou tirants.

d- Et pour le sol

- Les déplacements du sol ;
- Les déformations du sol ;
- Les contraintes totales et effectives dans le sol ;

- Les pressions interstitielles ;
- De calculer un coefficient de sécurité.

#### **4.4. La Géotechnique et PLAXIS.**

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

#### **4.5. Le logiciel Plaxis.**

Le code Plaxis est un logiciel couramment utilisé dans les bureaux d'études. Conçu par des géotechniciens numériciens de l'université de Delft aux Pays-Bas dans les années 1980. Ce programme d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques.

Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. Les utilisateurs sont supposés être capables de travailler dans un environnement Windows.

Si ce code a initialement été développé pour analyser les digues et les sols mous, son champ d'application s'étend aujourd'hui à une large gamme de problèmes géotechniques. Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élasto-plastiques, élastovisco-plastiques en grands déplacements par la méthode lagrangienne actualisée.

Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision, ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc). Le manuel d'utilisation du code Plaxis présente une description détaillée du logiciel.

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

#### 4.5.1. Le programme d'entrée de données (Input).

Pour générer un modèle d'éléments finis avec plaxis, on commence par la création d'un modèle géométrique à deux dimensions composé de points, de lignes et d'autres composant. La génération d'un maillage approprié et des conditions aux limites est réalisée automatiquement par Plaxis à partir du modèle géométrique précédemment être, comme on peut retoucher le maillage afin d'améliorer ses performances.

L'utilisateur devra aussi spécifier les propriétés des matériaux et les chargements existants.

Plusieurs lois de comportement sont disponibles dans la bibliothèque de Plaxis telles que

-Le critère de rupture Mohr-coulomb.

- La loi élastique linéaire.

- Le critère soft soil model.

- Le critère hardening soil model.

- Le critère soft soil creep model.

On peut aussi définir le type du comportement du matériau en choisissant entre un comportement drainé, un comportement non drainé ou un comportement d'un matériau non poreux.

Les éléments disponibles dans Plaxis sont de deux types, des éléments à 6 nœuds et des éléments à 15 nœuds.

La dernière étape de l'entrée des données comprend la génération des pressions interstitielles et des contraintes effectives initiales dans le but de définir l'état initial du sol.

#### 4.5.2. Le programme de calcul (Calculations)

Après la définition du modèle, les calculs proprement dits peuvent être effectués. Il est toutefois nécessaire de définir au préalable le type de calcul à réaliser ainsi que les cas de chargements qui seront appliqués, on opère grâce au programme de calcul. Ce programme distingue un calcul plastique, une analyse de la consolidation et une analyse en variables de lagrange actualisées. La combinaison entre le type d'analyse et l'algorithme définira le calcul à effectuer soit la recherche de charge de ruine, un calcul de stabilité, une construction par étape ou un calcul de consolidation.

Les algorithmes d'étapes de chargement utilisent l'une des procédures du choix de taille des Pas : une procédure automatique ou une procédure manuelle dont les paramètres de contrôle sont :

- Erreur tolérée pour s'assurer que les erreurs d'équilibre restent dans les limites acceptables.
- Surelaxation afin de réduire le nombre d'itérations nécessaire à la convergence.
- Nombre maximum d'itérations qui représente le nombre d'itérations maximal admissible pour chaque pas de calcul.
- Minimum et maximum souhaité d'itérations par pas afin d'obtenir une courbe effort déplacement lisse.
- Contrôle de la longueur d'arc est une option qui permettra d'évaluer automatiquement la fraction de charge extérieure à appliquer pour atteindre la rupture.

#### **4.5.3. Le programme de résultats (Output)**

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

#### **4.5.4. Le programme courbe (Curves)**

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

### **4.6. Système d'options du code Plaxis.**

#### **4.6.1. Le Maillage**

L'opérateur peut bien entendu de spécifier un maillage très détaillé, mais si seules les grandes lignes de celui-ci importent des détails des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement généré par le logiciel à partir d'un petit nombre de nœuds, avec un contrôle permanent à l'écran.

#### **4.6.2. Les conditions aux limites en déplacement**

Si celles-ci sont complexes, l'ingénieur devra spécifier les subtilités d'une manière précise (le vecteur déplacement est nul à la base du domaine étudié, et le vecteur déplacement horizontal est nul sur ses

faces latérales), l'application peut être réalisée automatiquement (par défaut) à partir du menu avec un contrôle immédiat du résultat à l'écran.

#### **4.6.3. Les contraintes initiales dues au poids des terres**

Peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre. Par contre, si comme bien souvent en géotechnique on connaît ou on sait estimer un état

K0 donné, celui-ci peut être spécifié directement. Dans ce cas, le massif est souvent en léger déséquilibre (incompatibilité entre K0 et les autres caractéristiques mécaniques).

Le menu permet alors, par un changement fictif nul, de rééquilibrer le massif, puis de réinitialiser à zéro le champ de déplacement de manière à prendre comme nouvelle origine l'état du matériau après application de la gravité. L'option K0 est particulièrement intéressante dans le cas d'un modèle hétérogène de surface libre presque horizontale.

#### **4.6.4. Les pressions interstitielles**

Ont été l'objet d'un soin particulier dans Plaxis pour qui souhaite faire un calcul précis du champ de pressions interstitielles, Mais bien sûr, cette opération demande du temps (d'opérateur et de machine).

#### **4.6.5. Le coefficient de sécurité**

C'est une notation très importante en géotechnique, puisqu'il résume en une seule information une qualité considérable de données, supposant une réduction proportionnelle de la résistance mécanique des matériaux impliqués, ce qui ne constitue pas un état réel de rupture. C'est la même approche, adaptée aux éléments finis élastoplastiques, qui préside à l'évaluation du coefficient de sécurité dans Plaxis.

Un calcul par élément finis fournit une masse imposante de résultats ; résultats directement utiles au projeteur : déplacements, contraintes, pressions interstitielles à un stade donné du chargement, et des résultats plus mathématiques concernant le déroulement du processus de calcul proprement dit. L'ensemble de ces résultats est accessible, selon que l'on est intéressé par l'un ou l'autre aspect.

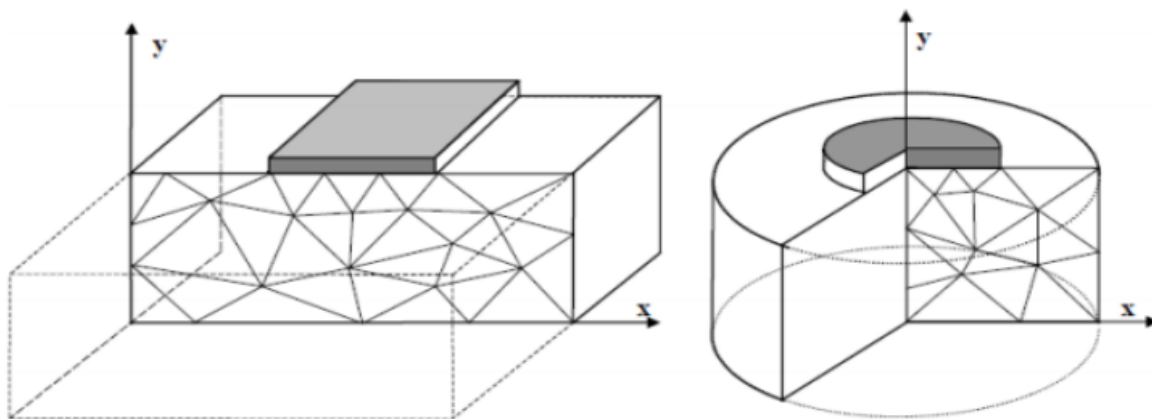
#### **4.7. Types de modèle en Plaxis.**

Plaxis peut être utilisé pour réaliser des analyses par éléments finis en deux dimensions. Les modèles d'éléments finis peuvent être soit plans (Plane strain), soit axisymétriques (Axisymmetric). Les modèles en déformations planes sont utilisés pour des structures ayant une section (plus ou moins) uniforme, et

avec un état de contraintes et un schéma de chargement uniformes sur une longueur suffisante perpendiculairement à la section (direction  $z$ ). Les déplacements perpendiculaires à la section sont considérés comme nuls.

Cependant, les contraintes normales dans la direction  $z$  sont intégralement prises en compte.

Les modèles axisymétriques sont utilisés pour des structures circulaires ayant une section radiale (plus ou moins) uniforme, avec un schéma de chargement réparti autour de l'axe central et des états de contrainte et de déformation identiques selon les directions radiales (figure 4.1). A noter que pour les problèmes axisymétriques, la coordonnée  $x$  représente le rayon et la coordonnée  $y$  correspond à l'axe de symétrie. Il ne faut pas utiliser dans ce cas de coordonnées  $x$  négatives. Pour un modèle d'éléments finis à deux dimensions, le choix de Plane strain ou de Axisymmetry a pour conséquence de ne laisser que deux degrés de liberté en translation par nœud dans les directions  $x$  et  $y$ .



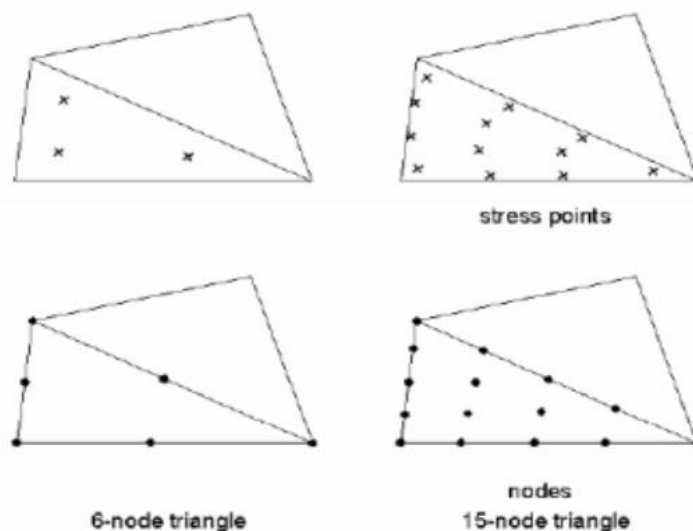
**Figure.4.1.** Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique.

#### 4.8. Types d'éléments utilisés par Plaxis.

L'utilisateur doit sélectionner des éléments triangulaires à 6 ou 15 nœuds pour modéliser les couches de sol et autres éléments de volume. L'élément par défaut est le triangle à 15 nœuds. Il fournit une interpolation du quatrième ordre pour les déplacements et l'intégration numérique se fait sur douze points de Gauss (points de contrainte). Pour le triangle à 6 nœuds, l'interpolation est d'ordre deux et l'intégration numérique se fait sur trois points de Gauss (figure 4.2). Le type d'éléments pour les éléments de structure est automatiquement compatible avec le type d'éléments de sol choisi.

Le triangle à 15 nœuds est un élément très précis qui a produit des résultats en contraintes de haute qualité sur différents problèmes, comme par exemple le calcul de la rupture de sols incompressibles. L'utilisation des triangles à 15 nœuds implique une consommation de mémoire assez élevée, et les calculs et la manipulation sont donc un peu ralentis. C'est pour cela qu'un type d'éléments plus simple est également disponible. Le triangle à 6 nœuds est un élément relativement précis donnant de bons résultats pour les analyses standards en déformations, à condition d'utiliser un nombre suffisant d'éléments.

Cependant, il faut être prudent dans le cas de modèles axisymétriques ou dans des situations où une rupture (possible) est à prendre en compte, comme un calcul de capacité portante ou le calcul de coefficient de sécurité. Les charges à la rupture et les coefficients de sécurité sont généralement surévalués avec des éléments à 6 nœuds. Pour ces calculs, il convient d'utiliser plutôt des éléments à 15 nœuds. Un élément à 15 nœuds peut être imaginé comme la réunion de quatre éléments à 6 nœuds, étant donné que le nombre de nœuds et de points de contraintes est identique dans les deux cas. Néanmoins, un élément à 15 nœuds est plus puissant que quatre éléments à 6 nœuds réunis.



**Figure.4.2** Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol.

#### 4.9. Modèles de comportement utilisés dans le Plaxis.

Les sols et les roches tendent à se comporter d'une manière fortement non linéaire sous l'effet d'un chargement. Ce comportement non linéaire en contraintes-déformations peut être modélisé suivant différents niveaux de sophistication. Mais le nombre de paramètres à introduire dans les modèles augmente avec ce degré de sophistication. Le modèle bien connu de Mohr-Coulomb peut être considéré

comme une approximation au premier ordre du comportement réel du sol. Ce modèle, élastique parfaitement plastique, nécessite cinq paramètres fondamentaux qui sont : le module d'Young,  $E$ , le coefficient de Poisson,  $\nu$ , la cohésion,  $c$ , l'angle de frottement,  $\varphi$ , et l'angle de dilatance,  $\psi$ . Comme les ingénieurs géotechniciens sont habitués à utiliser ces cinq paramètres, et qu'ils disposent rarement d'autres données, une attention particulière sera portée à ce modèle classique de comportement.

#### 4.9.1. Modèle de comportement élasto-plastique.

##### 4.9.1.1. Elasto-plasticité.

Un comportement de type élastique linéaire isotrope ne peut être utilisé qu'en première approche car il ne permet pas de prendre en compte les déformations irréversibles.

La plupart des matériaux sont en effet élastoplastiques, leur comportement est caractérisé par l'apparition de déformations élastiques et de déformations irréversibles. La déformation totale est la somme des déformations élastiques  $\epsilon_e$  et plastiques  $\epsilon_p$

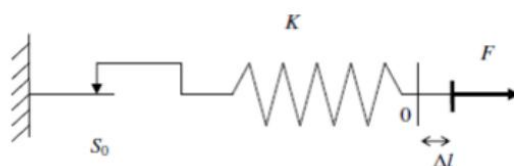
Elle est donnée par l'équation suivante :

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p$$

##### 4.9.1.2. Comportement élastoplastique.

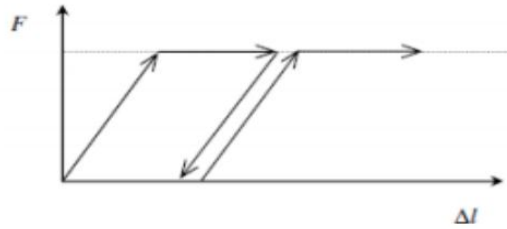
Le comportement élastoplastique peut être représenté par un modèle monodimensionnel, en série un ressort de raideur  $K$ , pour symboliser l'élasticité du matériau,

à un patin de seuil  $S_0$  (figure 4.3).



**Figure.4.3** Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique.

La courbe effort-déplacement ou contrainte-déformation que l'on trouve est présentée sur la figure 4.4



**Figure.4.4.** Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.

#### 4.10. Conclusion

L'objectif de la modélisation (au sens large) en géotechnique est souvent la recherche d'une réponse, d'une solution à un problème particulier et complexe. La modélisation numérique est un outil puissant, elle est en constante progression depuis les années cinquante.

Aujourd'hui, la modélisation intervient dans tous les domaines sans exception.

Les méthodes numériques en géotechnique ont pour but de décrire, d'expliquer ou de prédire le comportement d'une structure naturelle ou artificielle sur la base de lois physiques qui relient les variations des contraintes aux déformations et aux déplacements. C'est dans ce contexte que le code PLAXIS offre la possibilité de prédire la rupture des fondations en utilisant des lois de comportement assez performantes afin de simuler le comportement réel des sols.

## **Chapitre 05**

# **Modélisation numérique et interprétations des résultats**

# Chapitre 05

## Modélisation numérique et interprétations des résultats

### 5.1. Introduction

L'étude paramétrique sur la variation de la couche du matelas et ses effets sur les tassements, particulièrement sous des fondations superficielles, constitue un domaine d'investigation crucial en ingénierie géotechnique. Les fondations superficielles, qui incluent des types tels que les semelles filantes et les radier, sont couramment utilisées pour supporter des structures de faible à moyenne hauteur en raison de leur simplicité de conception et de mise en œuvre. Elles reposent directement sur la surface du sol, rendant leurs performances particulièrement dépendantes des propriétés géotechniques du sol sous-jacent.

Lorsqu'une charge est appliquée sur une fondation superficielle, le sol réagit par des déformations, également appelées tassements. Ces tassements peuvent être immédiats, en réponse à la charge appliquée, ou différés, résultant de la consolidation du sol au fil du temps. Les tassements excessifs peuvent entraîner des fissures dans les structures, des désalignements et, dans les cas extrêmes, des défaillances catastrophiques. Par conséquent, il est essentiel de comprendre les facteurs qui influent sur ces tassements afin de garantir la stabilité et la durabilité des constructions.

La couche du matelas joue un rôle fondamental dans ce phénomène. En tant que couche intermédiaire entre la fondation et le sol, elle permet de répartir les charges de manière plus uniforme et de diminuer les contraintes concentrées sur le sol. En outre, une couche de matelas bien conçue peut améliorer la résistance au cisaillement du sol et réduire les déformations. Cependant, la performance de cette couche dépend de plusieurs paramètres, notamment son épaisseur, sa composition matérielle et sa rigidité.

Une étude paramétrique permet d'examiner systématiquement l'impact de ces différentes variables sur les tassements observés. Par exemple, l'augmentation de l'épaisseur du matelas peut réduire les tassements, mais cela doit être équilibré avec des considérations de coût et de faisabilité.

De même, la sélection de matériaux avec des propriétés mécaniques adaptées peut également influencer la performance du matelas. En simulant divers scénarios dans un cadre paramétrique, nous pouvons identifier les configurations optimales qui minimisent les tassements tout en respectant les contraintes de conception.

Cette recherche a pour objectif de fournir des recommandations basées sur des analyses quantitatives et qualitatives, afin d'optimiser la conception des fondations superficielles. En intégrant les résultats de cette étude dans les pratiques de conception, il sera possible de développer des stratégies efficaces pour prévenir les problèmes de tassement, garantissant ainsi la sécurité et la longévité des infrastructures.

Ce travail contribuera non seulement à la compréhension des interactions sol-structure, mais aussi à l'avancement des normes et des pratiques en ingénierie géotechnique.

## 5.2. Etude paramétrique

On désire étudier l'influence des différentes couches de matelas sur les tassements sous les fondations superficielles, celle-ci avec

Une base d'assise  $B=1.20\text{m}$ ,

Une hauteur  $H=0.45\text{m}$  et

Un espacement  $E=3.50\text{m}$ .

La définition géométrique retenue pour cette étude est représentée sur la figure 5.1, Les calculs dans cette étude portent plusieurs variations de plusieurs paramètres :

- a) L'angle de frottement interne  $\varphi= 6^\circ, 16^\circ, 32^\circ$  et  $35^\circ$  .
- b) L'épaisseur de couche de matelas  $\text{mat}=0.35\text{m}$ ,  $\text{mat}=0.45\text{m}$  et  $\text{mat}=0.55\text{m}$ .

L'analyse numérique a été conduite en utilisant le logiciel PLAXIS permettant la modélisation en déformation planes.



**Figure 5.1.** Présentation du model numérique

Ce modèle numérique représente trois types de sols sur une profondeur générale de  $H=18\text{m}$  et une largeur total  $L=25.9\text{m}$ .

### 5.3. Caractéristiques des matériaux

#### 5.3.1. Caractéristiques du massif de sol

Les sols utilisées dans cette analyse

##### 5.3.1.1. Argile Limoneuse

Qui constitue la première couche de sol étudié avec une profondeur de  $3\text{m}$  obéissant au critère non linéaire de Mohr-coulomb régi par une loi de comportement non associée.

L'attention est attirée sur le fait que ce critère est recommandé pour sa simplicité et la disponibilité des paramètres dont on a besoin.

**Tableau 5.1.** Propriétés de la première couche de sol (AL).

Paramètre	Nom	Unité	Caractéristique
Modèle type	AL	-	Mohr-coulomb
Type de comportement	Type	-	Drainé
Poids volumique	$\gamma_{unsat}$	KN/m <sup>3</sup>	19
Module d'Young	Eref	KN/m <sup>2</sup>	15600
Coefficient de Poisson	$\nu$	/	0.3
Cohésion	C	KN/m <sup>3</sup>	40
Angle de frottement	$\varphi$	(°)	16
Angle de dilatation	$\psi$	(°)	0

### 5.3.1.2. Limon Marneux

La deuxième couche de sol qui rentre dans l'analyse est un Limon marneux avec une profondeur de 6m obéissant au critère non linéaire de Mohr-coulomb régi par une loi de comportement non associée.

Avec les caractéristiques suivantes

**Tableau 5.2.** Propriétés de la deuxième couche de sol (LM).

Paramètre	Nom	Unité	Caractéristique
Modèle type	LM	-	Mohr-coulomb
Type de comportement	Type	-	Drainé
Poids volumique	$\gamma_{\text{unsat}}$	KN/m <sup>3</sup>	17
Module d'Young	Eref	KN/m <sup>2</sup>	5200
Coefficient de Poisson	$\nu$	/	0.3
Cohésion	C	KN/m <sup>3</sup>	30
Angle de frottement	$\varphi$	(°)	6
Angle de dilatation	$\psi$	(°)	0

#### 5.3.1.4. Sable Grossier Graveleux Caillouteux

Qui représente la troisième et dernière couche du sol étudié dans notre analyse avec une profondeur de 9m sans cohésion obéissant au critère non linéaire de Mohr-coulomb.

**Tableau 5.3.** Propriétés de la troisième couche de sol (SG).

Paramètre	Nom	Unité	Caractéristique
Modèle type	SG	-	Mohr-coulomb
Type de comportement	Type	-	Drainé
Poids volumique	$\gamma_{\text{unsat}}$	KN/m <sup>3</sup>	20
Module d'Young	Eref	KN/m <sup>2</sup>	84000
Coefficient de Poisson	$\nu$	/	0.3
Cohésion	C	KN/m <sup>3</sup>	0
Angle de frottement	$\varphi$	(°)	32
Angle de dilatation	$\psi$	(°)	2

### 5.3.2. Caractéristiques du Matelas

Nous allons introduire dans notre travail trois épaisseurs de matelas ( $E_p=0.35\text{m}, 0.45\text{m}$  et  $0.55\text{m}$ ) avec des mêmes caractéristiques

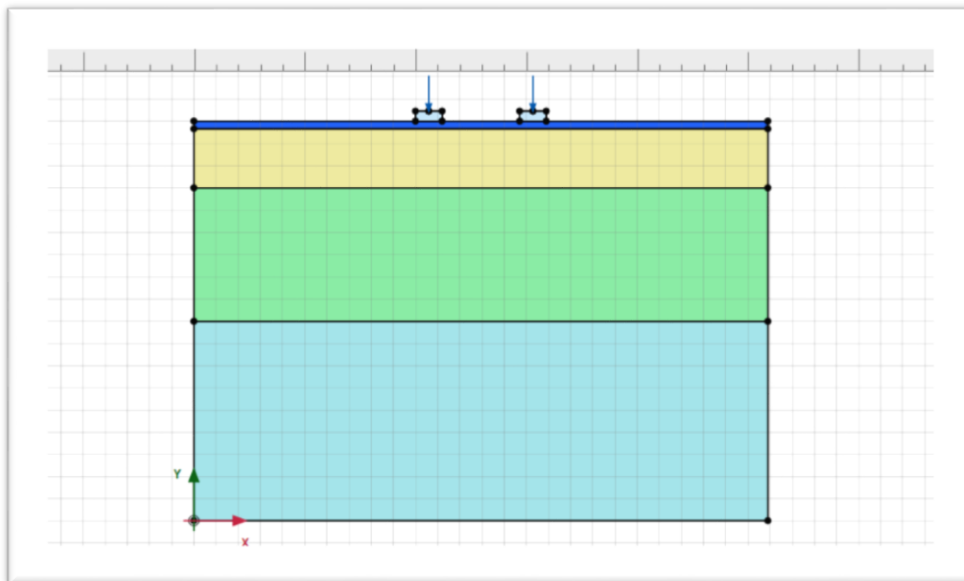


Figure 5.2. Matelas 0.35 m

### Caractéristiques

Tableau 5.4. Propriétés du Matelas

Paramètre	Nom	Unité	Caractéristique
Modèle type	Mat	-	Mohr-coulomb
Type de comportement	Type	-	Drainé
Poids volumique	$\gamma_{\text{unsat}}$	$\text{KN/m}^3$	22
Module d'Young	$E_{\text{ref}}$	MPa	150
Coefficient de Poisson	$\nu$	/	0.3
Cohésion	C	$\text{KN/m}^3$	0
Angle de frottement	$\varphi$	(°)	35

### 5.3.3. Caractéristiques de la Fondation

La fondation traitée est une fondation superficielle de base  $B=1.20\text{m}$ , hauteur  $=0.45\text{m}$  et un espacement  $E=3.50\text{m}$ .

Soumise à six charge

$F_1=50\text{ KN}$ ,  $F_2=100\text{ KN}$ ,  $F_3=150\text{ KN}$ ,  $F_4=200\text{ KN}$ ,  $F_5=250\text{ KN}$ ,  $F_6=300\text{ KN}$ .

**Tableau 5.5.** Propriétés de la Fondation

Paramètre	Nom	Unité	Caractéristique
Modèle type	Fondation	-	/
Poids volumique	$\gamma_{\text{unsat}}$	$\text{KN/m}^3$	25
Module d'Young	$E_{\text{ref}}$	Mpa	20000
Coefficient de Poisson	$\nu$	/	0.2
Cohésion	C	$\text{KN/m}^3$	0
Angle de frottement	$\varphi$	(°)	0

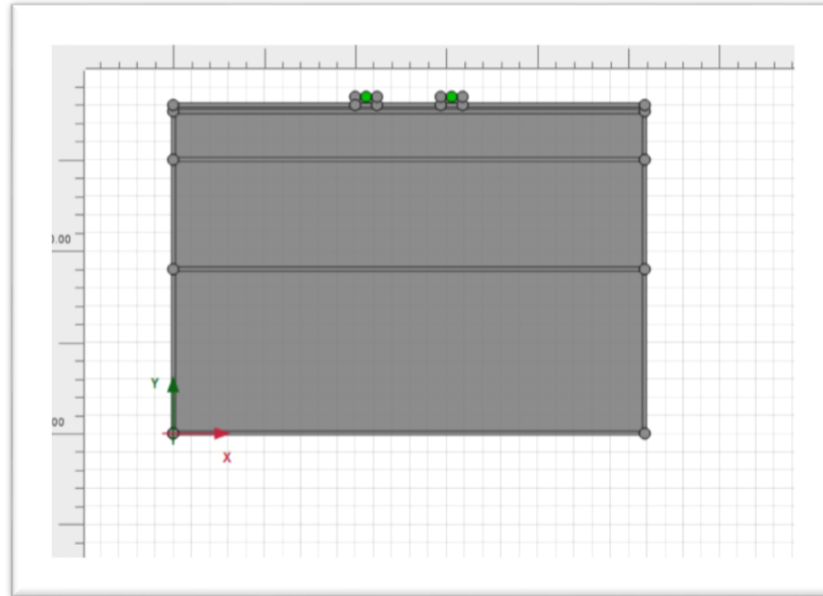
## 5.4. Génération du maillage

### 5.4.1. Matelas 0.35 m

Au cours de la génération du maillage et la conduite des calculs, Plaxis intègre une procédure de génération de maillage entièrement automatique, dans laquelle le massif de sol a été discrétisé dans son intégralité par des éléments de type triangulaires.

Le maillage résultant est constitué de 741 éléments et 6139 nœuds, le maillage généré est utilisé pour tout le sol.

Le maillage des éléments finis et les conditions aux limites sont illustrés à la Figure 5.5.

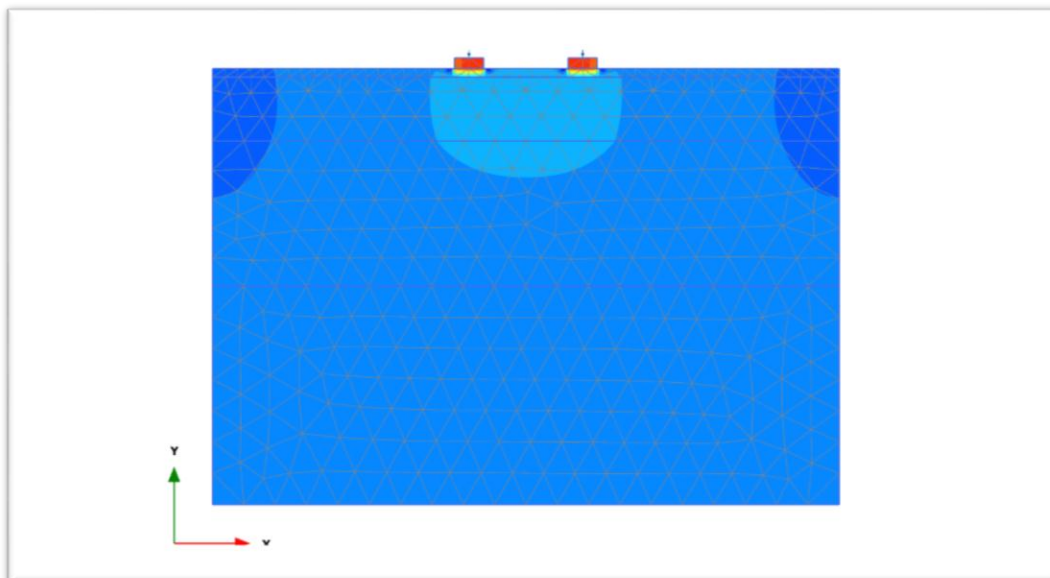


**Figure 5.3.** Génération du maillage

### 5.5. Calcul

Lors de cette Phase de calcul et de visualisation des tassements nous prendrons en considération uniquement  $F_6=300$  KN c'est à dire la force max.

**Matelas d'épaisseur 0.35 m**



**Figure 5.4.** Tassements sous une force de  $F=300$  KN

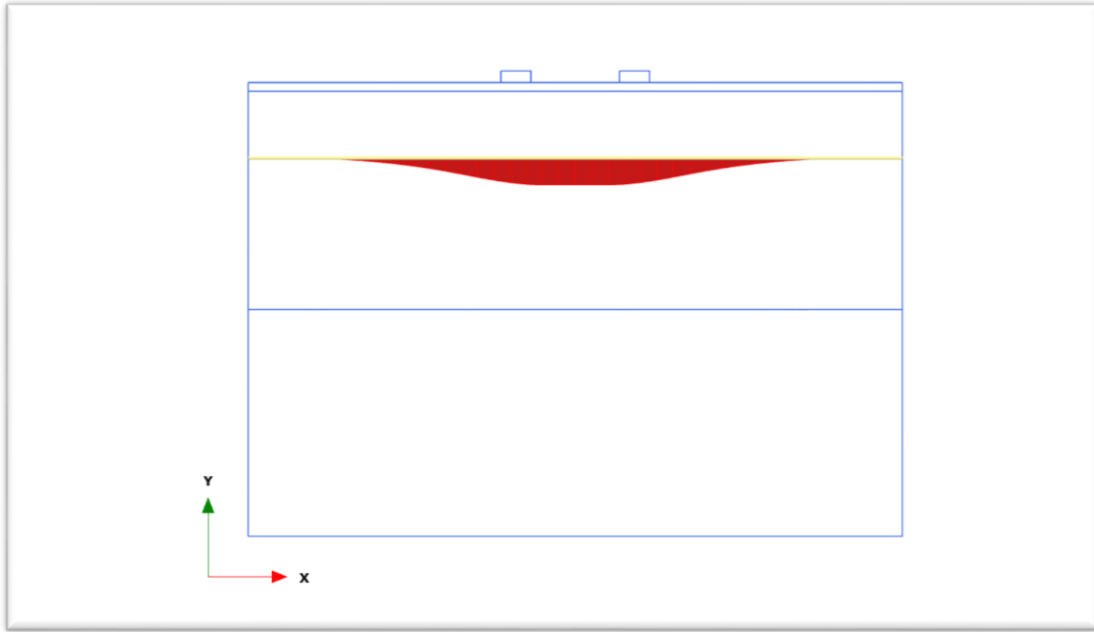


Figure 5.5. Tassements selon le profil horizontal (H=-3m)

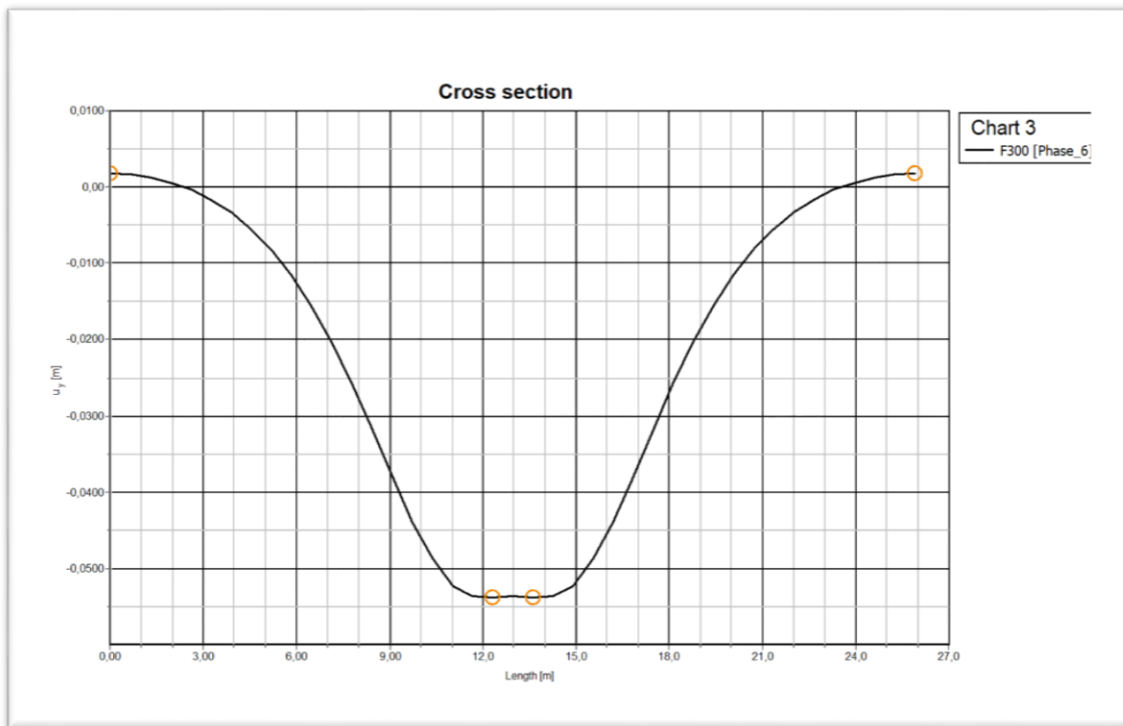


Figure 5.6. Courbe de tassements selon le profil horizontal

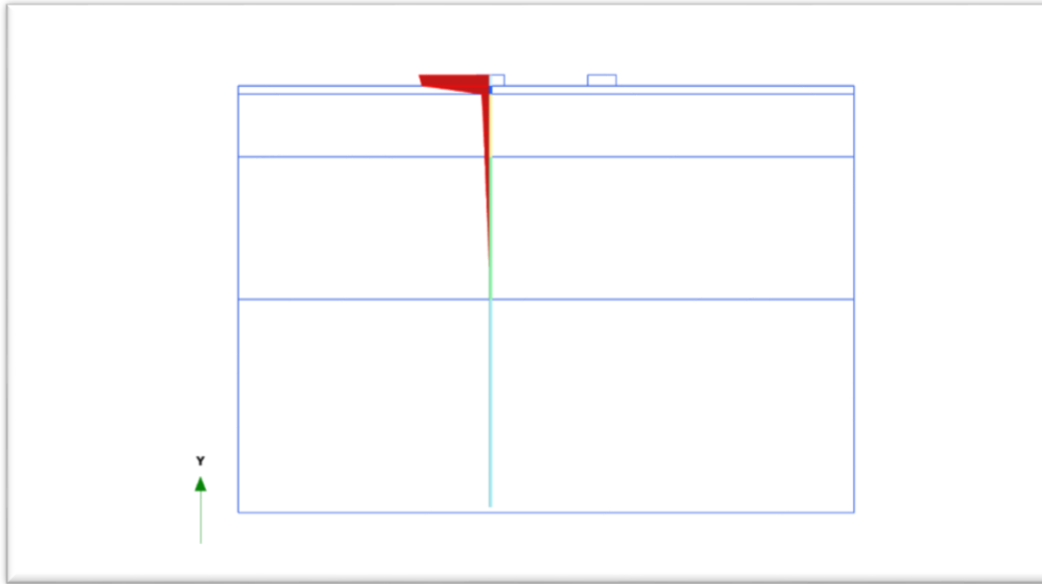


Figure 5.7. Tassements sous la fondation

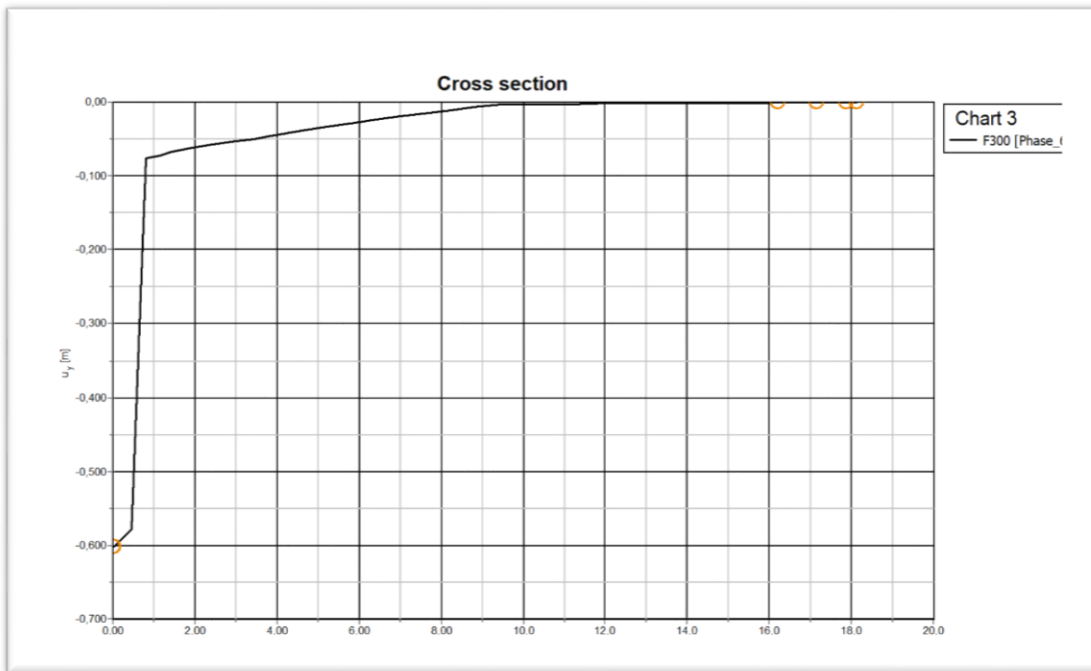


Figure 5.8. Courbe de tassement sous la fondation.

Matelas d'épaisseur 0.45 m

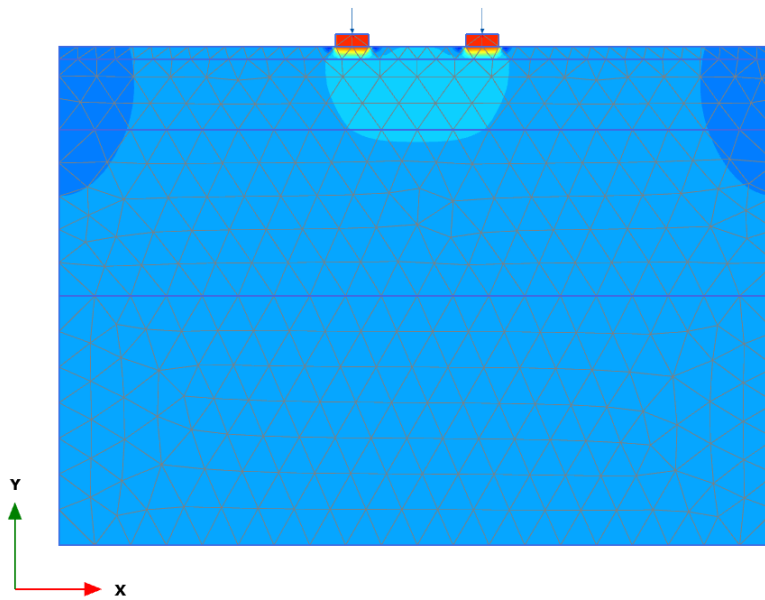


Figure 5.9. Tassements sous une force  $F=300$  KN

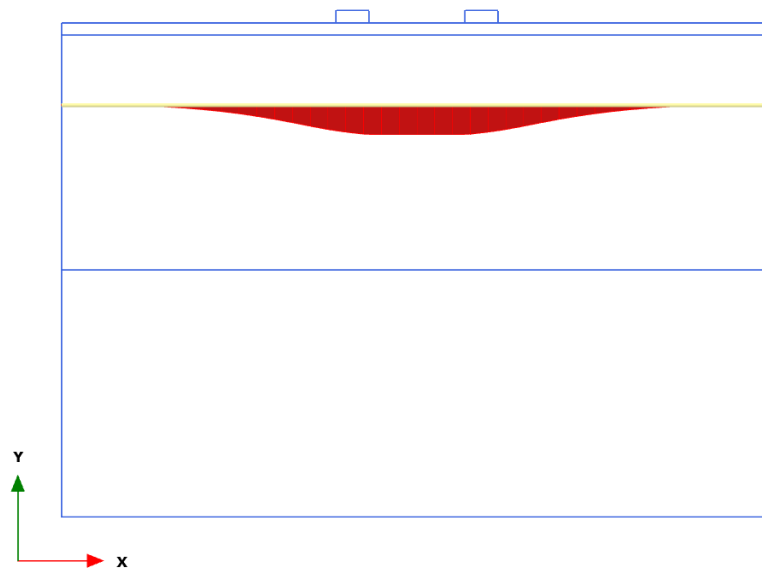
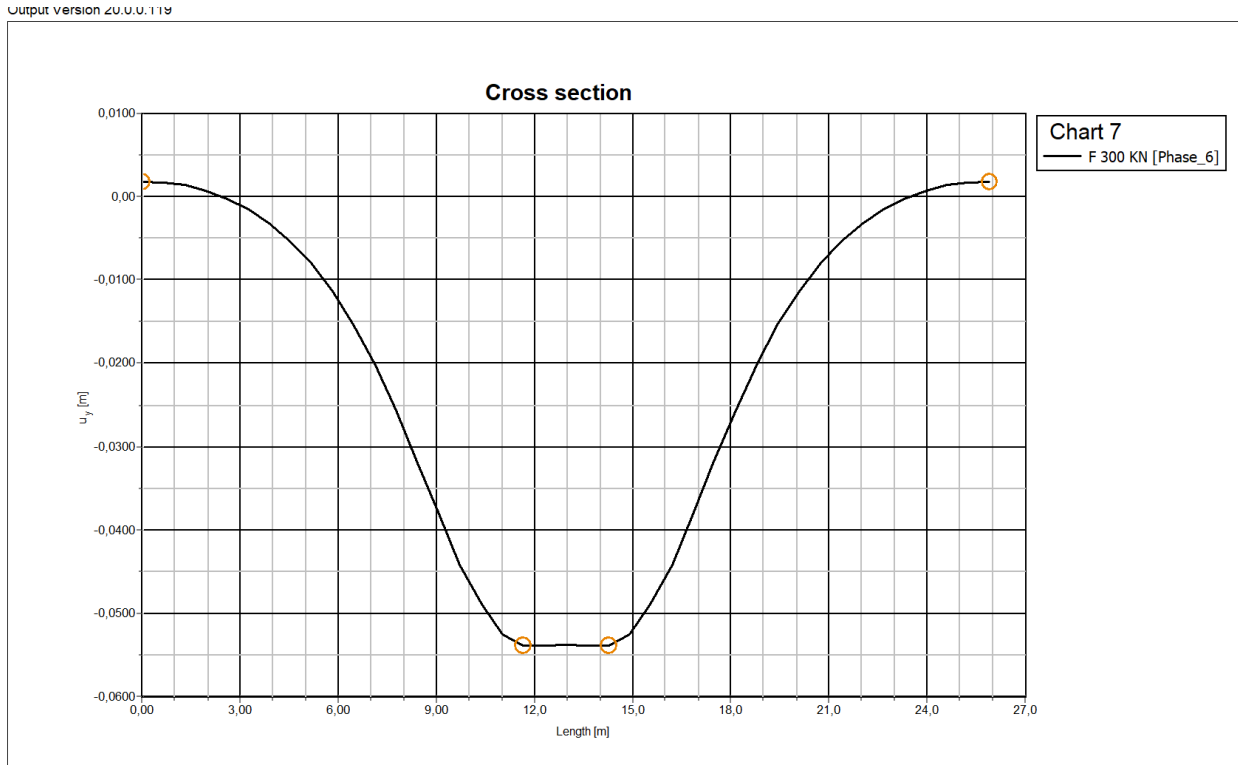
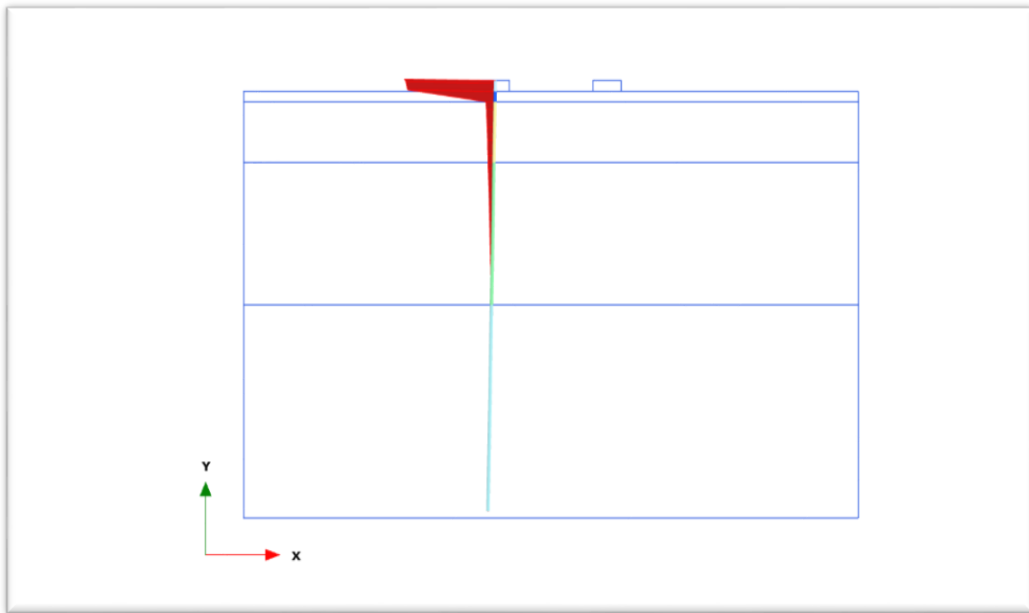


Figure 5.10. Tassement sous profil horizontal



**Figure 5.11.** Courbe de tassements sous profil horizontal



**Figure 5.12.** Tassements sous la fondation

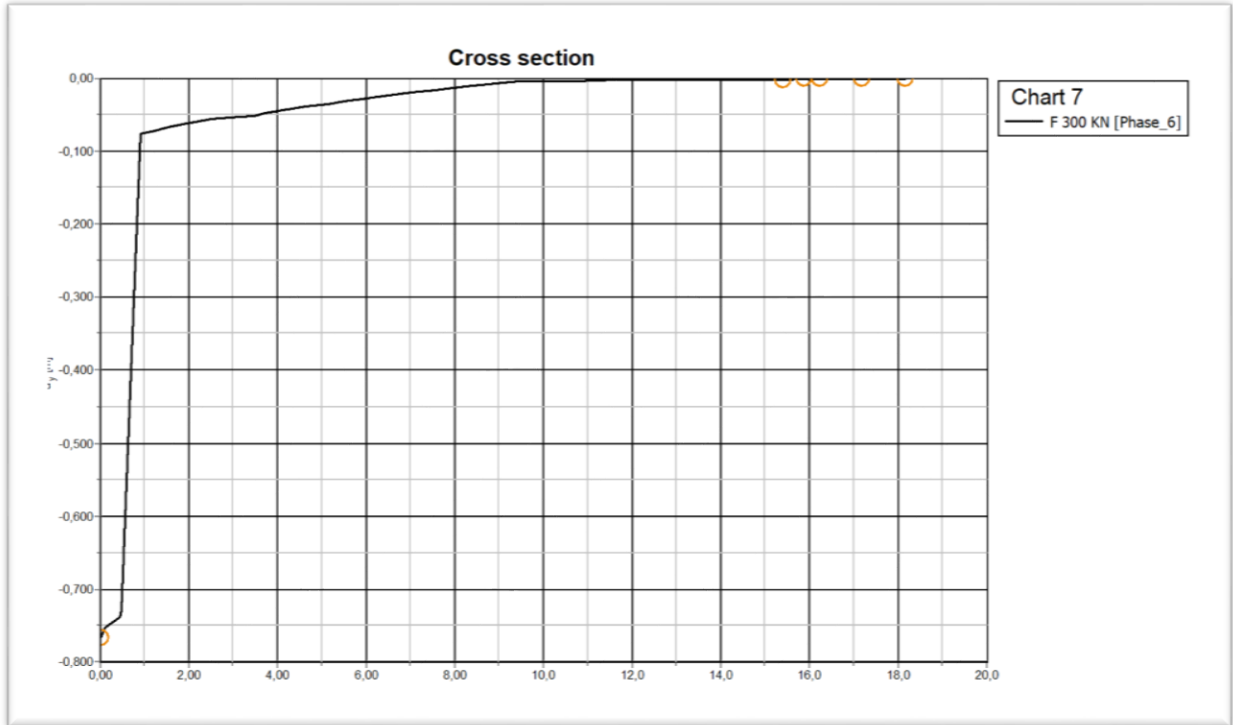


Figure 5.13. Courbe de tassements

Matelas d'épaisseur 0.55 m

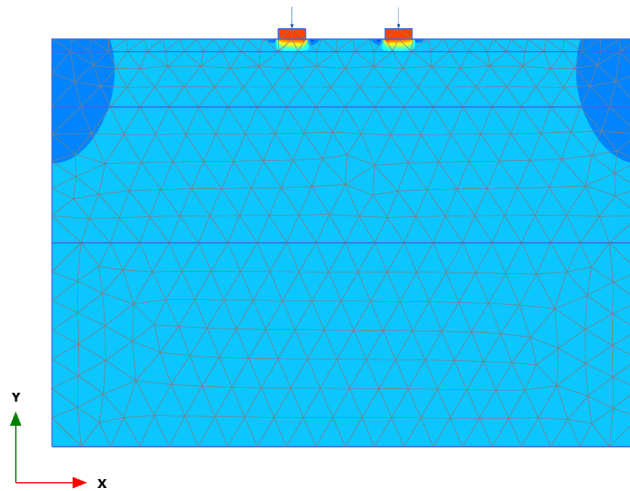


Figure 5.14. Tassements sous une force  $F=300$  KN.

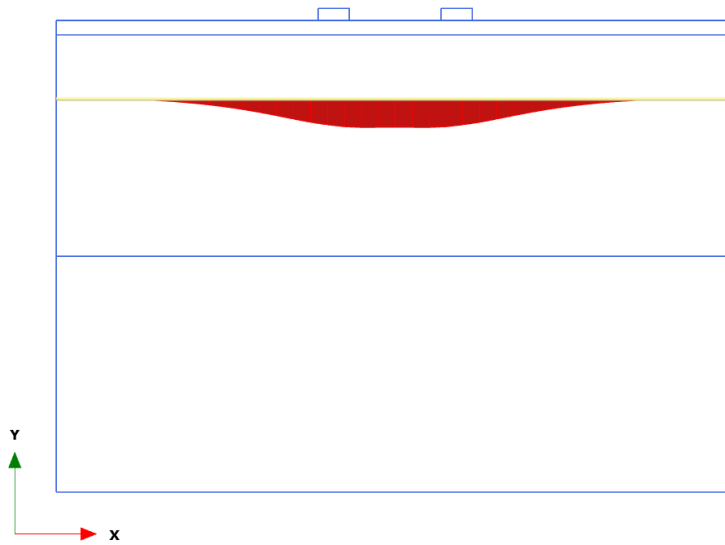


Figure 5.15. Tassements sous profil horizontal.

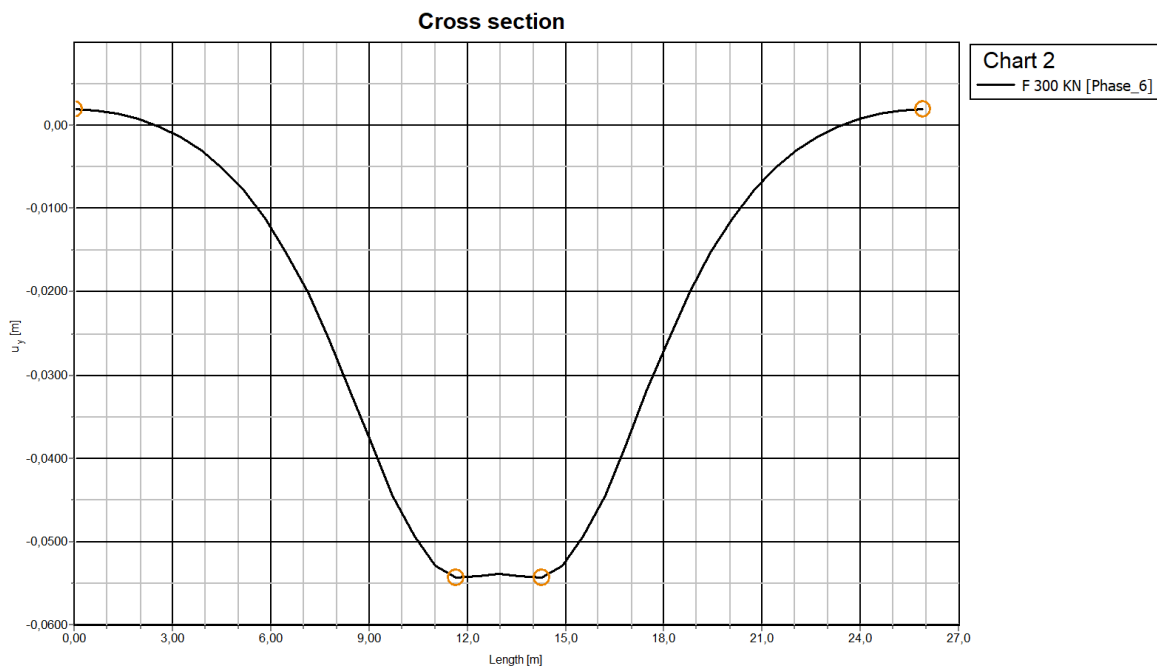


Figure 5.16. Courbe représentative des tassements sous profil horizontal.

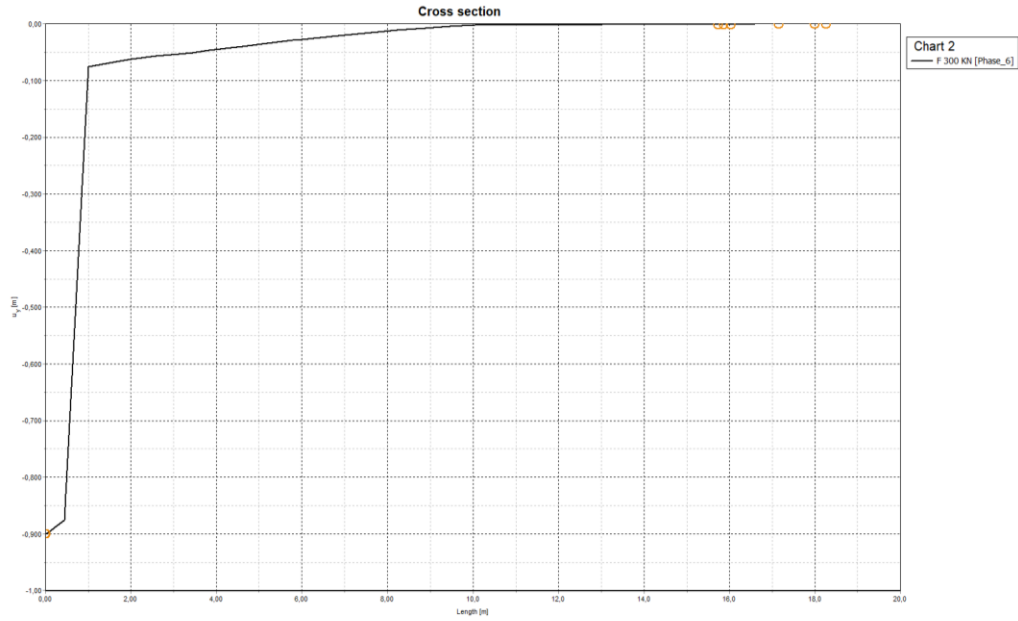


Figure 5.17. Courbe de tassements sous la fondation.

### 5.6. Interprétation des résultats

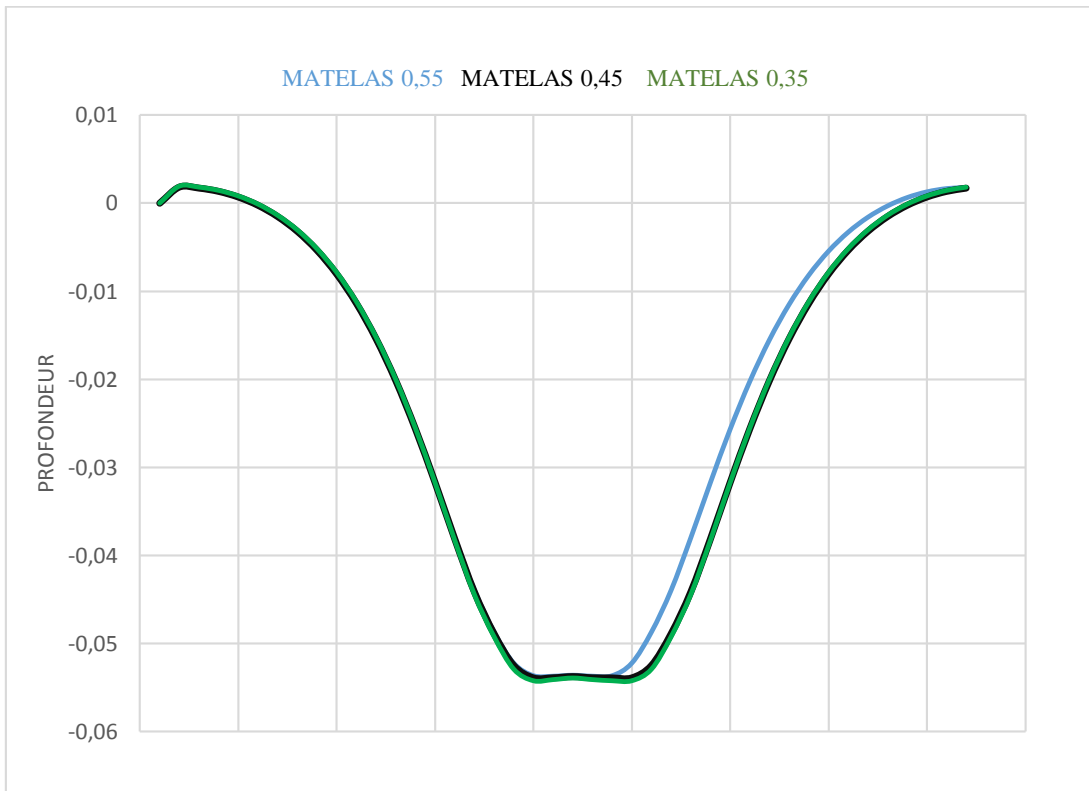
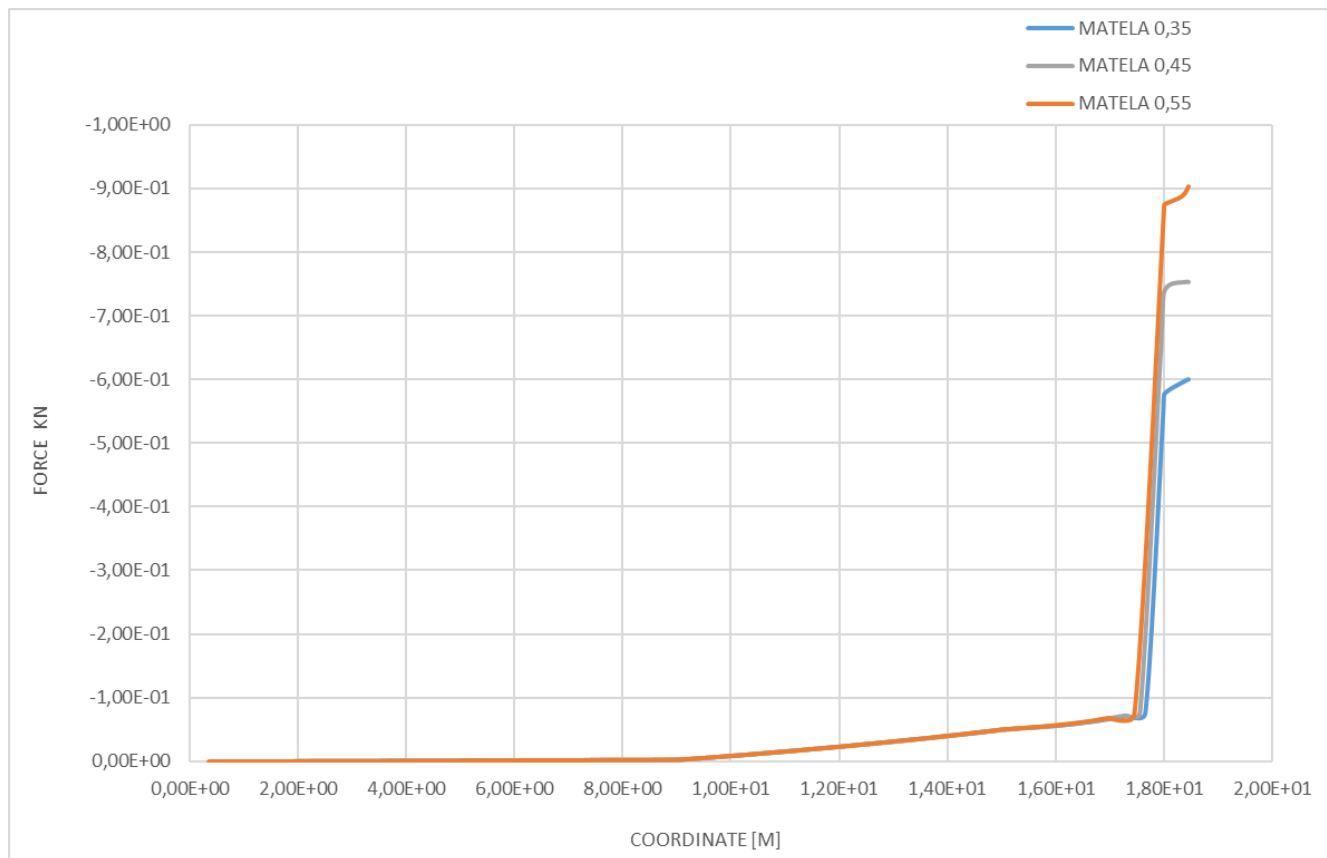


Figure 5.18. Différentes couches de matelas.



**Figure .5.19.** Tassements sous fondation

### Répartition des Charges

L'épaisseur du matelas joue un rôle crucial dans la répartition des charges appliquées sur les fondations

**Matelas de 0.35 m :** Cette épaisseur minimale peut conduire à une concentration de charges dans les couches de sol.

**Matelas de 0.45 m :** Cette épaisseur intermédiaire permet une meilleure répartition des charges, atténuant les pressions exercées sur les couches. Cependant, elle peut encore être insuffisante pour des charges très élevées.

**Matelas de 0.55 m :** Avec cette épaisseur maximale, la répartition des charges devient optimale. Les pressions sur le sol sont significativement réduites, ce qui diminue les risques de tassements excessifs, surtout dans les couches compressibles.

### Tassements

Les tassements sont un critère critique à considérer pour la durabilité de la structure

**0.35 m :** On s'attend à des tassements significatifs, ce qui pourrait entraîner des déformations visibles dans la structure.

**0.45 m :** Bien que des tassements soient toujours possibles, leurs amplitudes sont réduites par rapport à l'épaisseur de 0.35 m.

**0.55 m :** Cette épaisseur minimise considérablement les tassements, garantissant que les mouvements de sol sont dans des limites acceptables, ce qui est essentiel pour la longévité de la structure.

### 5.7. Conclusion

L'analyse des trois épaisseurs des matelas par modélisation démontre que l'augmentation de l'épaisseur à 0.55 m offre des avantages significatifs en termes de répartition des charges, de réduction des tassements. Il est recommandé d'opter pour un matelas d'une épaisseur minimale de 0.55 m, particulièrement dans les zones où les caractéristiques du sol peuvent poser des défis. Cette approche proactive garantira la sécurité de la structure.

En résumé, l'augmentation de l'épaisseur du matelas de 0.35 m à 0.55 m améliore significativement la répartition des charges, la capacité portante, et réduit les tassements et le risque de déformations. Pour une meilleure performance des fondations dans un sol hétérogène, il est recommandé d'opter pour la solution de 0.55 m, étant donné ses avantages en termes de stabilité notamment la réduction des tassements.

## **Conclusion générale**

L'étude paramétrique de la variation de la couche du matelas et de son impact sur les tassements sous fondations superficielles est essentielle pour garantir la sécurité et la durabilité des structures. En intégrant les interactions entre la fondation et le sol, nous avons pu mieux comprendre les mécanismes de tassement et leur influence sur le comportement des constructions.

Les résultats de cette étude révèlent l'importance de concevoir des fondations adaptées aux caractéristiques spécifiques du sol et aux charges appliquées. La sélection, l'épaisseur et la composition de la couche du matelas peuvent jouer un rôle déterminant dans la performance des fondations, permettant ainsi de minimiser les tassements et d'assurer une répartition adéquate des charges.

En conclusion, une approche méthodique et paramétrique dans la conception des fondations superficielles, prenant en compte les propriétés du sol et les spécificités de la structure, est cruciale pour prévenir les problèmes de tassement. Cela contribuera non seulement à la sécurité des infrastructures, mais aussi à l'optimisation des coûts et à la pérennité des constructions dans un environnement en constante évolution. Des recherches futures pourraient également explorer de nouvelles techniques et matériaux pour améliorer encore plus la performance des fondations dans des conditions géotechniques variées.

## Références bibliographique

Différentes phases de sol [UNIT]. *Université Numérique Ingénierie et Technologie*

Compactage de surface ; matériels utilisés [LOKAMAT]

*Vibrocompactage* : Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques (CFMS). Centre de formation [CFMS]

[Y Iagolnitzer - 1996]

Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides verticales [ J Eng Mech, 131 (7) (2005)]

Torregrossa et al. (2006). Somatic chimerism, genetic inheritance, and mapping of the fleshless berry (flb) mutation in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Genome*

Yang H. Huang, (2004), *Pavement Analysis and Design.*, Kentucky, USA, 776 pages.

Robitaille, V et Tremblay, D. (2014), *Mécanique des sols –Théorie et pratique.* (2 ème édition), Modulo éditeur, Québec.

Peirs, G. (2004), *La brique.* (1ère édition). Librairie Eyrolles, France.

Nguyen, P (2008). Étude en place et au laboratoire du comportement en petites déformations des sols argileux naturels. Thèse de Doctorat, ENPC, France.

NF P 94 – 093 (2014) Norme française, Sols : reconnaissance et essais. Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor Normal, Essai Proctor Modifié.

Laboratoire LABGEO, "Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais", 2017. [En ligne].

[https://issuu.com/laboratoirelabgeo/docs/labgeo\\_classification\\_des\\_mat\\_riau](https://issuu.com/laboratoirelabgeo/docs/labgeo_classification_des_mat_riau) [consulté le 28 mai 2024].

Lamy Expertise, " Les liants traditionnels pour rénover une maison ancienne ", 2022. [En ligne]. <https://www.lamy-expertise.fr/liants-traditionnels> [consulté le 30 mai 2024].

Futura sciences, <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/isolation-maison-energie-positive-874/page/5/>. [Consulté le 5 juin 2024].

DeJong-Hughes, J, "Impact du compactage du sol sur le développement des cultures". [En ligne]. <https://www.agrifind.fr/impact-compactage-du-sol-developpement-cultures/> [consulté le 8 juin 2024].

[http://www.unit.eu/cours/geotechnique\\_routiere/3\\_ClassificationSols/co/Cours\\_2\\_Caracteristiques.html](http://www.unit.eu/cours/geotechnique_routiere/3_ClassificationSols/co/Cours_2_Caracteristiques.html)

<https://genie-civile.blogspot.com/2013/04/classificatio-et-geotechnique-des-sols.html>

<https://fr.slideshare.net/sangracosan/compactage-coursroutesprocedesgenerauxdeconstruction-48474454>

<https://www.semanticscholar.org/paper/Ground-Vibrations-Induced-by-Dynamic-Compaction-and-Lauzon-Morel/8fdf27002efbf84cf0f713a35b81ebc8feaabbfc>

<https://www.bachy-soletanche.com.hk/offer-category/ground-improvement/>

<https://www.biblioconstruction.com/2019/09/renforcement-de-sol-par-inclusions.html>