



Université Mohamed khider –Biskra

Faculté d'Architecture, de l'Urbanisme, de Génie Civil et de l'Hydraulique

Département de Génie civil et d'Hydraulique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Filière : Génie Civil.

Spécialité : Géotechnique.

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :

**Sebaa Yamina**

## **Etude numérique du comportement du sol de fondation renforcé par colonne ballastée**

---

**Encadreur : DR. Benmeddour Djamel**

Année universitaire : 2024-2025

*A mes chères parentes*

*A mes seures Youssra et Malak*

*A mes amies Khaoula, Dina et Wissam*

## **REMERCIEMENTS**

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de thèse, M. Benmeddour Djamel, docteur à l'Université de Biskra, pour ses conseils et son soutien dans l'élaboration de cette thèse.

Je remercie les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail et d'avoir donné leurs précieux avis.

Enfin, je tiens à remercier tous mes professeurs et collègues du département de génie civil et d'Hydraulique de l'université Mohamed Khaider de Biskra.

## **Résumé**

Les sols aux propriétés médiocres constituent un obstacle majeur à la réalisation de projets de génie civil en raison de leur incapacité à résister aux charges. De nombreuses techniques ont donc été mises au point pour préparer le sol à supporter des structures.

La technique de renforcement par colonnes ballastées est la plus courante pour améliorer les sols mous en formant des colonnes de gravier compacté noyées dans le sol.

Dans ce contexte, Le mémoire est consacré à l'étude de certains facteurs qui peuvent affecter la performance de la colonne ballastée et le comportement du sol renforcé à travers des simulations numériques. Le problème de colonne ballastée est un problème tridimensionnel vu la symétrie géométrique et mécanique, nous avons étudié ce problème en axisymétrie par logiciel FLAC 2d.

**Mots clés :** les colonnes ballastées, le comportement du sol renforcé, étude numérique, FLAC 2d.

**Abstract**

Soils with poor properties are a major obstacle to civil engineering projects due to their inability to withstand loads. Numerous techniques have therefore been developed to prepare the ground to support structures.

The ballasted column reinforcement technique is the most common for improving soft soils by forming compacted gravel columns embedded in the soil.

In this context, the dissertation is devoted to the study of certain factors that can affect the performance of the ballasted column and the behavior of the reinforced soil through numerical simulations. As the ballasted column problem is a three-dimensional one, given its geometric and mechanical symmetry, we have studied this problem in axisymmetric using FLAC 2d software.

**Key words:** The ballasted column, the behavior of the reinforced soil, numerical stud, FLAC 2d.

## ملخص

تعتبر التربة ذات الخصائص الضعيفة عائقا رئيسيا أمام إنجاز مشاريع الهندسة المدنية لعدم قدرتها على مقاومة الأحمال ولهذا تم تطوير العديد من التقنيات التي تقوم بإعداد التربة لتحمل الهياكل.

ان تقنية التقوية بالأعمدة الحجرية هي التقنية الأكثر شيوعا لتحسين التربة الناعمة عن طريق تشكيل أعمدة من الحصى المضغوط والمرصوص في التربة.

وهذا الإطار خصصت هذه المذكرة لدراسة بعض العوامل التي قد تؤثر على اداء العمود الحجري وذلك من خلال محاكاة عددية. حيث ان مشكلة العمود الحجري مشكلة ثلاثية الابعاد نظرا لتمثيلها الهندسي والميكانيكي تدرس في حالة التناظر المحوري باستخدام برنامج FLAC 2d.

**الكلمات المفتاحية:** الاعمدة الحجرية، سلوك التربة المدعمة، دراسة رقمية، FLAC 2d.

# Table des matières

## *Introduction générale*

### **Chapitre 1 : Synthèse bibliographique**

|           |                                                                     |    |
|-----------|---------------------------------------------------------------------|----|
| I.1       | Introduction .....                                                  | 2  |
| I.2       | Les techniques de renforcement .....                                | 2  |
| I.2.1     | Les principaux problèmes de sol nécessitant un renforcement.....    | 2  |
| I.2.2     | But de renforcement des sols .....                                  | 2  |
| I.2.3     | Domaines d'application des différentes techniques.....              | 3  |
| I.2.4     | Les différentes techniques de renforcement.....                     | 4  |
| I.2.4.1   | Renforcement par inclusions rigides .....                           | 4  |
| I.2.4.1.1 | Jet-grouting.....                                                   | 4  |
| I.2.4.1.2 | CMC (colonnes à module contrôleur) .....                            | 5  |
| I.2.4.1.3 | CMM (colonnes à module mixte).....                                  | 6  |
| I.2.4.2   | Renforcement par inclusion souple .....                             | 7  |
| I.2.4.2.1 | Les géo-synthétiques .....                                          | 7  |
| I.2.4.2.2 | Les colonnes ballastées.....                                        | 8  |
| I.3       | Les colonnes ballastées.....                                        | 8  |
| I.3.1     | Amélioration des sols par colonnes ballastées .....                 | 8  |
| I.3.2     | Les principaux effets de l'utilisation de colonnes de ballast ..... | 9  |
| I.3.3     | Technique de mise en œuvre.....                                     | 9  |
| I.3.4     | Domaine d'application .....                                         | 16 |
| I.3.4.1   | Ouvrages .....                                                      | 17 |
| I.3.4.3   | Charges appliquées et tolérances imposées .....                     | 20 |
| I.4       | Caractéristiques des colonnes ballastées .....                      | 21 |
| I.4.1     | La longueur .....                                                   | 21 |
| I.4.1     | Le diamètre .....                                                   | 21 |

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.4.3 Maillage .....                                                                                          | 22 |
| I.5 Choix de matériaux .....                                                                                  | 22 |
| I.5.1 Matériaux constitutifs des colonnes .....                                                               | 22 |
| I.5.2 Exécution des semelles et radiers.....                                                                  | 23 |
| I.6 Mécanismes de comportement des colonnes ballastées .....                                                  | 25 |
| I.6.1 Paramètres caractéristiques .....                                                                       | 25 |
| I.6.1.1 Equation d'équilibre .....                                                                            | 26 |
| I.6.1.2 Taux d'incorporation.....                                                                             | 28 |
| I.6.1.3 Rapport de concentration des contraintes verticales .....                                             | 28 |
| I.6.1.4 Facteur de réduction de tassement.....                                                                | 28 |
| I.6.1.5 Cas particulier : Relation entre paramètres caractéristiques .....                                    | 29 |
| I.6.2 Comportement des colonnes ballastées au cours de temps.....                                             | 30 |
| I.6.2.1 La phase initiale .....                                                                               | 30 |
| I.6.2.2 La phase de consolidation .....                                                                       | 30 |
| I.6.2.3 La phase de fluage.....                                                                               | 30 |
| I.6.3 Modèle de comportement mécanique d'une colonne ballastée isolée sous chargement statique verticale..... | 31 |
| I.6.3.1 Comportement de la colonne sous une fondation souple .....                                            | 31 |
| I.6.3.2 Comportement de la colonne sous une fondation rigide .....                                            | 32 |
| I.6.4 Mécanismes et modes des ruptures des colonnes .....                                                     | 33 |
| I.6.4.1 Rupture par expansion latérale .....                                                                  | 34 |
| I.6.4.2 Rupture par cisaillement généralisé .....                                                             | 37 |
| I.6.4.3 Rupture par poinçonnement .....                                                                       | 37 |
| I.7 Conclusion .....                                                                                          | 39 |

## **Chapitre 2 : Présentation de logiciel FLAC**

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| II.1 Introduction .....                                     | 41 |
| II.2 Présentation de la méthode des différences finis ..... | 41 |
| II.3 Calculs en déformations planes (2D) .....              | 41 |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.4 Présentation de FLAC .....                                                      | 42 |
| II.4.1 Ecriture d'un fichier FLAC .....                                              | 42 |
| II.4.2 Principe de calcul.....                                                       | 44 |
| II.4.2.1 Equations du mouvement.....                                                 | 45 |
| II.4.2.2 Modèles de comportement pour les sols .....                                 | 46 |
| II.4.2.2.1 Elasticité .....                                                          | 47 |
| II.4.2.2.1.1 Elasticité linéaire isotrope ou loi de Hooke .....                      | 47 |
| II.4.2.2.2 Elastoplasticité de Mohr Coulomb .....                                    | 47 |
| II.4.2.2.2.1 Le critère de rupture de Mohr-Coulomb.....                              | 49 |
| II.4.2.2.2.2 La loi d'écoulement de Mohr-Coulomb .....                               | 50 |
| II.4.2.3 Implémentation des modèles de comportement mécaniques dans le logiciel..... | 51 |
| II.5 Conclusion.....                                                                 | 52 |

## **Chapitre 3 : Etude numérique**

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1 Introduction.....                                                        | 54 |
| III.2 Modélisation numérique .....                                             | 54 |
| III.3 Présentation du cas étudié .....                                         | 55 |
| III.3.1 Géométrie de modèle.....                                               | 55 |
| III.3.2 Propriétés des matériaux .....                                         | 55 |
| III.3.3 Maillage.....                                                          | 56 |
| III.3.4 Les conditions aux limites.....                                        | 57 |
| III.4 Procédure de modélisation.....                                           | 58 |
| III.5 Résultats et discussion .....                                            | 59 |
| III.6 Présentation d'études de cas .....                                       | 59 |
| III.6.1 Cas n°1 : Avant le renforcement .....                                  | 59 |
| III.6.2 Cas n°2 : Etude numérique du sol renforcé par colonnes ballastées..... | 61 |
| III.6.3 Présentation des résultats.....                                        | 64 |
| III.7 Influence du diamètre .....                                              | 65 |
| III.8 Influence de l'angle de frottement .....                                 | 66 |

III.9 Conclusion ..... 68

***Conclusion générale***

# Liste des symboles

|           |                                                                                   |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| $a$       | Taux d'incorporation                                                              |
| $A_c$     | Aire de la colonne                                                                |
| $A$       | Aire totale                                                                       |
| $A_s$     | Aire du sol                                                                       |
| $C_u$     | Cohésion non drainée du sol                                                       |
| $D_c$     | Diamètre de la colonne ballastée                                                  |
| $D_e$     | Diamètre de la cellule unitaire                                                   |
| $E_c$     | Module de déformation élastique du matériau constitutif de la colonnes ballastées |
| $E_s$     | Module de déformation élastique du sol traité                                     |
| $I_r$     | Indice de rigidité                                                                |
| $K$       | Coefficient multiplicateur                                                        |
| $K_s$     | Module de déformation volumétrique du sol                                         |
| $L$       | Longueur de la colonne                                                            |
| $L_{max}$ | Longueur maximale de la colonne ballastées                                        |
| $L_{min}$ | Longueur minimale de la colonne ballastées                                        |
| $n$       | Rapport de concentration des contraintes                                          |
| $P$       | Etreinte latéraux de la colonne                                                   |
| $P_l$     | Pression limite du sol mesuré                                                     |
| $q_c$     | Contrainte verticale effectif dans la colonne                                     |
| $q_s$     | Contrainte verticale effectif dans le sol                                         |
| $S_i$     | Tassement initiale avant traitement                                               |
| $S_f$     | Tassement final                                                                   |
| $t_i$     | Temps initial                                                                     |

|                  |                                                                               |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| $t_f$            | Temps final de transfert de charge                                            |
| $u$              | Pression interstitielle à la périphérie de la colonne                         |
| $Z$              | Profondeur d'un point considéré par rapport à la tête de la colonne ballastée |
| $\beta$          | Facteur de réduction des tassements                                           |
| $\gamma_c$       | Poids volumique du matériau de la colonne                                     |
| $\Delta\sigma_h$ | La contrainte de compression exercée dans le ballast                          |
| $\sigma_0$       | Contrainte verticale apportée par l'ouvrage                                   |
| $\sigma_c$       | Contrainte en tête de la colonne                                              |
| $\sigma_c$       | Contrainte verticale appliquée à la surface du sol traité                     |
| $\sigma_h$       | Contrainte horizontale que peut supporter le sol autour de la colonne         |
| $\sigma_{h0}$    | Contrainte totale horizontale régnant dans le sol avant traitement            |
| $\varphi_c$      | Angle de frottement du ballast                                                |

# Liste des figures

## Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

|                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1-1</b> : Réalisation d'une colonne de jet .....                                                                                                                   | 5  |
| <b>Figure 1-2</b> : Les colonnes de jet-grouting .....                                                                                                                       | 5  |
| <b>Figure 1-3</b> : Réalisation de colonnes à module contrôleur.....                                                                                                         | 6  |
| <b>Figure 1-4</b> : Coupe d'une colonne à module mixte .....                                                                                                                 | 7  |
| <b>Figure 1-5</b> : Colonne ballastée .....                                                                                                                                  | 8  |
| <b>Figure 1-6</b> : Les ballastes .....                                                                                                                                      | 10 |
| <b>Figure 1-7</b> : Mise en œuvre des colonnes ballastées par voie humide (Document de Keller).....                                                                          | 11 |
| <b>Figure 1-8</b> : Mise en œuvre des colonnes ballastées par voie sèche (Document de Keller).....                                                                           | 12 |
| <b>Figure 1-9</b> : Figure séquences de réalisation : vibreur à sas .....                                                                                                    | 12 |
| <b>Figure 1-10</b> : Engin utilisé pour la réalisation des plots ballastés.....                                                                                              | 13 |
| <b>Figure 1-11</b> : Mise en œuvre des colonnes ballastées par pilonnage .....                                                                                               | 14 |
| <b>Figure 1-12</b> : Chantier des colonnes ballastées dans la mer .....                                                                                                      | 15 |
| <b>Figure 1-13</b> : Exemple d'un système en double sas 5document de Soletanche Bachy) .....                                                                                 | 16 |
| <b>Figure 1-14</b> : Domaine d'application des techniques de renforcement et d'amélioration de sol<br>fonction de granulométrie du sol .....                                 | 17 |
| <b>Figure 1-15</b> : Matelas de répartition.....                                                                                                                             | 25 |
| <b>Figure 1-16</b> : Réseau de colonnes ballastées.....                                                                                                                      | 27 |
| <b>Figure 1-17</b> : Principe concentration des contraintes et réduction des tassements (Dhouib 2005) ..                                                                     | 28 |
| <b>Figure 1-18</b> : Fluage d'une colonne par manque de l'étreinte latérale .....                                                                                            | 31 |
| <b>Figure 1-19</b> : Répartition des contraintes verticales et horizontale et déformation axiale en surface<br>d'une colonne sous une fondation souple (Eggestad, 1983)..... | 32 |
| <b>Figure 1-20</b> : Répartition des contraintes verticales et horizontale et déformation axiale en surface<br>d'une colonne sous une fondation rigide (Eggestad, 1983)..... | 33 |
| <b>Figure 1-21</b> : Mécanisme de rupture d'un colonne ballastée isolé chargée en tête exécutée dans une<br>couche compressible .....                                        | 34 |
| <b>Figure 1-22</b> : Analogie colonne ballastée / éprouvette triaxial .....                                                                                                  | 35 |
| <b>Figure 1-23</b> : Caractérisation de la surface de rupture par cisaillement généralisé. ....                                                                              | 37 |
| <b>Figure 1-24</b> : Rupture par poinçonnement d'un colonne ballastée flottante isolée .....                                                                                 | 38 |

## **Chapitre 2 : Présentation de logiciel FLAC**

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 2-1 :</b> Procédé général de résolution des problèmes en géotechnique selon FLAC2D.....      | 44 |
| <b>Figure 2-2 :</b> Cycle élémentaire du calcul explicite par différences finies, d'après ITASCA. .... | 45 |
| <b>Figure 2-3 :</b> Critère de rupture de Mohr-Coulomb dans FLAC, d'après ITASCA. ....                 | 50 |

## **Chapitre 3 : Etude numérique**

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 3-1 :</b> Géométrie du modèle .....                                                                                                                      | 55 |
| <b>Figure 3-2 :</b> Maillage .....                                                                                                                                 | 57 |
| <b>Figure 3-3 :</b> Génération des deux maillages .....                                                                                                            | 57 |
| <b>Figure 3-4 :</b> Les conditions aux limites.....                                                                                                                | 58 |
| <b>Figure 3-5 :</b> Evolution de la capacité portante en fonction du déplacement verticale .....                                                                   | 59 |
| <b>Figure 3-6 :</b> Déplacement horizontal du sol sous et au voisinage de la semelle.....                                                                          | 60 |
| <b>Figure 3-7 :</b> Zones plastifiées dans le sol de fondation .....                                                                                               | 60 |
| <b>Figure 3-8 :</b> Mécanisme de rupture avant le renforcement .....                                                                                               | 61 |
| <b>Figure 3-9 :</b> Evolution de la capacité portante en fonction du déplacement verticale après le renforcement par colonne ballastée.....                        | 62 |
| <b>Figure 3-10 :</b> Déplacement horizontal du sol après le renforcement .....                                                                                     | 63 |
| <b>Figure 3-11 :</b> Zones plastifiées dans un massif de sol renforcé par colonne ballastée .....                                                                  | 63 |
| <b>Figure 3-12 :</b> Mécanisme de rupture après le renforcement .....                                                                                              | 64 |
| <b>Figure 3-13 :</b> Evolution de la capacité portante du sol renforcé en fonction du rayon de colonne ballastée.....                                              | 66 |
| <b>Figure 3-14:</b> La variation de la capacité portante du sol en fonction de l'angle de frottement interne du gravier, cas d'une colonne de rayon $R= 2$ m ..... | 67 |
| <b>Figure 3-15 :</b> La variation de la capacité portante du sol en fonction de l'angle de frottement et le rayon de la colonne ballastée .....                    | 67 |

# Liste des tableaux

## **Chapitre 1 : Synthèse bibliographique**

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 1-1 :</b> Domaine de validité des techniques de renforcement .....                                                                       | 3  |
| <b>Tableau 1-2 :</b> Champ d'application des colonnes ballastées : Nature et résistance des sols (Etreinte latérale)DHOUIB-colonnes ballastées..... | 19 |
| <b>Tableau 1-3 :</b> Limites d'application des colonnes ballastées : Charges appliquées et tolérances imposées [DHOUIB et BLONDEAU, 2005].....      | 21 |
| <b>Tableau 1-4 :</b> Caractéristiques du ballast pour colonnes ballastées.....                                                                      | 23 |
| <b>Tableau 1-5 :</b> définition du coefficient multiplicateur k [6] .....                                                                           | 36 |

## **Chapitre 3 : Etude numérique**

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 3-1 :</b> Les caractéristiques géotechniques ..... | 56 |
| <b>Tableau 3-2 :</b> Les résultants du calcul par FLAC .....  | 65 |

# Introduction générale

Les propriétés des sols et les paramètres géotechniques (la cohésion, coefficient de perméabilité et l'angle de frottement...) sont l'un des facteurs les plus importants affectant la stabilité des structures. En raison de l'expansion urbaine, des terrains aux propriétés médiocres sont utilisés et il devient nécessaire de les améliorer. De nombreuses techniques d'amélioration des sols ont vu le jour, qui diffèrent en termes de coût, d'efficacité et d'application en fonction du type de sol.

La technique des colonnes ballastées est l'une des techniques utilisées pour son efficacité et son coût économique. Cette technique est basée sur l'insertion de colonnes d'agrégats grossiers dans le sol à renforcer dans le but de :

- L'augmentation de la capacité portante.
- L'accélération de la consolidation.
- La réduction du tassement.
- L'élimination du risque de liquéfaction.

Ce mémoire vise à analyser le comportement des sols renforcés par des colonnes ballastées en étudiant l'effet de la modification des paramètres géotechniques (diamètre) et géométriques (l'angle de frottement) de la colonne sur la performance du sol. La méthode des différences finies a été adoptée pour simuler cette étude.

Cette mémoire est divisée en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre donne un aperçu des différentes techniques de renforcement du sol, en mettant l'accent sur la technique de la colonne ballastée.
- Ensuite, le deuxième chapitre introduit le logiciel FLAC 2d et présente le modèle de Mohr-Coulomb utilisé pour représenter le comportement du sol.
- Le dernier chapitre est consacré à l'étude numérique qui vise à comprendre le comportement du sol renforcé après avoir modifié le diamètre de la colonne et l'angle de frottement interne, en présentant les résultats et en les discutant.

## ***Chapitre 1***

# ***Synthèse bibliographique***

## **I.1 Introduction**

Les techniques de renforcement des sols constituent une solution au problème de l'inaptitude de certains terrains à supporter les ouvrages projetés.

Le premier chapitre de ce mémoire est divisé en deux parties :

- La première partie de ce chapitre présente un aperçu des techniques les plus couramment utilisées pour le traitement du sol.
- Quant à la deuxième partie, elle se concentre sur le traitement du sol par les colonnes ballastées, en expliquant les techniques de mise en œuvre et leurs domaines d'application, tout en étudiant le comportement de ces colonnes.

## **I.2 Les techniques de renforcement**

### **I.2.1 Les principaux problèmes de sol nécessitant un renforcement**

- **Sol compressible et les tassements**

Par exemple Les sols argileux, limoneux, tourbeux ou organiques sont sujets aux tassements sous charge, entraînant des affaissements des bâtiments et des infrastructures.

- **Sols liquéfiables**

En cas de séisme ou de fortes vibrations, certains sols sableux saturés d'eau peuvent perdre leur portance et se comporter comme un fluide.

- **Sol instable**

Glissements des terrains, pentes instables, sols gonflants.

- **Sols peu portants**

Remblais mal compactés, sable lâche.

### **I.2.2 But de renforcement des sols**

- Augmenter la résistance du sol pour améliorer sa capacité portante.
- Minimiser le risque de liquéfaction lors d'un tremblement de terre.
- Accélérer le processus de consolidation grâce à l'effet de drainage du ballast.
- Améliorer les caractéristiques mécaniques du sol traité.
- Contribuer à la stabilisation des barrages et des pentes.

- Minimiser les tassements sous les travaux appliqués.
- Faciliter le creusement de tunnels en terrain difficile.
- Assurer la stabilisation temporaire des travaux d'excavation sans avoir recours à des systèmes de support conventionnels. (I. Guebboub et Y. Hamadi.2015).

### I.2.3 Domaines d'application des différentes techniques

Les domaines d'application des techniques d'amélioration des sols sont déterminés par la nature et la taille des granulés de sol à traiter, et le tableau suivant montre le domaine de validité et les limites de leur application.

**Tableau1-1 : Domaine de validité des techniques de renforcement**

| Méthode                                                  | Types de sols                 |                                                                    |                              |                  |                 |                           |  |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------|-----------------|---------------------------|--|
|                                                          | Matériaux évolutifs<br>tourbe | Argiles très molles                                                | Argiles-limons compressibles | Remblais fins    | Sables graviers | Cailloux remblais à blocs |  |
| Amélioration de sols dans la masse                       | PRECHARGEMENT +DRAINAGE       |                                                                    |                              |                  |                 |                           |  |
|                                                          |                               |                                                                    |                              | VIBROCOMPACTAGE  |                 |                           |  |
|                                                          |                               |                                                                    |                              | COMPACTAGE       |                 |                           |  |
|                                                          |                               |                                                                    |                              | INJECTION SOLIDE |                 |                           |  |
| Renforcement des sols par inclusions souples             |                               | COLONNES BALLASTEES                                                |                              |                  |                 |                           |  |
|                                                          |                               | PLOTS BALLASTEES PILONNES<br>(Épaisseur < 5m)                      |                              |                  |                 |                           |  |
| Renforcement des sols par inclusions et éléments rigides |                               | ... DE TYPE PIEUX A REFOULEMENT / SANS REFOULEMENT et JET GROUTING |                              |                  |                 |                           |  |
|                                                          |                               | ... DE TYPE COLONNE DEEP SIOL MIXING                               |                              |                  |                 |                           |  |

**I.2.4 Les différentes techniques de renforcement**

Les techniques de renforcement des sols peuvent être divisées en deux catégories principales, le renforcement souple et le renforcement rigide, et les différences entre elles sont les suivantes.

**I.2.4.1 Renforcement par inclusions rigides**

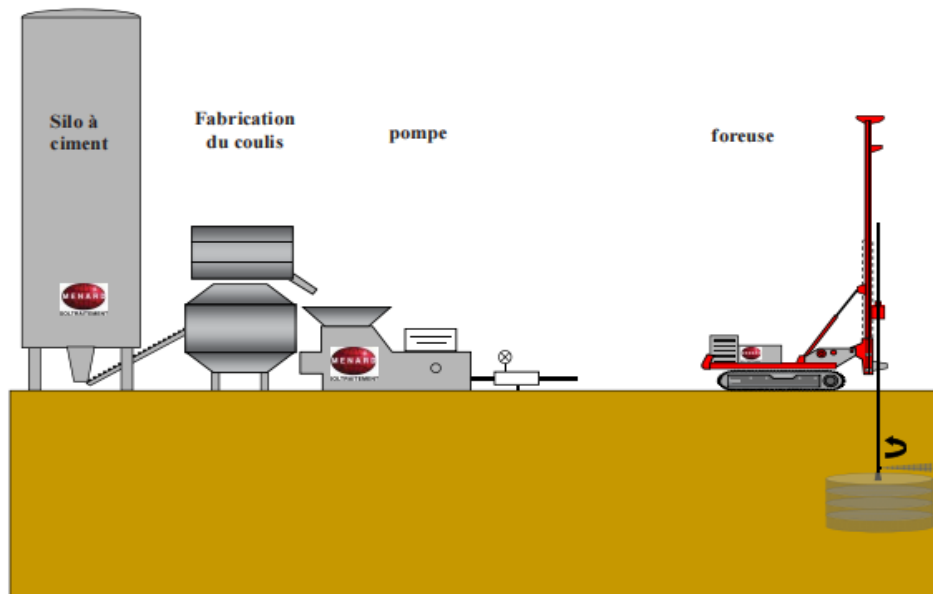
Ces techniques reposent sur l'utilisation d'éléments rigides pour transférer les charges directement aux couches de sol plus profondes et plus stables, notamment :

**I.2.4.1.1 Jet-grouting**

Il s'agit d'une technique de renforcement des sols qui consiste à injecter un coulis de ciment sous haute pression (plus de 400bar) pour créer des colonnes de sol traité. Elle est utilisée pour augmenter la résistance d'un large éventail de types de sols, y compris les sols meubles, sablonneux et argileux, et pour réduire leur perméabilité afin d'assurer la stabilité des structures.

Le processus de création d'une colonne de remplissage à jet comporte trois étapes principales :

1. Forage du trou : Cette opération s'effectue à l'aide d'une tige équipée d'une tête de forage conventionnelle, telle qu'une tête tricône, ainsi que d'un dispositif de jetting.
2. Ouverture du puits de jetting : Selon le type de technologie utilisé, le puits peut comporter une buse (jet simple) ou deux ou trois buses d'injection (jet double ou triple).
3. Restructuration du sol et injection de coulis : Dans les techniques de double ou triple injection, le sol est d'abord restructuré par l'injection d'air ou d'un mélange d'air et d'eau, avant que le coulis ne soit injecté séparément par une buse située au fond du puits de forage. (I. Zighmi et Ch. Messis.2008).



**Figure 1-1 :** Réalisation d'une colonne de jet



**Figure 1-2 :** Les colonnes de jet-grouting

#### **I.2.4.1.2 CMC (colonnes à module contrôleur)**

Il s'agit d'une inclusion solide réalisée par l'injection de mortier de béton dans le sol et qui sert à renforcer les sols compressibles et est souvent utilisée pour soutenir des structures lourdes.

Cette technique vise à minimiser les tassements tout en assurant une bonne répartition des charges.



**Figure 1-3:** Réalisation de colonnes à module contrôleur

**a) Domaine d'application**

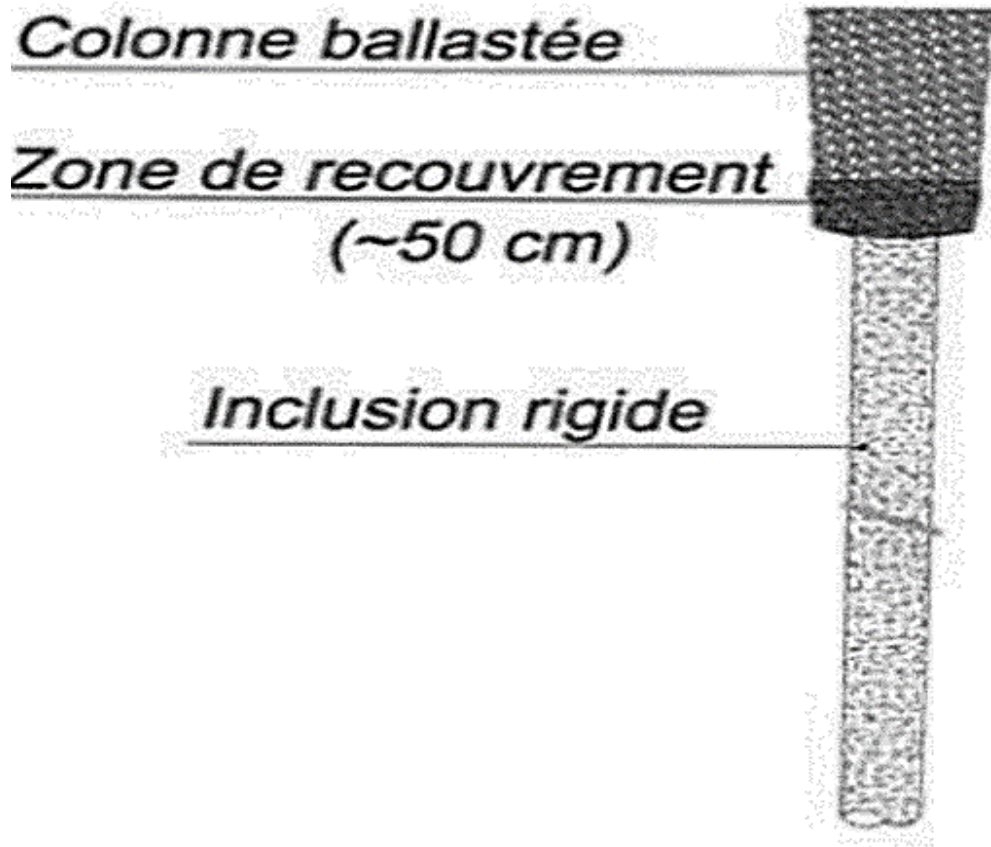
- Renforcement plusieurs types des sols (sol lâche, sol trop mou, sol tourbeux ou organique...).
- Charges très élevées.
- Tassement admissible très limité.

Les CMC présentent l'avantage de ne pas générer de vibrations ce qui permet de travailler en toute sécurité le long d'ouvrages mitoyens. (I. Zighmi et Ch. Messis.2008).

**I.2.4.1.3 CMM (colonnes à module mixte)**

Cette technique combine des matériaux rigides et souples et est particulièrement adaptée à tous les types des sols cohérents et pulvérulents ainsi qu'aux remblais. Ces colonnes sont composées de deux parties :

- La partie supérieure : Une colonne de (gravier, ballast...) qui assure le drainage et améliore le sol en répartissant la charge.
- La partie inférieure : une inclusion rigide par (coulis de ciment, mortier...) qui fournit une rigidité supplémentaire à la colonne. (I. Zighmi et Ch. Messis.2008).



**Figure 1-4 :** Coupe d'une colonne à module mixte

#### **I.2.4.2 Renforcement par inclusion souple**

##### **I.2.4.2.1 Les géo-synthétiques**

Un géo-synthétique (géogrilles, géotextiles, géo-composites...) est défini, selon la société internationale de géo-synthétique (IGS, 1998), comme un matériau polymérique (synthétique ou naturel) utilisé en contact avec le sol, roche ou autre matériau géotechnique dans les applications de l'ingénierie.

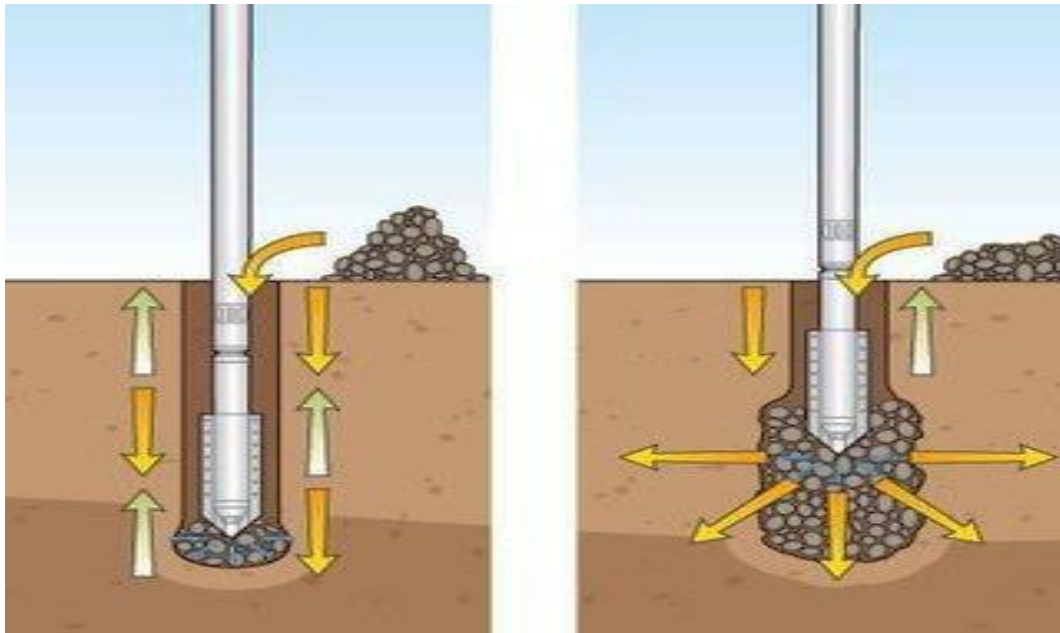
Selon la même société, ces matériaux peuvent assurer les fonctions suivantes : Améliorer la résistance des sols, le drainage de l'eau, filtration, protection du sol et séparation.

Les principaux domaines d'application des géo-synthétiques sont :

- Les remblais routiers et ferroviaires.
- Les fondations.
- Les remblais.
- Les murs de soutènement et stabilisation des talus. (B. Zighmi I.2011).

#### I.2.4.2.2 Les colonnes ballastées

Un maillage de colonnes constitué de matériaux granulaires (gravier, ballast) qui confère au sol de nouvelles caractéristiques sous la structure à construire.



**Figure 1-5 : Colonnes ballastées**

### I.3 Les colonnes ballastées

#### I.3.1 Amélioration des sols par colonnes ballastées

Les colonnes de ballast sont une technique utilisée pour renforcer le sol en incorporant des colonnes de gravier compacté dans le sol. Cette méthode est efficace pour les sols argileux ou limoneux qui contiennent plus de 10 à 15 % de limon et d'argile.

Les colonnes ballastées ne sont pas des éléments de fondation. Elles ont pour but de conférer de nouvelles caractéristiques générales et/ou locales au sol sous l'ouvrage à construire, afin que les différents éléments d'infrastructure de ce dernier (semelles isolées ou filantes, radiers, dallages...) aient un comportement prévisible et justifiable et compatible avec les règlements et tolérances applicables à la structure de l'ouvrage et à son exploitation. Il permet de maîtriser le comportement des fondations superficielles du futur ouvrage.

Ils sont constitués d'un matériau pulvérulent ayant une capacité de charge élevée, ce qui leur permet d'agir comme un support de drainage efficace. En outre, ils améliorent non seulement la capacité portante du sol, mais aussi son taux de cohésion, ce qui garantit une plus grande stabilité de la structure. (O. Guerroui.2018).

**I.3.2 Les principaux effets de l'utilisation de colonnes de ballast**

- Augmenter la capacité portante du sol.
- Accélérer la consolidation grâce au rôle du ballast dans le drainage de l'eau.
- Homogénéisation des caractéristiques géotechniques du sol.
- Minimiser les tassements sous les charges appliquées.
- Améliorer la stabilité générale des remblais.
- Augmentation des caractéristiques équivalentes du massif de sol traité (la résistance au cisaillement horizontal, l'angle de frottement interne et les paramètres de déformation).
- Réduire le risque de liquéfaction. (O. Guerroui.2018).

**I.3.3 Technique de mise en œuvre**

Les colonnes ballastées peuvent être installées en utilisant diverses méthodes d'exécution :

- ✓ Par voie humide
- ✓ Par voie sèche

**a) Colonnes ballastées par voie humide**

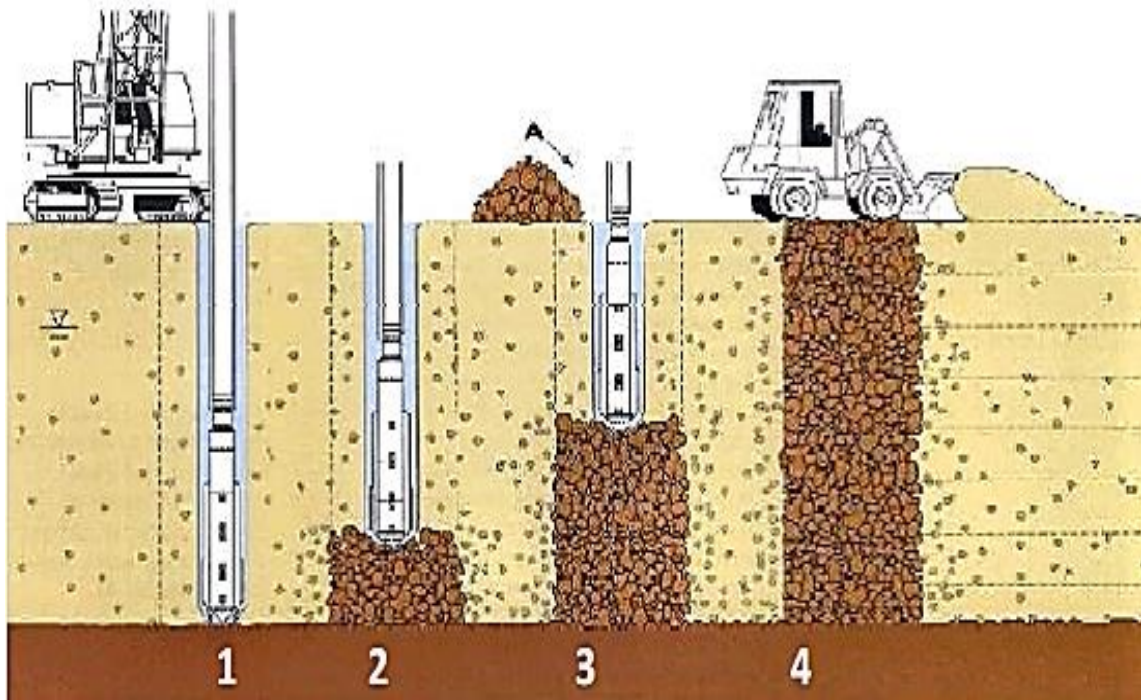
La mise en place des colonnes ballastées par voie humide, dite aussi par vibro-substitution (vibro-remplacement en anglais) consiste à :

- Afin de réaliser la colonne ballastée, le vibreur avec les tubes prolongateurs est placé au-dessus du point projeté.
- Après démarrage du moteur, le vibreur est descendu lentement.
- Dès le début de l'opération, le sol est saturé en eau et les vibrations de l'outil génèrent un phénomène local et temporaire de liquéfaction du sol.
- Le vibreur, avec les tubes de rallonge, descend alors rapidement dans le sol sous l'effet de son propre poids.
- Lorsque la profondeur de traitement requise est atteinte, le lançage à eau est réduit, de telle façon que l'espace annulaire autour du vibreur et ses extensions reste ouvert grâce à la pression hydrostatique.

- Les matériaux d'apport sont alors introduits dans le trou pendant que l'alimentation permanente en eau assure que les matériaux atteignent bien la base du vibreur et que les particules fines du sol en place soient bien évacuées hors du trou.
- En remontant et redescendant le vibreur de façon contrôlée par passes successives jusqu'à la surface, le matériau d'apport est expansé et compacté dans le sol en place pour former la colonne ballastée. (A. Dhouib et F. Blondeau).



**Figure 1-6 : Les ballastes**

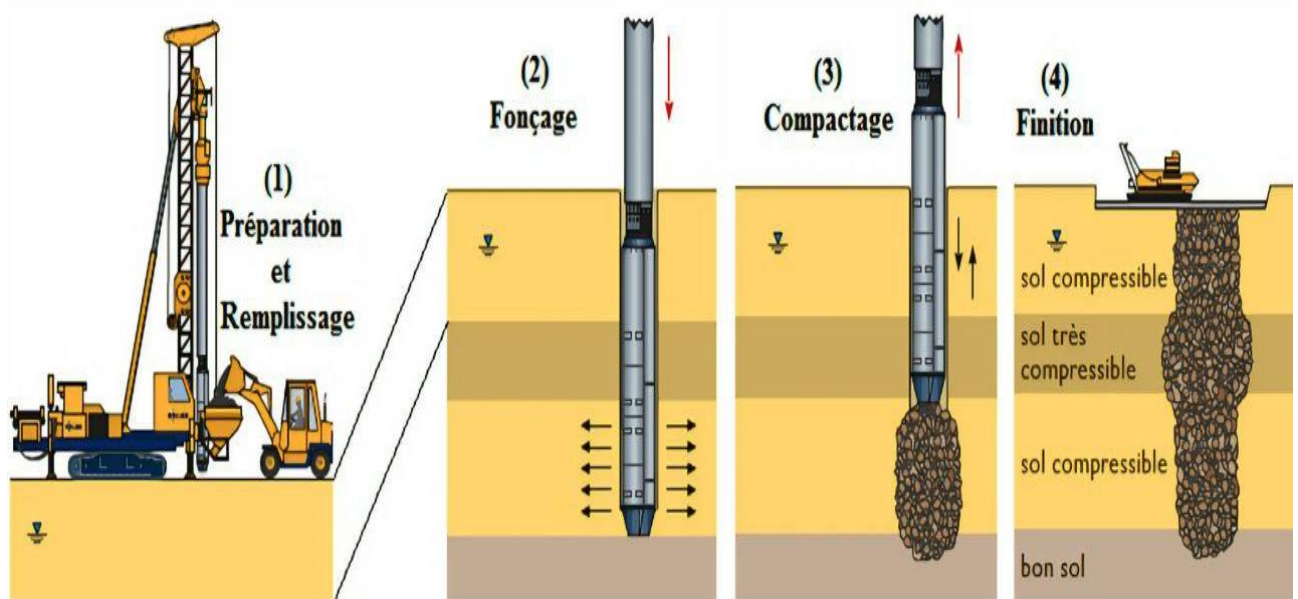


**Figure 1-7 :** Mise en œuvre des colonnes ballastées par voie humide (Document de Keller)

#### **b) Colonnes ballastées par voie sèche**

La réalisation des colonnes ballastées par voie sèche, dite encore par vibro-refoulement (vibro-displacement en anglais) ou vibreur à sas consiste à :

- La machine est mise en station au-dessus du point de fonçage, et stabilisée sur ses vérins. Un chargeur à godet assure l'approvisionnement en agrégats.
- Le contenu de la benne est vidé dans le sas, après sa fermeture, l'air comprimé permet de maintenir un flux continu de matériau jusqu'à l'orifice de sortie.
- Le vibreur descend, en refoulant latéralement le sol, jusqu'à la profondeur prévue, grâce à l'insufflation d'air comprimé et à la poussée sur l'outil.
- Lorsque la profondeur finale est atteinte, le vibreur est légèrement remonté et le matériau d'apport se met en place dans l'espace ainsi formé, puis le vibreur est redescendu pour expanser le matériau latéralement dans le sol et le compacter.
- La colonne est exécutée ainsi, par passes successives, jusqu'au niveau prévu. Les semelles de fondations sont réalisées de manière traditionnelle. (A. Dhouib et F. Blondeau).

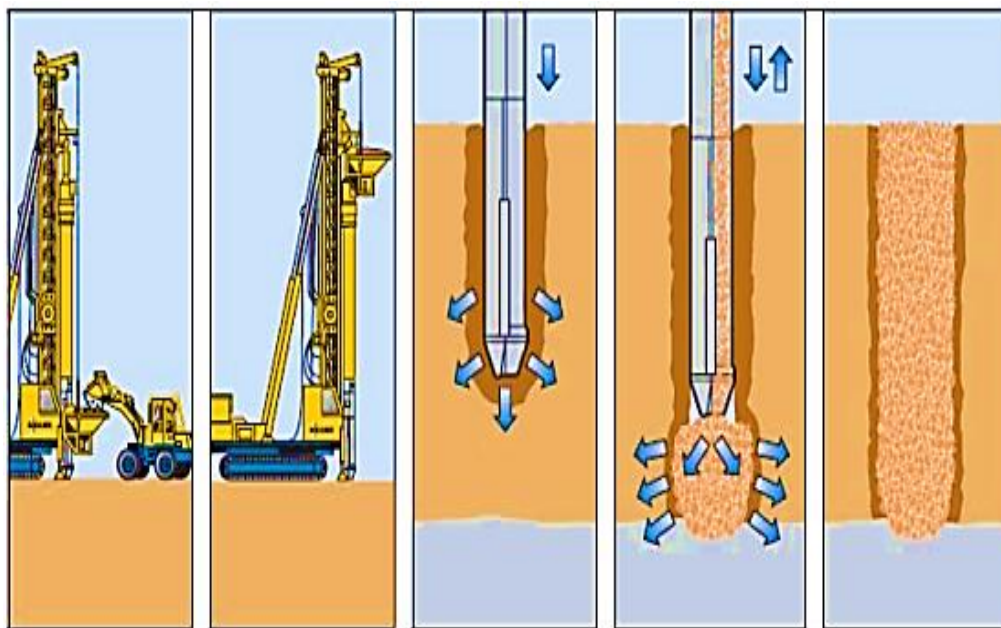


**Figure 1-8 :** Mise en œuvre des colonnes ballastées par voie sèche (Document de Keller)

### c) Les colonnes ballastées à sas

La méthode est la même que pour les deux méthodes précédentes à l'exception du remplissage en matériau qui s'effectue par la base, avec application constante d'une pression d'air sur le ballast.

Cette méthode est de plus en plus utilisée, cependant il faut veiller à ce que la dimension des grains du ballast n'excède pas 35mm au risque de bloquer le sas. Cette méthode peut être indifféremment exécutée par voie humide ou voie sèche. (A. Romain.2010).



**Figure 1-9 :** Figure séquences de réalisation : vibreur à sas

**d) Colonnes ballastées pilonnées**

Le principe de cette technique est le renforcement du sol par la création de colonnes de 2 à 3m de diamètre en matériaux granulaires très compactés. Les colonnes ainsi formées sont appelées Plots ballastes pilonnés (substitution dynamique).

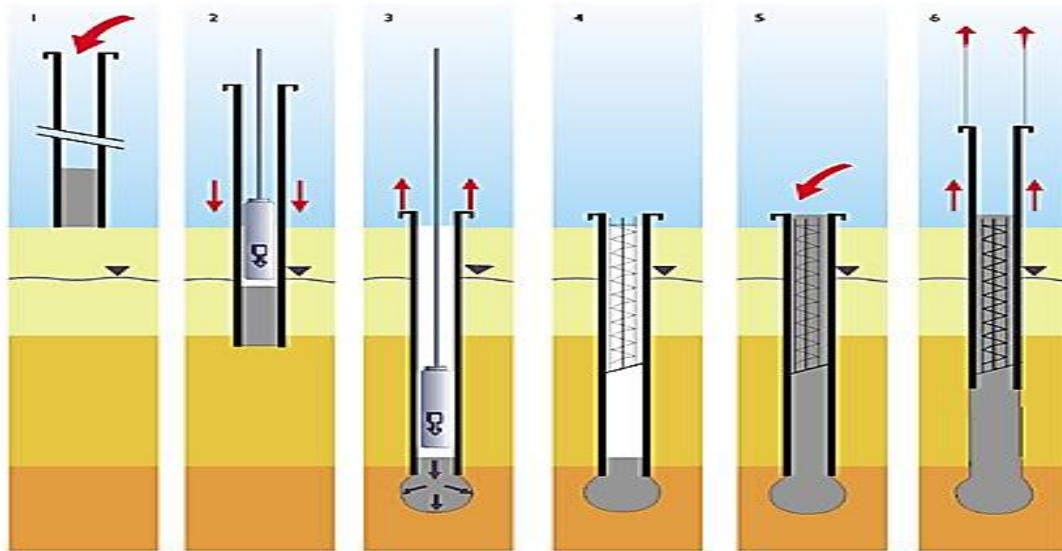
Les plots ballastés vont pénétrer dans le sol par pilonnage, à l'aide d'une masse de 15 à 30 tonnes, en chute libre de 10 à 30 mètres. L'emplacement du plot est préparé par une pré excavation qui va être partiellement remplie d'un bouchon de matériaux que le pilonnage fera descendre à la profondeur voulue. Le plot est ensuite rechargé puis compacté par phases successives.

Les phases de réalisation d'un puits (ou plots) ballastés sont les suivantes :

- Création d'une plate-forme de travail en ballast.
- Poinçonnement de la plate-forme avec un pilon descendu d'une hauteur de chutes variables (15 à 30 m) et compatibles avec le matériel employé.
- Après plusieurs impacts, remplissage du cratère (cavité) par du ballast.
- Reprise du pilonnage jusqu'au refus fixé au préalable. (A. Noui.2012).



**Figure1-10** : Engin utilisé pour la réalisation des plots ballastés



**Figure 1-11 :** Mise en œuvre des colonnes ballastées par pilonnage

#### e) Colonnes ballastées en mer

L'amélioration des sols d'assise des fondations est parfois nécessaire sous les ouvrages marins (jetées et murs de quai). L'application du procédé terrestre aux milieux aquatiques nécessite des moyens et des techniques différentes.

Il existe deux façons de créer des colonnes de ballast sous la mer :

- la méthode du tapis de ballast, qui consiste à mettre en œuvre les colonnes par voie humide avec alimentation en ballast par le haut.
- l'exécution des colonnes par voie humide avec alimentation en ballast par le bas, à l'aide d'une trémie- réservoir unique.

Ces deux techniques présentent l'inconvénient majeur de ne pas permettre de vérifier avec précision le volume de ballast incorporé dans une colonne, globalement et en fonction de la profondeur.



**Figure 1-12 :** Chantier des colonnes ballastées dans la mer

Il existe aujourd'hui un procédé novateur (Debats et Degen, 2004), qui consiste à réaliser des colonnes ballastées sous les structures offshore pas voie sèche en utilisant un double sas (« Double Lock Dry Bottom Feed »). Ce procédé breveté de « pompe à graviers à double sas en site marin » (Marine Double Gravel Pump) présente un degré de fiabilité et d'assurances qualité similaire à celui de la voie sèche en site terrestre et même, d'après certaines entreprises spécialisées, meilleur encore grâce à l'emploi d'un double sas. (I.Guebboub et Y. Hamadi. 2015)

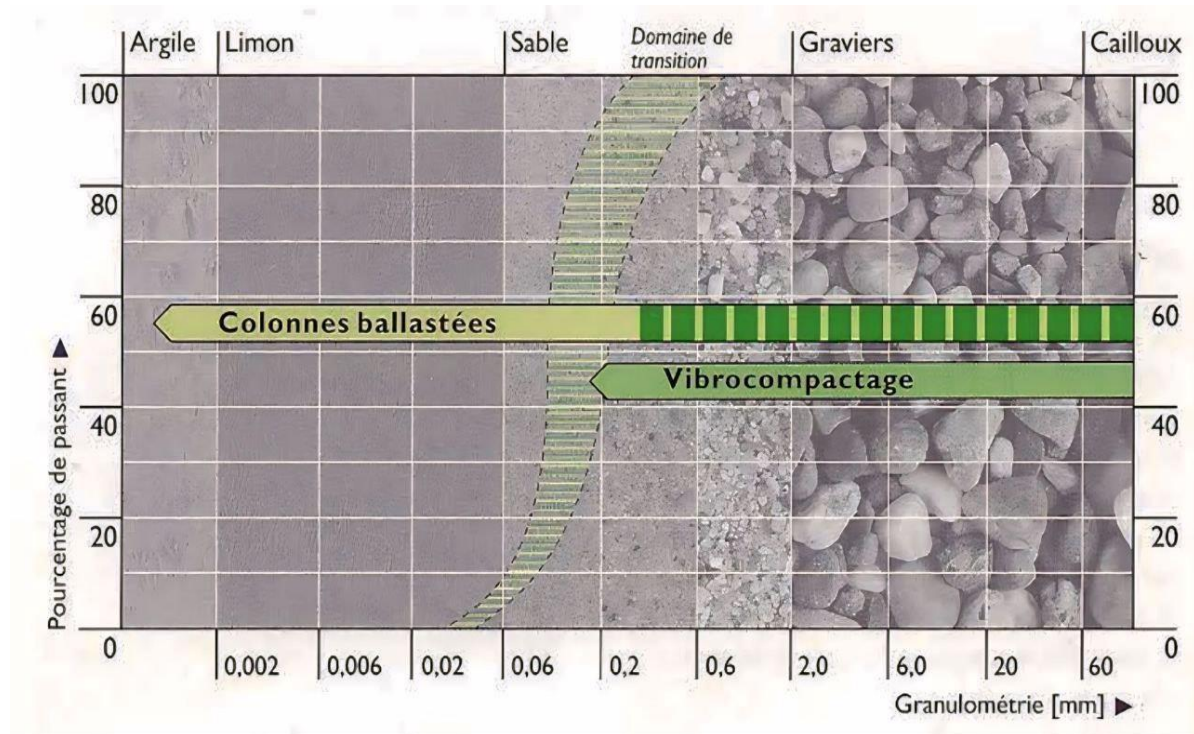


**Figure 1-13 :** Exemple d'un système en double sas document de Soletanche Bachy)

### **I.3.4 Domaine d'application**

En principe les colonnes ballastes peuvent être mises en place dans tout type de sol comportant plus de 10 à 15% de limons/argiles, et dont les caractéristiques mécaniques sont médiocres à faibles (sables limoneux, limons argileux, argiles, remblais hétérogènes...).

Pour les matériaux pulvérulents composés d'une faible quantité de fines (passant à 80 microns <15%) l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol est réalisée par la méthode des vibro-compactage, elle consiste en une réorganisation des grains constitutifs du sol sous l'effet des vibrations, sans apport des matériaux. (A. Laimeche.2017).



**Figure 1-14 :** Domaine d'application des techniques de renforcement et d'amélioration de sol fonction de granulométrie du sol

#### I.3.4.1 Ouvrages

Les utilisations les plus fréquentes des traitements par colonnes ballastées concernent des ouvrages ou existent des dallages et radiers recevant des charges surfaciques et susceptibles d'accepter des tassements :

- Halls de stockage.
- Bâtiments industriels et commerciaux.
- Silos et réservoirs de toute nature.
- Ouvrages hydrauliques étanches (réservoirs, station d'épuration).

Par extension, on peut les utiliser sous d'autres types d'ouvrages dans la mesure où les déformations résiduelles du sol traité et du sol sous-jacent sont compatibles avec la structure de l'ouvrage sous l'exploitation et les prescriptions techniques associées :

- En génie civil (routes, remblais, ouvrages d'art, murs de soutènement) ou maritime (renforcement de fonds marins, lacustres ou fluviaux).
- Sous fondations superficielles de bâtiments.

Elles peuvent également être utilisées dans des remblais hétérogènes non évolutifs, ou un traitement systématique avec un maillage régulier et adapté permet d'en améliorer et/ou homogénéiser les caractéristiques, afin de les rendre aptes à fonder superficiellement les ouvrages projetés. (A. Mekaoussi.2013).

#### I.3.4.2 Sols concernés

Les colonnes ballastées sont réalisées dans les sols mous non organiques (argile molle, limon), dans les sables fins argileux et/ou limoneux décomprimés et dans les remblais anthropiques inertes. La stabilité de la colonne est assurée par le confinement qu'exerce latéralement le sol, qui doit présenter une étreinte latérale suffisante.

Le tableau (1.2) détaille les sols concernés par l'amélioration des sols par colonnes ballastées et les résistances latérales (ou étreinte latérale) que peut offrir le sol pour la stabilité de la colonne.

**Tableau 1-2 :** Champ d'application des colonnes ballastées : Nature et résistance des sols (Etreinte latérale)[*DHOUIB – colonnes ballastées*]

| Sol                           | Faisabilité | Eteinte latérale |             |                 |          | Remarques         |
|-------------------------------|-------------|------------------|-------------|-----------------|----------|-------------------|
|                               |             | P1<br>(kPa)      | qc<br>(Mpa) | Nspt<br>(coups) | Cu (kPa) |                   |
| <b>Argile</b>                 | Oui         | 150-400          | 0.6-12      | 4-6             | 25-50    | -                 |
| <b>Limon</b>                  | Oui         | 150-400          | 0.6-12      | 4-6             | -        | -                 |
| <b>Sable fin lâche</b>        | Oui         | 150-400          | 0.6-12      | 4-6             | -        | -                 |
| <b>Tourbe</b>                 | Non         | -                | -           | -               | -        | Matériau évolutif |
| <b>Autres sols organiques</b> | Non         | -                | -           | -               | -        | Matériau évolutif |
| <b>Remblai inerte</b>         | Oui         | 200-500          | 0.6-1.6     | -               | -        | -                 |
| <b>Décharge</b>               | Non         | -                | -           | -               | -        | Matériau évolutif |

Les indices qui sont définis dans le tableau ci-dessus sont définis comme suit :

- (1) La valeur de l'étreinte latérale est la moyenne du profil de mesure sur la hauteur du traitement ou sur la hauteur de moindre résistance du sol ; les recommandations pour le contrôle de la conception et l'exécution des colonnes ballastées de CORPEC (2004) fixent une cohésion non drainée minimale de 40kPa pour la faisabilité du traitement par colonnes ballastées, ce qui correspond à une pression limite nette, mesurée au pressiomètre Louis Ménard de 220 kPa, conformément aux corrélations usuelles.
- (2) Dans la littérature nationale et internationale, il y a quelques cas où les cohésions non drainées des sols traités par colonnes ballastées sont plus faibles (de l'ordre de 10 à 15 kPa), mais il s'agit généralement de traitement sous remblais ou sous radiers souples.
- (3) La possibilité du traitement par colonnes ballastées dépend de la teneur en matériaux organiques des sols mous ; lorsqu'elle dépasse 10 à 15% sur des hauteurs dépassant le demi-diamètre de la colonne, le sol ne peut pas être stable dans le temps, et les colonnes ballastées sont à exclure.
- (4) Lorsque les remblais, même inertes, sont très hétérogènes (présence de blocs), la mise en œuvre des colonnes peut être rendue difficile (pré-forage) ; de plus, l'hétérogénéité globale entre points traités, peut générer des tassements différentiels qu'il convient d'analyser avec précision, en fonction de la nature de la structure projetée et des tolérances imposées.

Les colonnes ballastées ne doivent pas être utilisées dans des terrains présentant des risques de perte dans le temps des caractéristiques volumétriques et/ou mécaniques, notamment les décharges d'ordures ménagères, les tourbes et, de manière générale, les sols présentant une perte au feu supérieur à 5%. (B. Zighmi.2011).

#### **I.3.4.3 Charges appliquées et tolérances imposées**

Les domaines d'application des colonnes ballastées sont en constante évolution, influencés par les progrès technologiques et les améliorations ciblées de ces méthodes. Les colonnes ballastées sont particulièrement utilisées pour soutenir les fondations superficielles, notamment dans les projets impliquant des dalles et des pontons, des bases continues ou discrètes, qui supportent des charges superficielles et réglables. Les principales applications sont les suivantes :

- Halls de stockage.
- Bâtiments industriels et commerciaux.
- Silos et réservoirs de toute nature.

- Piste d'aéroport.
- Stabilisation des talus.
- Ouvrages hydrauliques étanches (réservoirs, station d'épuration).
- Ouvrages en terres : remblais, routes et autoroutes.

Il est également possible d'utiliser les colonnes en zone sismique où elles peuvent contribuer à la diminution du potentiel de liquéfaction des sols. (Article R 111-40 ; 2011).

**Tableau 1-3 :** Limites d'application des colonnes ballastées : Charges appliquées et tolérances imposées [DHOUIB et BLONDEAU, 2005].

| Type d'ouvrage   | Hauteur/épaisseur (m) | Contrainte appliquée(kPa) | Descente charge | Tassement absolu (cm) | Tassement différentiels (cm) |
|------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------|
| Remblais         | 2-12                  | 40-250                    | -               | 2-20                  | 2-5                          |
| Dallages         | 0.12-0.20             | 10-50                     | -               | <2                    | <1                           |
| Radiers          | 0.30-0.60             | 50-80                     | -               | 3-5                   | 1                            |
| Semelles isolées | -                     | -                         | 150-1500<br>KN  | 1-2                   | 0.5                          |
| Semelle filant   | -                     | -                         | 100-300<br>KN/m | 1-2                   | 0.5                          |

## I.4 Caractéristiques des colonnes ballastées

### I.4.1 La longueur

D'une façon générale, les longueurs de colonnes ballastées sont plus importantes en mer qu'en terre.

D'après les entreprises spécialisées et les informations recueillies dans la littérature, les profondeurs des colonnes ballastées nécessaires dans le cas des ouvrages marins atteignent souvent 10 à 30 m ; dans le cas des ouvrages terrestres, les profondeurs de traitement sont variables mais restent en moyenne autour de 8 à 10m, sans excéder 20 à 25m.

### I.4.1 Le diamètre

Le diamètre des colonnes ballastées dépend :

- De l'outil utilisé et de l'adéquation de ce choix au terrain rencontré.

- Des terrains traversés et de leurs caractéristiques.
- De l'énergie totale dépensée (puissance mise en œuvre, poussée verticale éventuelle et temps passé).

Le diamètre de la colonne peut varier sur sa hauteur, en fonction des différences de résistance des couches traitées. (Article R 111-40 ; 2011).

Toutes choses égales par ailleurs, le diamètre de la colonne est plus important par voie humide que par voie sèche, du fait de l'extraction de sol produite par le lançage à l'eau.

Les diamètres usuels par voie sèche sont compris entre 50 et 80cm et il est possible de réaliser des diamètres importants (80 à 120cm) par voie humide. (Article R 111-40 ; 2011).

### I.4.3 Maillage

L'espacement des points de compactage détermine les propriétés du sol à la profondeur traitée. Le procédé doit assurer une incompressibilité et une résistance adéquates pour un espacement maximal et donc un cout minimal.

Le dimensionnement du réseau de colonnes dans le sol est réalisé en fonction des charges qui seront appliquées par le projet et des tassements admissibles.

La maille de référence minimale est de 2,4 m<sup>2</sup>. Pour les semelles filantes et les groupes de deux à cinq colonnes, l'espacement entre axes de colonnes n'est pas inférieur à 1,5Ø et 1,20 m. (Article R111-40, 2011).

## I.5 Choix de mâtereaux

### I.5.1 Matériaux constitutifs des colonnes

Les matériaux d'apport doivent être de qualité et de granulométrie contrôlées et les plus homogènes possibles. Le choix se portera sur des graves naturelles, roulées ou concassées de granulométrie suivante :

|                         |                         |                           |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| d <sub>5</sub> > 0.1 mm | d <sub>30</sub> > 30 mm | d <sub>100</sub> < 160 mm |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|

- Le fuseau granulométrique doit être choisi selon la fonction essentielle que l'on veut conférer à la colonne ballastée.
- L'angle de frottement du ballast  $\varphi$  varie entre 35° à 46°.

- La roche constituant les éléments du matériau d'apport doit avoir des caractéristiques mécaniques élevées ( $R_c > 25 \text{ Mpa}$ ) et ne pas être délitable ni sujette à l'attrition.
- Les caractéristiques minimales des matériaux d'apport sont les suivantes :

LA < 35                      Où : LA : essai Los Angeles, norme NF P 18573.

MDE < 30                      MDE : essai Micro Deval, norme NF P18572.

LA + MDE < 60

La granulométrie dépend essentiellement du matériel. Les vibreurs avec alimentation en pied y sont plus sensibles une granulométrie inadaptée est source de bouchons dans le tube.

On peut retenir les valeurs indicatives suivantes :

- Vibreur a tube latéral de remplissage par le bas : en termes de fuseau granulométrique, le plus couramment utilisé est le fuseau 8/40.
- Autres procédés : en termes de fuseau granulométrique, celui qui est le plus couramment utilisé est le fuseau 20/75.
- Le critère de propreté est le suivant : le passant inférieur à  $80 \mu\text{m}$  est inférieur à 5%. (Article R 111-40 ; 2011).

Les caractéristiques adoptées pour le ballast servant à la réalisation des colonnes ballastées dans la pratique courante sont résumées dans le tableau (1.4)

**Tableau 1-4 : Caractéristiques du ballast pour colonnes ballastées**

|                                   | <b>Ordres de grandeur</b> | <b>Remarques</b>                              |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Dimensions du ballast (mm)</b> | 40 /60                    | Voie humide                                   |
|                                   | 12/40                     | Voie sèche                                    |
| <b>Indice de Concassage (%)</b>   | >80                       | -                                             |
| <b>LA</b>                         | <25-35*                   | Essai « Los Angeles »<br>(Norme NF EN 1097-2) |
| <b>MDE</b>                        | <25-30*                   | Essai « Micro-Deval »<br>(Norme NF EN 1097-1) |
| <b>(LA+MDE)</b>                   | <40-60*                   | -                                             |
| <b>Pourcentage de fines**</b>     | <5 %                      | -                                             |

### I.5.2 Exécution des semelles et radiers

Ceux-ci doivent être réalisés de la même manière que dans un sol naturel, ils peuvent être coulés à pleine fouille ou coffres. Lorsque la base de la semelle est à moins de 50 cm sous le niveau de la plate-forme de travail, la tête de la colonne doit être recompactée pour garantir les caractéristiques prises en compte dans les calculs.

Ce décompactage peut faire partie du re-compactage de la plate-forme. (Article R 111-40 ; 2011).

### I.5.3 Matériaux de matelas de répartition

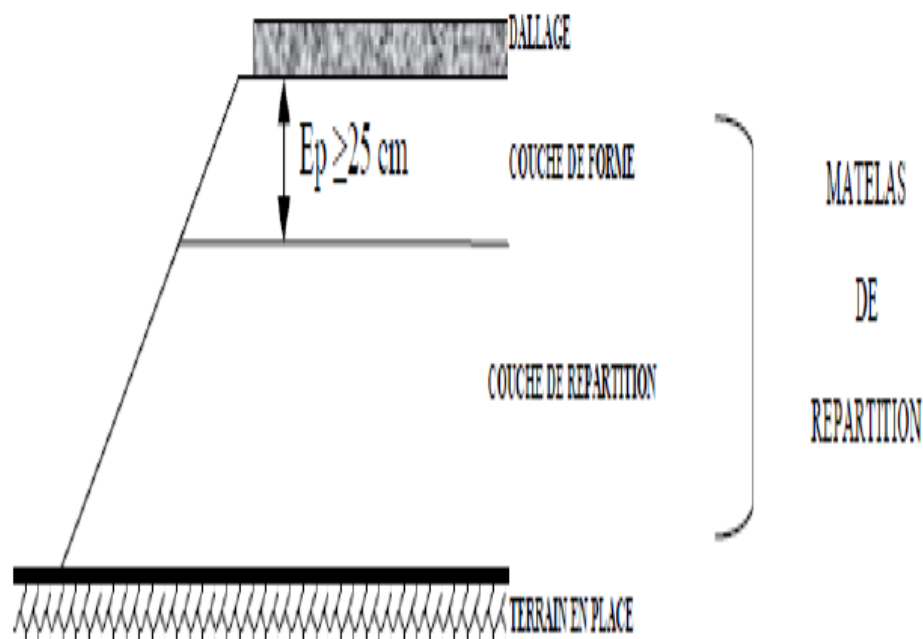
Le DTU 13.2 stipule qu'un groupe de colonnes ballastées est toujours coiffé par une couche de répartition. Il s'agit d'une couche épaisse de matériau graveleux et c'est souvent la plateforme de travail elle-même qui joue le rôle de couche de répartition ». Lorsque le matelas de répartition sert de plate-forme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

Les recommandations pour le contrôle de la conception et de l'exécution des colonnes ballastées du COPREC (2001) précise que l'épaisseur du matelas de répartition dépend de plusieurs facteurs tels que la nature et l'intensité des charges, le type de fondations (cas des dallages armés ou non), le module de déformation du matériau du matelas et du sol encaissant et les caractéristiques des colonnes ballastées (diamètre, maillage). Il stipule enfin que l'épaisseur du matelas doit être d'au moins 0.5 m

sous les charges réparties avec des entraxes entre colonnes d'au plus 3 m et que le matelas n'est pas nécessaire sous les éléments de fondation rigide (semelle isolées, semelles filantes).

Il est rare que le matelas de répartition soit réalisé en matériau similaire à celui des colonnes. En pratique courante, le matelas est mis en place par l'entreprise chargée des terrassements sous forme de grave naturelle (0-31 mm ou 0-80 mm) ou grave-ciment sur grave naturelle, voire de limon traité. L'épaisseur du matelas varie en pratique entre 0.3 et 1m.

En pratique, hors zone sismique, les semelles isolées et filantes ainsi que les radiers ne nécessitent en générale aucun matelas contrairement aux dallages, armés ou non. (A. Noui.2012)



**Figure 1-15 : Matelas de répartition**

### I.6 Mécanismes de comportement des colonnes ballastées

La compréhension du comportement des colonnes ballastées de leur construction jusqu'au le transfert total de la charge en tête des colonnes est essentielle pour faire un bon dimensionnement et choisir le bon matériau d'apport pour cet élément d'amélioration des sols.

Les mécanismes de fonctionnement des colonnes ballastées dépendent :

- de la disposition des colonnes, colonnes isolées ou en groupe.
- du mode de chargement, fondation rigide ou souple.

- du type de colonne (ancrée ou flottante).
- de la nature du sol à améliorer.
- du matériau employé. (A. Noui.2012).

### I.6.1 Paramètres caractéristiques

L'étude du comportement et du dimensionnement des colonnes ballastées conduit à introduire les paramètres caractéristiques usuels suivant :

- le taux d'incorporation (ou coefficient de substitution), noté  $a$ .
- le rapport de concentration des contraintes, noté  $n$ .
- le facteur de réduction des tassements, noté  $\beta$ .

Rappelons d'abord, les équations qui régissant l'équilibre du modèle sol/colonne. (A. Noui.2012).

#### I.6.1.1 Equation d'équilibre

En admettant que les déformations radiales s'annulent à mi-chemin entre deux colonnes du centre du réseau de colonnes ballastées, ce que suppose que la colonne est confinée, on peut introduire le principe de la cellule unitaire (Ghionna et Jamiolkowski, 1981, Figure 1.16). La charge verticale appliquée en moyenne à la surface du sol  $\sigma_0$  se répartit, à la surface du domaine cylindrique, entre les colonnes et le sol en proportion de leurs aires respectives.

La Figure 1.16 représente une charge répartie sur une fondation reposant sur un sol traité par colonnes ballastées, les paramètres caractéristiques d'un sol traité est défini comme suit :

L'aire de la colonne est donnée par :

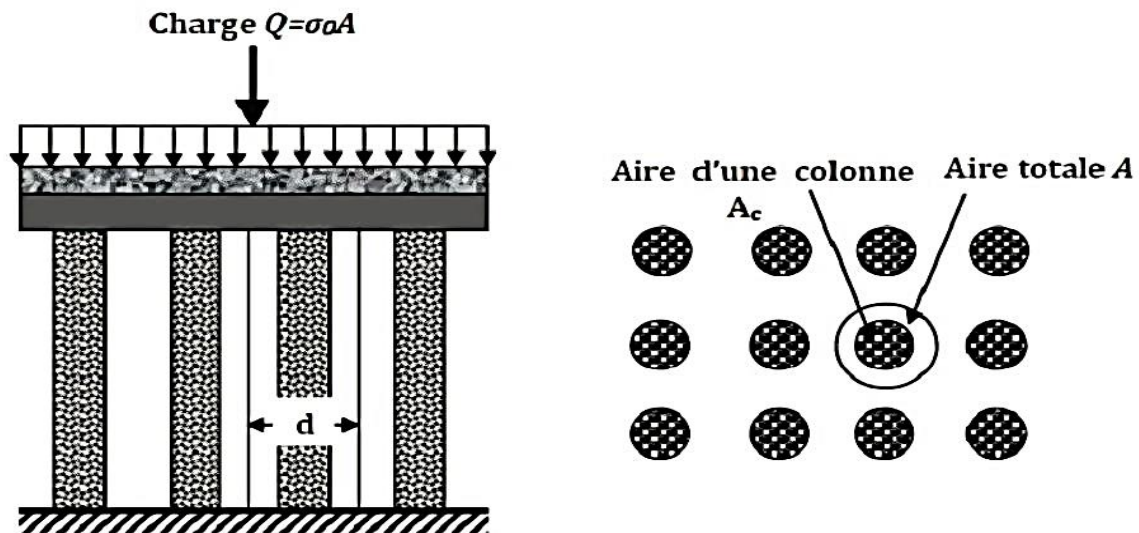
$$A_c = \frac{\pi D_c^2}{4} \quad (1-1)$$

L'aire totale de la cellule unitaire est donnée par :

$$A = \frac{\pi D_e^2}{4} \quad (1-2)$$

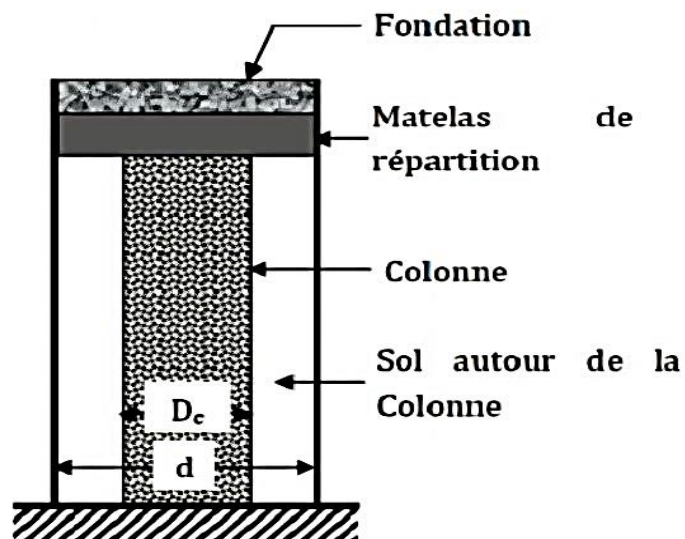
L'aire du sol est donnée par :

$$A_s = A - A_c \quad (1-3)$$



a- Réseau de colonnes ballastées

b- Vue en plan du réseau

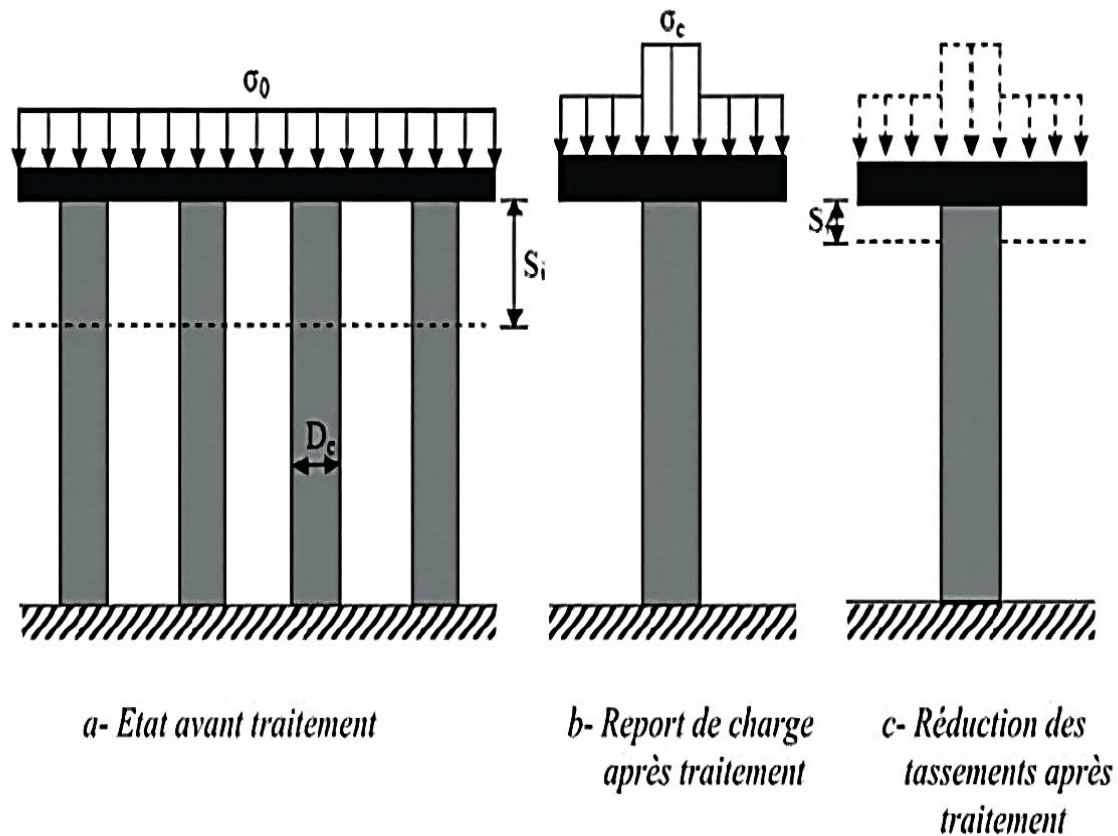


c- Colonne isolée : principe de la cellule unitaire (Ghionna et Jamiolkowski, 1981)

Figure 1-16 : Réseau de colonnes ballastées

La relation entre la contrainte moyenne  $\sigma_0$  appliquée sur l'aire totale  $A$ , la contrainte  $\sigma_c$  transférée à la colonne d'aire  $A_c$  et la charge  $\sigma_s$  supportée par le sol sur l'aire  $A_s$  peut s'écrire, en utilisant les notations des Figure 1.16 et Figure 1.17, sous la forme :

$$\sigma_0 = A_c \sigma_c + A_s \sigma_s \quad (1-4)$$



**Figure 1-17 :** Principe concentration des contraintes et réduction des tassements (Dhouib 2005)

#### I.6.1.2 Taux d'incorporation

Le coefficient d'incorporation est le rapport  $a$  de l'aire de la colonne  $A_c$  à l'aire totale  $A$  du domaine d'influence de la colonne (Figure I.16), soit :

$$a = A/A_c \quad (1-5)$$

#### I.6.1.3 Rapport de concentration des contraintes verticales

Les colonnes ballastées ont des résistances et modules supérieurs à ceux du sol traité. Il se développe pour cette raison un mécanisme de transfert de la charge  $\sigma_0$  qui conduit à une concentration de la contrainte verticale sur les colonnes  $\sigma_c$  et à une réduction de la charge sur le sol  $\sigma_s$ . Par définition le rapport de concentration des contraintes verticales est le rapport de la contrainte apportée par la colonne  $\sigma_c$  à celle apportée par le sol après traitement  $\sigma_s$ .

$$n = \sigma_c/\sigma_s \quad (1-6)$$

#### I.6.1.4 Facteur de réduction de tassement

La charge  $\sigma_0$  appliquée par la fondation au sol d'assise produirait, avant le traitement de sol, un tassement moyen  $s_i$ . Après le traitement les tassements diminuent globalement. On peut définir le

facteur de réduction des tassements  $\beta$ , qui désigne le rapport du tassement si du sol avant traitement au tassement  $s_f$  du milieu composite obtenu après traitement, soit :

$$\beta = \frac{s_i}{s_f} \quad (1-7)$$

#### I.6.1.5 Cas particulier : Relation entre paramètres caractéristiques

- 1- Dans le cas d'une fondation rigide (semelle ou radier), les tassements en tête des colonnes, qui possèdent un module de déformation élastique  $E_c$ , et les tassements du sol entre les colonnes (de module de déformation élastique  $E_s$ ) sont identiques.

Le rapport de concentration  $n$  est, dans ce cas, égal au rapport des deux modules de déformation, soit :

$$n = \frac{\text{le module de déformation élastique de la colonne}}{\text{le module de déformation élastique du sol entre les colonnes}} = \frac{E_c}{E_s} \quad (1-8)$$

- 2- Dans l'hypothèse (discutable) d'un comportement élastique linéaire du sol, ou les modules de déformation élastique  $E_s$  et volumétrique  $K_s$  du sol restent constants pendant la déformation, on peut aussi écrire le facteur de réduction des tassements  $\beta$  sous la forme :

$$\beta = \frac{\sigma_0}{\sigma_s} \quad (1-9)$$

La combinaison des équations (1-4), (1-6) et (1-9) conduit à l'égalité suivante :

$$\beta = (n - 1) a + 1 \quad (1-10)$$

Dans le cas de la fondation rigide, on peut alors exprimer les deux contraintes  $\sigma_s$  et  $\sigma_c$  par :

$$\sigma_s = \frac{\sigma_0}{(E_s/E_c - 1)} \quad (1-11)$$

Et

$$\sigma_c = n \sigma_s = \frac{\sigma_0}{(E_s/E_c - 1)a + 1} \frac{E_c}{E_s} \quad (1-12)$$

Dans la pratique courante, le rapport des deux modules de Young de la colonne et du sol ( $E_c/E_s$ ) est proche de 10 (Balaam et poulos, 1983 ; Greenwood, 1970 ; Schulze, 1978), ce qui conduit aux expressions simplifiées :

$$\sigma_s = \frac{\sigma_c}{9a + 1} \quad (1-13)$$

$$\sigma_c = 10\sigma_s = \frac{10\sigma_0}{9a + 1} \quad (1-14)$$

Ce résultat est valable lorsque le comportement de la colonne est élastique. (A. Noui.2012).

## I.6.2 Comportement des colonnes ballastées au cours de temps

Le comportement des colonnes ballastées au cours du temps passe par trois phases essentielles :

- **La phase initiale** : elle est correspondue aux étapes de construction du remblai ou de la mise en place de la charge pour les autres ouvrages (radiers, dallages et semelles).
- **La phase de consolidation** : cette phase est accélérée par le caractère drainant des colonnes.
- **La phase de fluage** : elle est en relation avec le caractère fluant ou non du sol encaissant.

### I.6.2.1 La phase initiale

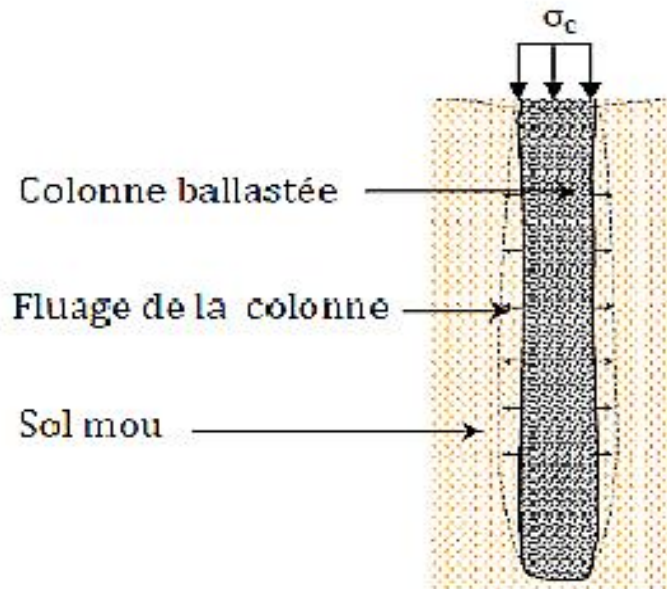
Dans la phase initiale, les pressions interstitielles n'ont pas le temps de se dissiper, il n'y a donc pas de transfert de charge et les tassements sont théoriquement négligeables, mais il peut se produire tout de même des tassements instantanés.

### I.6.2.2 La phase de consolidation

Dans la phase de consolidation, les pressions interstitielles se dissipent, le transfert de charge se produit progressivement dans le temps et les tassements primaires se mobilisent. On observe un report progressif de charge qui provoque, entre le temps initial  $t_i$  et un certain temps final  $t_f$ , une augmentation de la contrainte verticale  $\sigma_c$  sur la colonne et une diminution de la contrainte verticale  $\sigma_s$  sur le sol. A partir d'un certain temps final  $t_f$  il y a stabilisation des contraintes sur les colonnes et sur le sol.

### I.6.2.3 La phase de fluage

Le fluage, appelée généralement consolidation secondaire, est par définition le déplacement, ou la déformation, en fonction du temps sous un chargement constant ou une contrainte constante. Bell (2000) a réalisé un essai de chargement sur une semelle filante coiffant cinq colonnes ballastées, à partir de cet essai l'auteur a conclu que les déformations des colonnes ballastées dues au fluage augmentent lorsque l'enfoncement de la fondation croît, ce qui peut expliquer par la dégradation de la structure du sol traité. D'une manière générale ce phénomène de fluage est produit lorsqu'il y a un manque de l'étreinte latérale de sol encaissant les colonnes. (A. Noui.2012).



**Figure 1-18 :** Fluage d'une colonne par manque de l'étreinte latérale

### I.6.3 Modèle de comportement mécanique d'une colonne ballastée isolée sous chargement

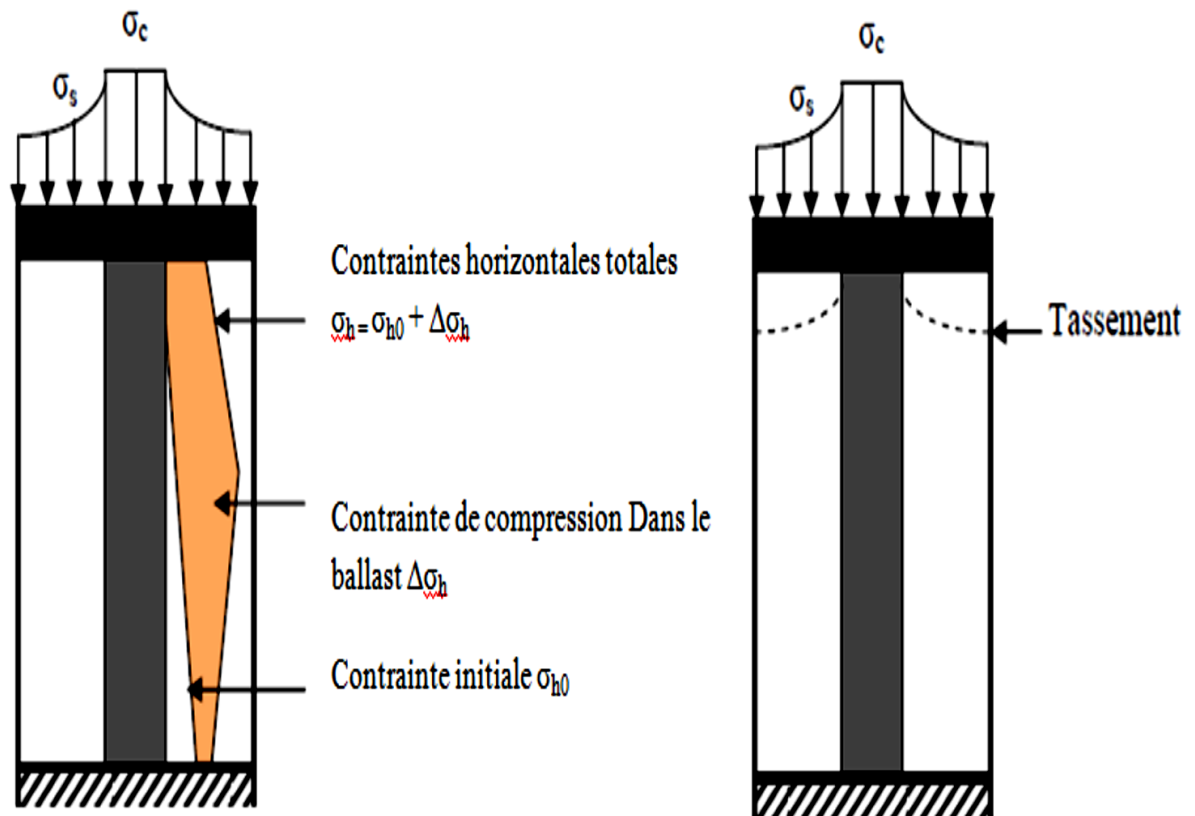
#### statique verticale

Une colonne ballastée peut tasser sous la charge appliquée, le ballast peut également subir des déformations radiales avec un mécanisme d'interaction « sol/colonne » qui dépend de la rigidité relative de la fondation par rapport au sol qu'elle sollicite.

Les fondations souples et les fondations rigides sont les deux types de fondations qui peuvent construire sur les colonnes ballastées, pour ces deux types la concentration sur la colonne des charges transmises par l'ouvrage correspondent à un déchargement du sol autour de la colonne au fur et à mesure de l'évolution de la consolidation primaire du sol, accélérée par le caractère drainant des colonnes.

#### I.6.3.1 Comportement de la colonne sous une fondation souple

Sous la fondation souple (Figure 1.19 b), le report de charge est moins accentué, les contraintes réparties sur le sol  $\sigma_s$  et sur la colonne  $\sigma_c$  évoluent dans un rapport de 3 à 5 (Vautrain, 1980) et les tassements sont plus importants sur le sol que sur la colonne. La contrainte horizontale  $\sigma_h$  qui confine le ballast résulte de la contrainte horizontale initiale qui règne dans le sol  $\sigma_{h0}$  et de la contrainte de compression exercée dans le ballast  $\Delta\sigma_h$ , elle augmente jusqu'à une profondeur caractéristique déterminée, puis diminue (Figure 1.19 a).



a- Répartition des contraintes horizontales de la colonne

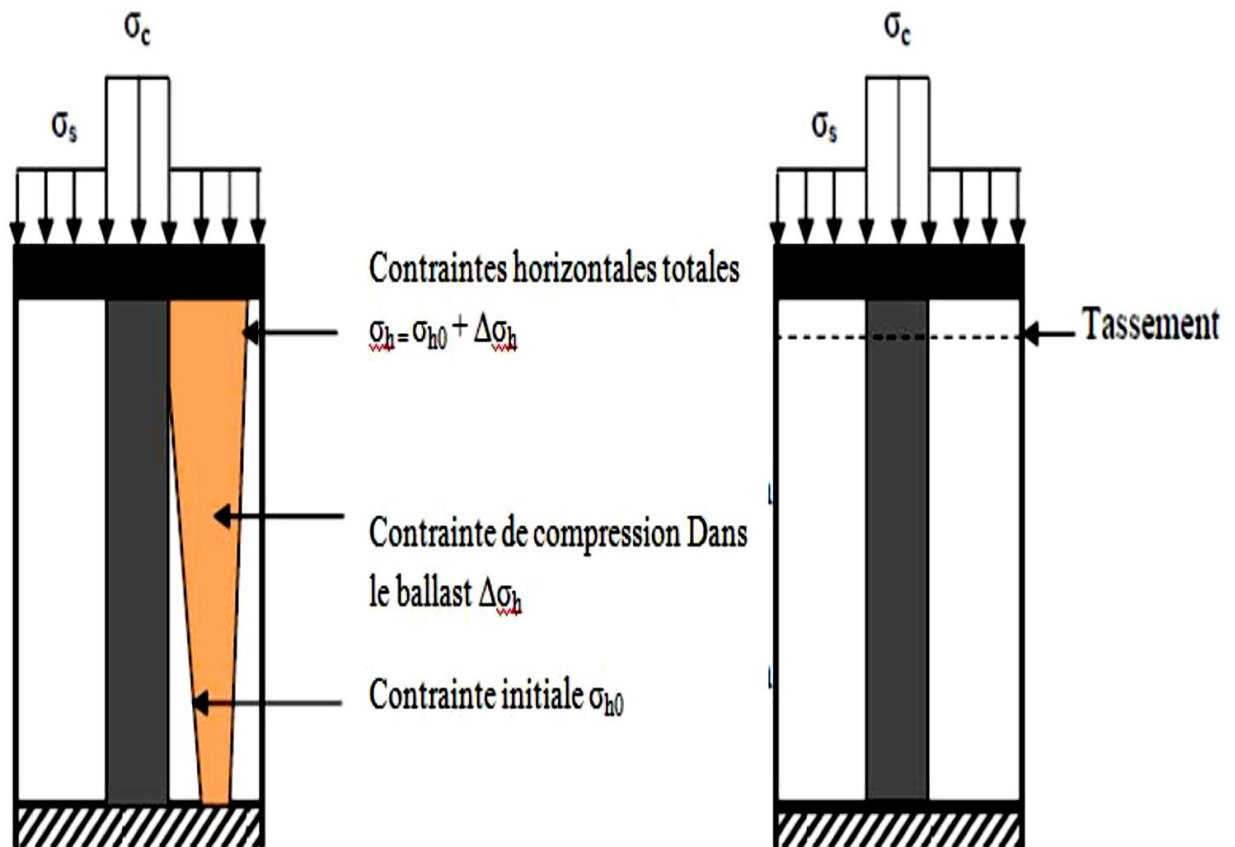
b- Répartition des contraintes verticales et déformation axiale

**Figure 1-19 :** Répartition des contraintes verticales et horizontale et déformation axiale en surface d'une colonne sous une fondation souple (Eggestad, 1983)

### I.6.3.2 Comportement de la colonne sous une fondation rigide

A la base de la fondation rigide (Figure 1.20 b), il y a une concentration de contraintes plus importante sur la colonne et un meilleur déchargement du sol et Compte tenu du caractère indéformable de la fondation, les tassements en surface du sol et de la colonne sont identiques (Soyez, 1985 et Belcotec, 1985).

Pour ce type de fondation la contrainte totale horizontale qui confine la colonne, décroît linéairement en fonction de la profondeur (Figure 1.20 a). (A. Noui.2012).



a- Répartition des contraintes horizontales de la colonne

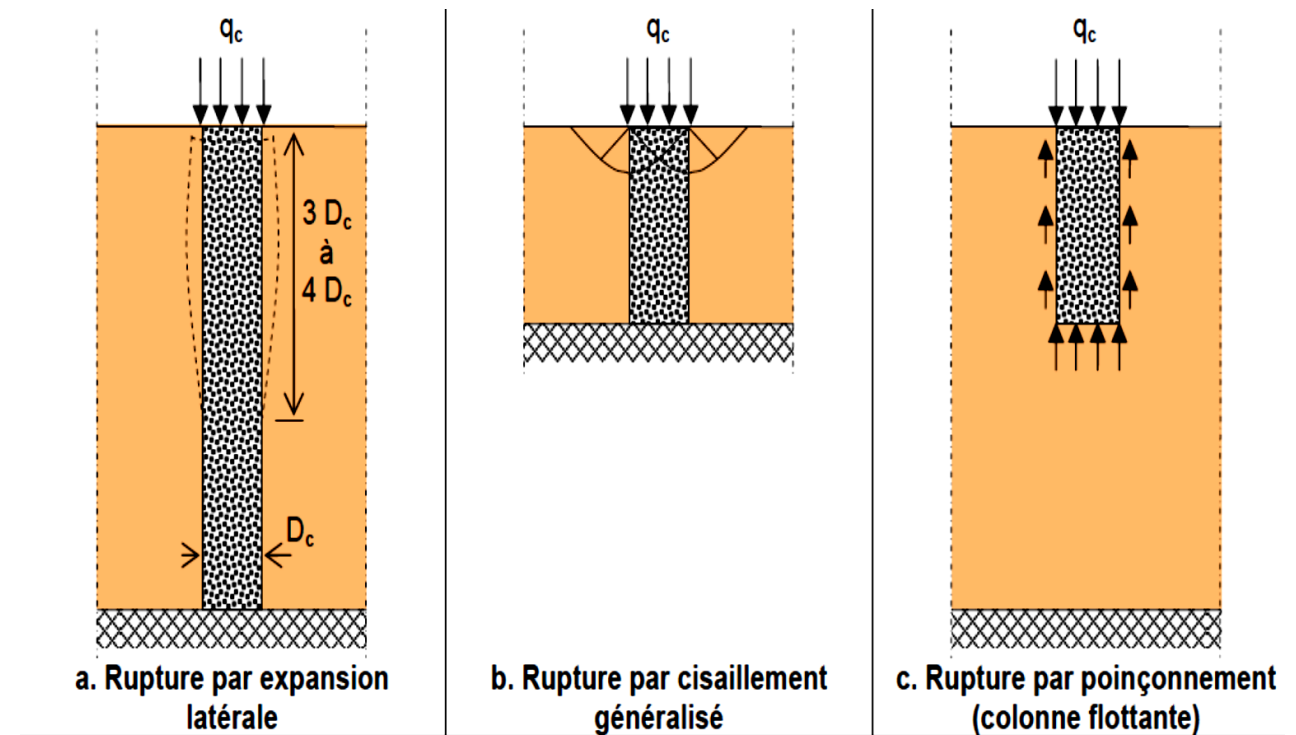
b- Répartition des contraintes verticales et déformation axiale

**Figure 1-20 :** Répartition des contraintes verticales et horizontales et déformation axiale en surface d'une colonne sous une fondation rigide (Eggestad, 1983)

#### I.6.4 Mécanismes et modes des ruptures des colonnes

Le dimensionnement des colonnes ballastées est essentiellement basé sur des méthodes empiriques, et diffère selon que l'on considère des colonnes isolées ou en réseaux. Une colonne isolée peut être ancrée dans un substratum de performance mécanique importante ou flottante, reposant sur le sol qui l'entoure. (O. Guerroui.2018).

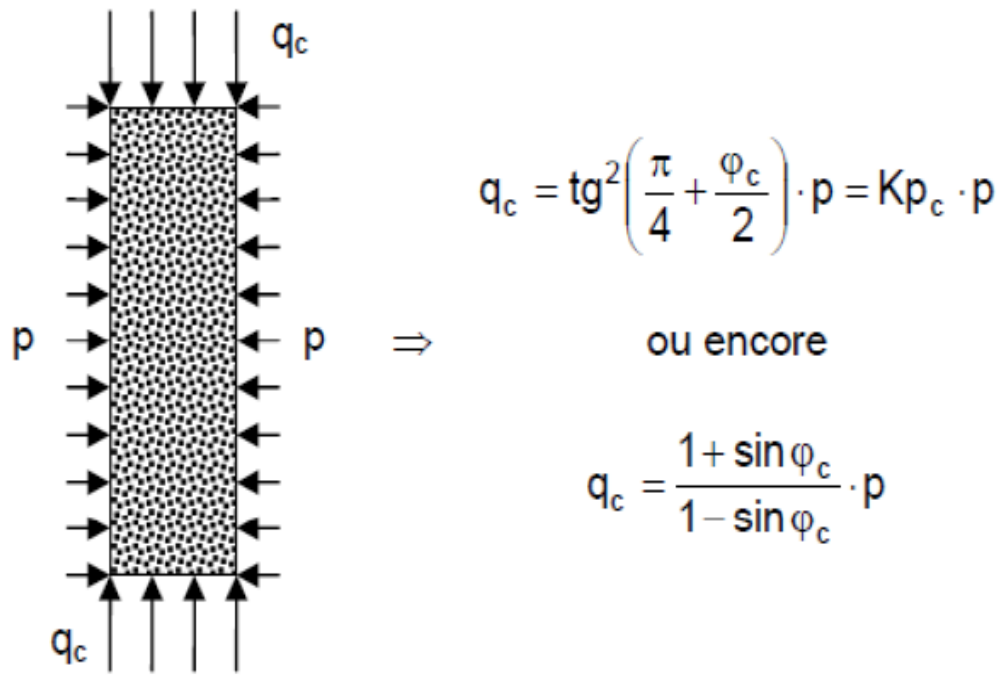
On distingue trois modes de rupture pour une colonne isolée chargée en son sommet :



**Figure 1-21** : Mécanisme de rupture d'un colonne ballastée isolé chargée en tête exécutée dans une couche compressible

#### I.6.4.1 Rupture par expansion latérale

L'analyse de la rupture par expansion latérale repose sur la théorie développée initialement par Greenwood en 1970. La colonne est assimilée à une éprouvette composée du même matériau granulaire subissant une compression axiale  $q_c$  sous une contrainte de confinement  $p$  égale à la résistance latérale maximale offerte par le sol ambiant (figure 1.22), à la profondeur où ses caractéristiques mécaniques sont minimales. Le caractère drainant du ballast permet de considérer que la colonne est en état de rupture triaxiale drainée. Ainsi,  $q_c$ ,  $Kp_c$ ,  $p$  sont respectivement la contrainte verticale agissant sur la colonne à l'instant de la rupture, le coefficient de butée du ballast et la contrainte effective maximale que le sol peut supporter autour de la colonne.



**Figure 1-22 :** Analogie colonne ballastée / éprouvette triaxial

L'expansion latérale de la colonne peut être comparée à celle d'une sonde pressiométrique, ce qui permet de poser :

$$p = p_l - u \quad (1-15)$$

Avec :

$p_l$  : pression limite du sol ambiant

$u$  : pression interstitielle à la périphérie de la colonne

A défaut d'essai in situ, la pression limite d'un sol purement cohérent en conditions non drainées peut être estimée par l'expression [6] :

$$p_l = (\sigma'_{h,0} + u_0) + k \cdot C_u \quad (1-16)$$

Avec :

$\sigma'_{h,0}$  : contrainte effective horizontale existant dans le sol avant la réalisation de la colonne.

$C_u$  : résistance au cisaillement non drainé du sol.

$k$  : coefficient multiplicateur.

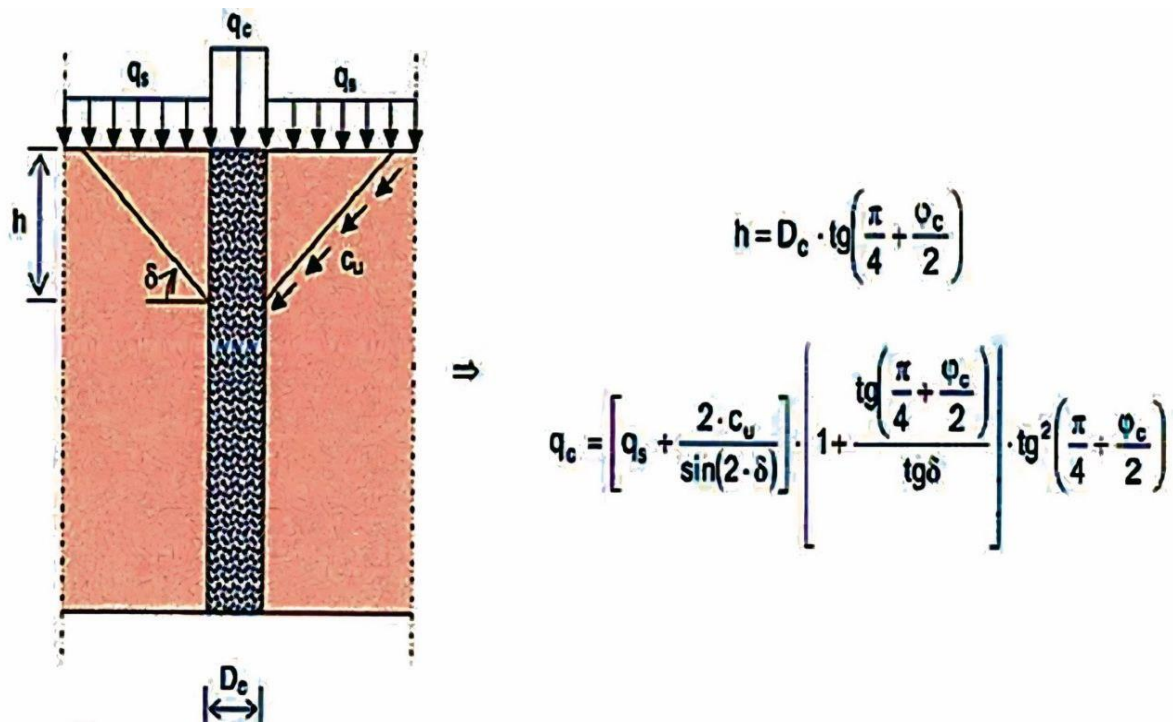
Le tableau 1-5 précise la définition du coefficient multiplicateur  $k$  donné par plusieurs auteurs en fonction d'un facteur appelé "indice de rigidité"  $I_r$ , qui dépend de la cohésion non drainée  $C_u$ , du module d'élasticité du sol  $E_s$  ainsi que du coefficient de Poisson  $\nu_s$  du sol.

**Tableau 1-5 : définition du coefficient multiplicateur  $k$  [6]**

| Expression de $K$                                             | Auteurs                                               | Remarque                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $K = 1 + \ln \left( \frac{E_s}{2(1+\nu_s) \cdot C_u} \right)$ | -Hughes withers<br>-Wroth et Hughes (1)               | (1) $K = 4$ : Valeur conseillée au vu d'essais drainés drainé réalisés avec un pressiomètre auto foreur de cambrigde.                                                                                                                                                  |
| $K = 1 + \ln I_r$<br>$I_r = \frac{E_{sol}}{3C_u}$             | Brauns Chionna et<br>jamiolkowski (2)<br>Nahrgang (3) | (1) $I_r$ = indice de rigidité pour un sol purement cohérent lors d'une sollicitation non drainée.<br>(2) $E_s$ = Estimation à partir d'essai in situ au pressiomètre auto foreur.<br>(3) $K = 6,18$ : Valeur donnée sur la base d'essai sur modèle réduit de colonne. |

Le paramètre fondamental de ce type de calcul est l'angle de frottement  $\varphi_c$  du matériau constitutif de la colonne. Dans le cas d'un ballast, mis en place par un vibreur de type Keller, une valeur prudente de  $38^\circ$  est couramment recommandée (Schulze, 1978). (O. Guerroui.2018).

### I.6.4.2 Rupture par cisaillement généralisé



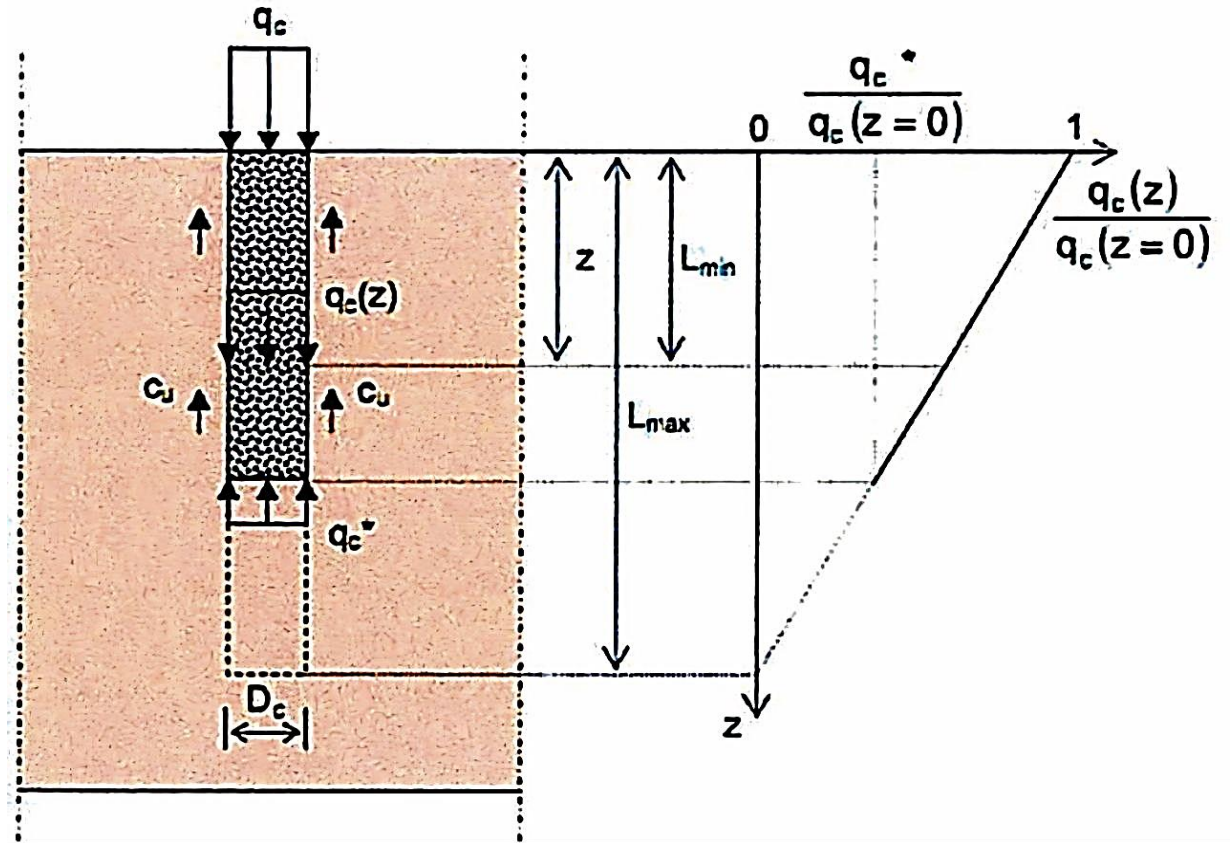
**Figure 1-23 :** Caractérisation de la surface de rupture par cisaillement généralisé.

Dans le cas de colonnes courtes, la rupture par cisaillement généralisé doit être vérifiée. Brauns a envisagé le cas de la rupture axisymétrique d'un volume de matériau composite "ballast-sol" délimité par une surface tronconique dont la génératrice fait un angle  $\delta$  avec l'horizontale, centré sur l'axe de la colonne et développé sur une profondeur  $h$  (figure 1.23).

La contrainte verticale limite  $q_c$  en tête de colonne est donnée par la relation indiquée sur la figure 1.23 et dépend de la surcharge  $q_s$  appliquée à la surface du sol autour de la fondation placée en tête de la colonne. Celle-ci tient compte de quelques hypothèses simplificatrices comme notamment l'absence de cisaillement à l'intérieur de la surface de rupture et la conservation des volumes. La cohésion non drainée du sol  $C_u$  est supposée constante sur toute la profondeur du traitement. (O. Guerroui.2018).

### I.6.4.3 Rupture par poinçonnement

En faisant l'hypothèse qu'une colonne flottante travaille comme un pieu rigide, Hughes et al. Et Brauns ont cherché à déterminer la longueur minimale nécessaire pour éviter son poinçonnement. Sur la colonne se développent un effort de pointe et un frottement latéral positif (figure 1.24). La résistance mobilisée sur la périphérie de la colonne est supposée égale à la résistance au cisaillement non drainé  $C_u$  du sol. (O. Guerroui.2018).



**Figure 1-24 :** Rupture par poinçonnement d'une colonne ballastée flottante isolée

L'équilibre d'un tronçon de colonne pesante de poids volumique  $\gamma_c$  conduit à l'expression de la contrainte verticale  $q_c(z)$  régnant à la profondeur  $z$  à l'intérieur de la colonne :

$$q_c(z) = q_c + z \cdot (\gamma_c - 4 \cdot \frac{c_u}{D_c}) \quad (1-17)$$

Pour éviter tout poinçonnement, la contrainte verticale  $q_c(L_{min})$  ne doit pas excéder la contrainte limite  $q_c^*$  en pointe mobilisable dans la couche d'argile dont la valeur usuellement utilisée pour les pieux est de  $9 c_u$ . En négligeant le poids propre du ballast,  $L_{min}$  est donnée par la relation :

$$L_{min} = \frac{1}{4} \cdot D_c \cdot (\frac{q_c}{c_u} - 9) \quad (1-18)$$

Le traitement devient inutile lorsque  $q_c(L_{max})=0$ , ce qui donne la relation suivante :

$$L_{max} = \frac{1}{4} \cdot D_c \cdot \frac{q_c}{c_u} \quad (1-19)$$

La profondeur de traitement  $L$  sera finalement déterminée de la telle façon que :

$$L_{min} \leq L \leq L_{max}$$

**I.7 Conclusion**

Ce chapitre fournit une synthèse bibliographique des techniques les plus courantes utilisées dans la pratique pour l'amélioration des sols, montrant que le choix de la technique appropriée dépend principalement du type de sol et des caractéristiques géotechniques.

Le chapitre se concentre également sur la définition de la technique des colonnes ballastée, qui a connu un développement significatif dans le monde entier, en abordant ses domaines d'utilisation, ses méthodes de mise en œuvre (par voie humide et par voie sèche) et ses mécanismes de rupture, tels que Rupture par cisaillement généralisé, Cela permet de mieux comprendre les limites de la technique et d'optimiser ses performances.

Ce chapitre prépare le terrain pour l'analyse numérique qui sera réalisée dans un chapitre ultérieur.

## ***Chapitre 2***

# ***Présentation de logiciel FLAC***

## **II.1 Introduction**

Le renforcement des sols compressibles par des colonnes ballastée est un sujet complexe, en raison des multiples phénomènes d'interaction sol-structure à différents niveaux d'échelles.

En raison de la multiplicité et de la complexité de ces facteurs, il est devenu nécessaire de recourir à l'utilisation d'un outil numérique capable de représenter le comportement général de ce type d'ouvrage. De plus, la diversité de la nature et du comportement des matériaux nécessite que le logiciel de calcul utilisé soit ajustable, car les matériaux présentent généralement un comportement non linéaire et des déformations irréversibles.

Ce chapitre présente le logiciel de calcul FLAC2d utilisé dans cette thèse pour étudier le comportement des sols de la fondation renforcée par des colonnes ballastées.

## **II.2 Présentation de la méthode des différences finis**

La méthode des différences finis traite le milieu comme un massif continu, et le présente par une grille d'éléments rectangulaire, où chaque maille (élément) est dotée des propriétés mécaniques du milieu continu équivalent. Des lois de comportement et d'interaction associés à des relations de continuité et de compatibilité inter élément permettent de décrire le comportement mécanique de ces volumes élémentaires de matériau, qui contribuent à la réponse globale du massif.

Cette méthode permet de résoudre des systèmes d'équations différentielles avec conditions initiales et/ou au limites. Toute dérivée dans le système d'équation est remplacée par une expression algébrique en termes de variations intervenant dans le système d'équation (contraintes-déformations), en des lieux discrets dans l'espace.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de simplifier considérablement la description géométrique du milieu, ce qui facilite la mise en œuvre informatique du modèle (petit nombre de nœuds, automatisation du maillage, convergence rapide). La difficulté réside dans la détermination des caractéristiques équivalentes et la taille des échantillons à prendre en compte pour le modèle numérique soit représentative du massif réel.

## **II.3 Calculs en déformations planes (2D)**

L'utilisation de modèles 2D contribue à une réduction des temps de calcul et permet une meilleure représentation géométrique des systèmes étudiés.

Si l'une des dimensions de l'ouvrage est prépondérante (remblai de grande longueur, section courante d'un tunnel, etc.) et si toutes les autres caractéristiques du modèle (chargements, conditions aux

limites, interfaces) le permettent, il est possible d'analyser l'ouvrage dans un plan. Cette analyse, dite en déformations planes, suppose que la composante du déplacement perpendiculaire au plan considéré est uniformément nulle.

L'utilisateur construit alors son maillage dans un plan, mais admet implicitement qu'il bénéficie d'une profondeur égale à l'unité. Les forces appliquées sur ce type de modèle s'expriment en Kilogramme.

Comme les problèmes tridimensionnels nécessitent des maillages fins qui sont souvent difficiles à réaliser en raison de la grande taille des systèmes matriciels, en particulier dans les calculs non linéaires complexes, ces problèmes sont généralement moins précis que les modèles bidimensionnels en raison de la nécessité d'utiliser des maillages plus simples pour s'adapter aux capacités des ordinateurs utilisés.

## **II.4 Présentation de FLAC**

FLAC (Fast Langrangian Analysis of Continua) est un logiciel Il a été créé en 1986 par Peter Cundall et développé par la suite par ITASCA Consulting Group.

FLAC est un logiciel de modélisation, développé pour les calculs de simulation en géotechnique et mécanique. Contrairement à la plupart des logiciels basés sur la méthode des éléments finis, il est basé sur la méthode des différences finies, ce qui le rend moins exigeant en termes de puissance de calcul et de mémoire de stockage, mais il nécessite un grand nombre d'itérations.

Car il ne nécessite pas le stockage d'une matrice de rigidité globale : de grandes tailles, les équations sont reformulées à chaque pas.

Le code de calcul Flac s'applique dans des domaines différents tel que :

- Dynamique.
- Thermiques.
- Statique : éléments de structure, tel que la poutre, les câbles, les poteaux et piliers.

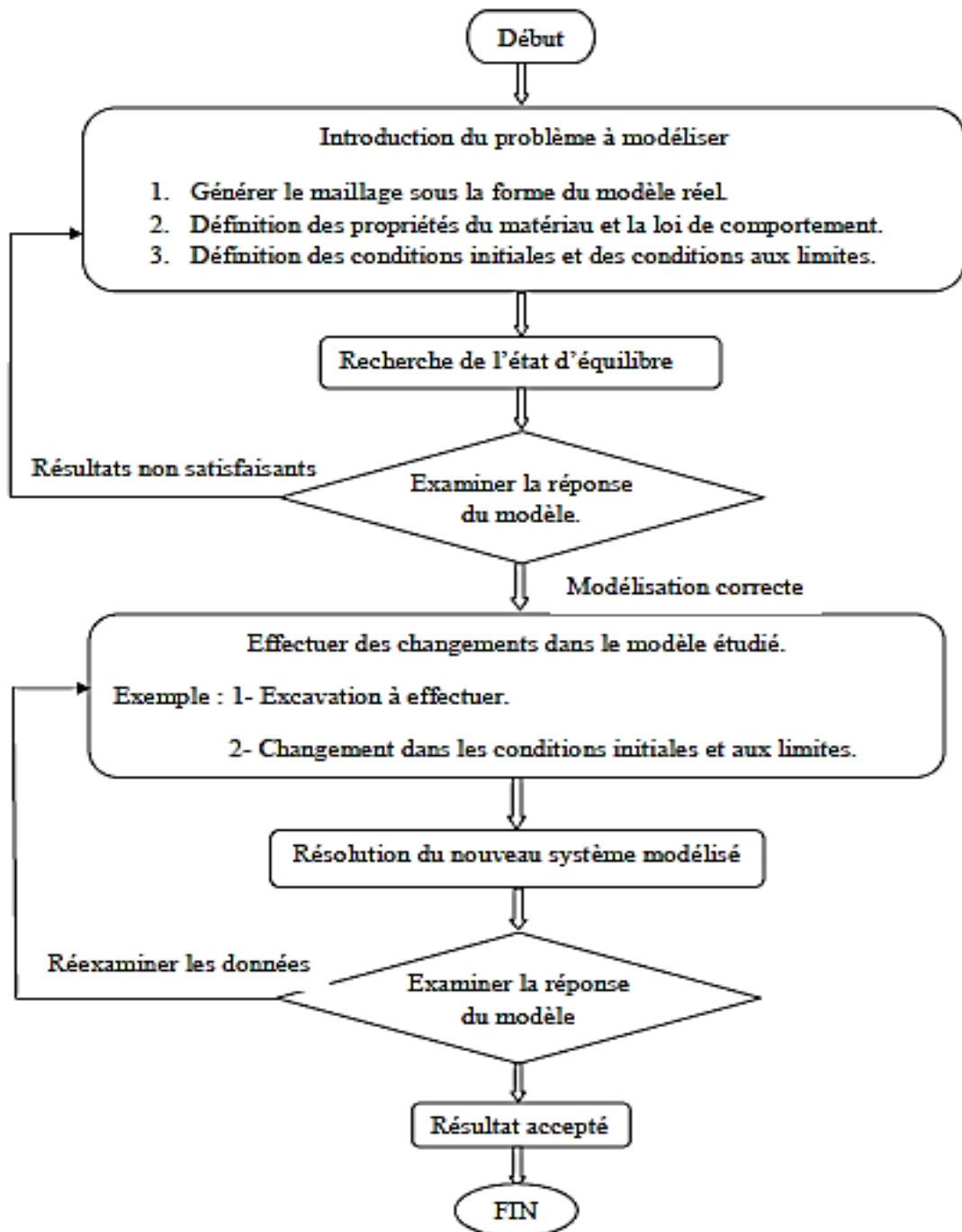
### **II.4.1 Ecriture d'un fichier FLAC**

Quel que soit le problème traité, l'écriture d'un fichier exécutable sous FLAC suit les étapes suivantes :

- 1) Définition de ou des configurations retenues (mode de calcul).
- 2) Géométrie du problème.

- 3) Choix de model de comportement et de ses paramètres.
- 4) Détermination des différentes conditions initiales et limites.
- 5) Spécifier les fonctions ou les variables définies par l'utilisateur.
- 6) Résolution du problème.

L'organigramme donné par la figure (2.1), montre le procédé général de résolution d'un problème géotechnique dans FLAC2D.



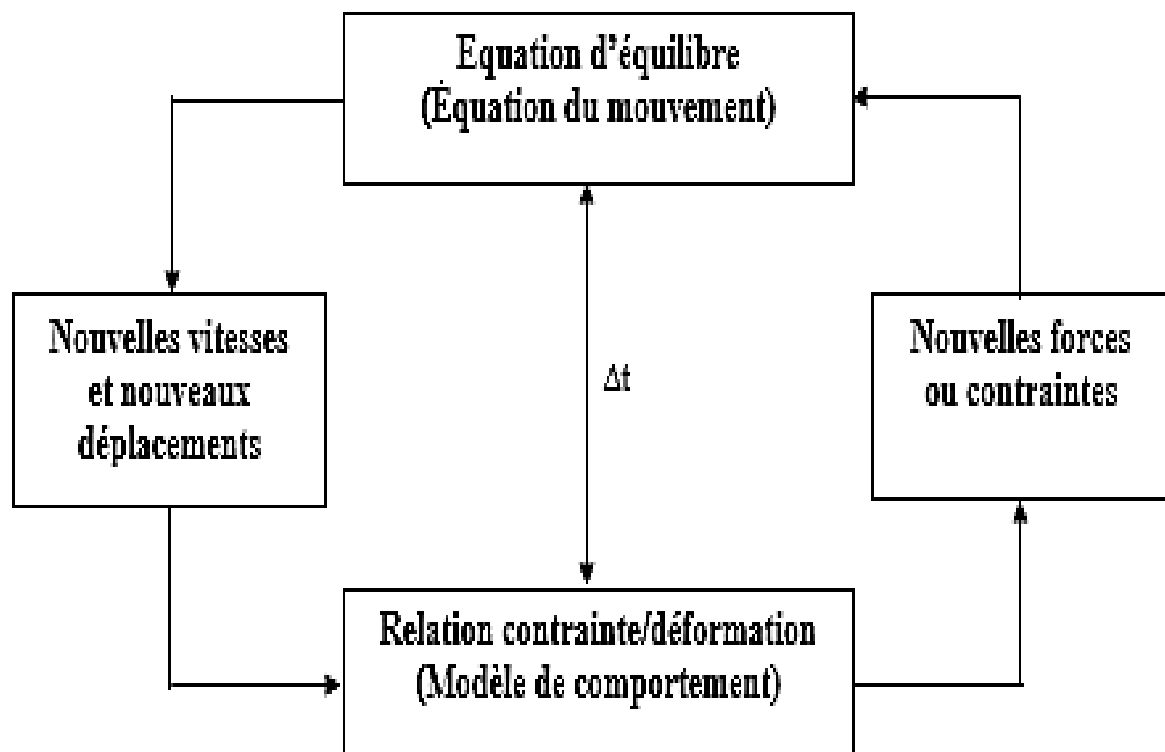
**Figure 2-1 :** Procédé général de résolution des problèmes en géotechnique selon FLAC2D

### II.4.2 Principe de calcul

La séquence générale de calcul intégrée à FLAC est illustrée sur la Figure (2.2). Cette procédure fait d'abord appel aux équations du mouvement afin de calculer les vitesses et les déplacements à partir de l'accélération, déduite de la résultante des forces et des contraintes.

Alors, les déformations sont déduites des déplacements (intégrales des vitesses), et les nouvelles contraintes de ces déformations au travers des relations du modèle rhéologique.

Chaque cycle autour de la boucle correspond à un pas de temps. Le pas de temps déterminé par le logiciel est si petit que l'information n'a pas le temps physique de passer d'un élément à un autre pendant cet intervalle. Cette condition essentielle du calcul numérique permet d'authentifier les notions de stabilité et d'amortissement, la convergence de l'algorithme obéissant à des critères de stabilité mécanique.



**Figure 2-2 :** Cycle élémentaire du calcul explicite par différences finies, d'après ITASCA.

Dans une méthode implicite (éléments finis), chaque élément communique avec les autres pendant un cycle de calcul : plusieurs cycles d'itérations sont nécessaires avant que la compatibilité et l'équilibre soient atteints.

### II.4.2.1 Equations du mouvement

Les équations du mouvement sont utilisées pour calculer de nouvelles vitesses et donc de nouveaux déplacements à partir des contraintes et des forces en jeu. L'équation de mouvement de Newton est donnée par :

$$m \frac{d\dot{u}}{dt} = F \quad (2-1)$$

Qui est généralisée pour un corps solide continu, donnée par l'équation suivante :

$$\rho \frac{d\dot{u}_i}{dt} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2-2)$$

Avec,

$\rho$ : Masse volumique.

$t$  : Temps.

$x_i$ : Composante du vecteur position

$g_i$ : Composante de l'accélération gravitationnelle générée par les forces de volume.

$\sigma_{ij}$ : Composante du tenseur des contraintes.

$\dot{u}$ : Composante du vecteur vitesse nodale.

Alors, le taux de déformation est dérivé à partir du gradient des vitesses et la loi de comportement est utilisée pour calculer les nouvelles contraintes.

Le taux de déformation s'écrit comme suit :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right] \quad (2-3)$$

Avec

$\dot{\epsilon}_{ij}$ : Composante du taux de déformation

### II.4.2.2 Modèles de comportement pour les sols

$$\sigma_{ij} = F \epsilon_{ij} \quad (2-4)$$

$\sigma_{ij}$ : Tenseur des contraintes.

$\epsilon_{ij}$ : Tenseur des déformations.

F : Fonctionnelle

Les lois de comportement sont souvent utilisées sous forme incrémentales comme suit :

$$\delta \varepsilon_{ij} = G(\delta \sigma_{ij}) \quad (2-5)$$

$\delta \varepsilon_{ij}$ : L'incrément de déformation.

$\delta \sigma_{ij}$ : L'incrément de contrainte.

G : Fonction tensorielle.

#### II.4.2.2.1 Elasticité

L'élasticité est définie comme la partie réversible des déformations et le modèle élastique est le modèle le plus simple du comportement des matériaux. Il se caractérise par une relation linéaire, réversible et indépendante de l'historique de la charge entre la contrainte totale et la déformation (loi de Hooke). Les exemples courants dans ce contexte comprennent l'élasticité linéaire isotrope et l'élasticité non linéaire.

##### II.4.2.2.1.1 Elasticité linéaire isotrope ou loi de Hooke

Dans le cas de l'élasticité linéaire isotrope, le tenseur des déformations est relié au tenseur des contraintes, et la relation la plus courante est donnée par la relation de Hooke :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \cdot \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij} \quad (2-6)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \varepsilon_{ij} - \frac{\nu}{E} \cdot \varepsilon_{kk} \cdot \delta_{ij} \quad (2-7)$$

$\delta_{ij}$ : Indice de Kronecker.

E et  $\nu$  sont deux paramètres de l'élasticité, mais on peut les substituer par le module volumique K et le module de cisaillement G par les relations suivantes :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2-8)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2-9)$$

#### II.4.2.2.2 Elastoplasticité de Mohr Coulomb

En réalité, la plupart des matériaux présentent un comportement élastique loin d'être idéal : au-delà d'un certain niveau de contraintes, tout ou partie des déformations supplémentaires deviennent permanentes et irréversibles.

En complément de la déformation élastique définie par la loi de Hooke, les modèles élastoplastiques intègrent ainsi un degré de déformation plastique permanente, caractérisé par une loi d'écoulement lorsque la surface de charge est atteinte.

La théorie de l'élastoplasticité vise à modéliser le comportement non linéaire et permanent des matériaux.

- ❖ La partition des déformations : est caractérisée par la présence de déformations irréversibles en déchargement. Les déformations se décomposent en une partie élastique et une partie plastique.
- ❖ La surface de charge : qui définit le seuil de contraintes au-delà duquel le comportement du matériau est irréversible.
- ❖ L'écrouissage : qui permet de faire évaluer le domaine élastique.
- ❖ La règle d'écoulement plastique : qui décrit l'évolution des déformations plastiques.

Dans le modèle élastoplastique de Mohr-Coulomb, l'incrément de déformation totale se décompose donc en deux parties, l'une élastique et l'autre plastique :

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (2-10)$$

Toutefois, la composante plastique n'est non-nulle que durant l'écoulement plastique. Dans le cas contraire, l'incrément de déformation totale est égal à sa composante élastique, conformément à la loi de Hooke, qui s'écrit sous sa forme incrémentale :

$$\Delta\sigma_1 = \alpha_1 \Delta\varepsilon_1^e + \alpha_2 (\Delta\varepsilon_2^e + \Delta\varepsilon_3^e) \quad (2-11)$$

$$\Delta\sigma_2 = \alpha_1 \Delta\varepsilon_2^e + \alpha_2 (\Delta\varepsilon_1^e + \Delta\varepsilon_3^e) \quad (2-12)$$

$$\Delta\sigma_3 = \alpha_1 \Delta\varepsilon_3^e + \alpha_2 (\Delta\varepsilon_2^e + \Delta\varepsilon_1^e) \quad (2-13)$$

Dans les équations précédentes :

$$\alpha_1 = K + 4G / 3 \quad (2-14)$$

$$\text{Et } \alpha_2 = K - 2G / 3 \quad (2-15)$$

Où K et G désignent respectivement les modules d'incompressibilité et de cisaillement du matériau, exprimés en PASCALS. Ils sont liés au module de Young et au coefficient de Poisson par les relations suivantes :

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2-16)$$

Le domaine plastique, quant à lui, est défini par un critère de rupture associé à une loi d'écoulement plastique.

#### II.4.2.2.1 Le critère de rupture de Mohr-Coulomb

Tout champ de contraintes peut être exprimé en termes de contraintes principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ . La convention de signe, dans FLAC, attribuant des valeurs négatives à la compression, et positives à la traction, les contraintes principales sont alors ordonnées de la manière suivante :

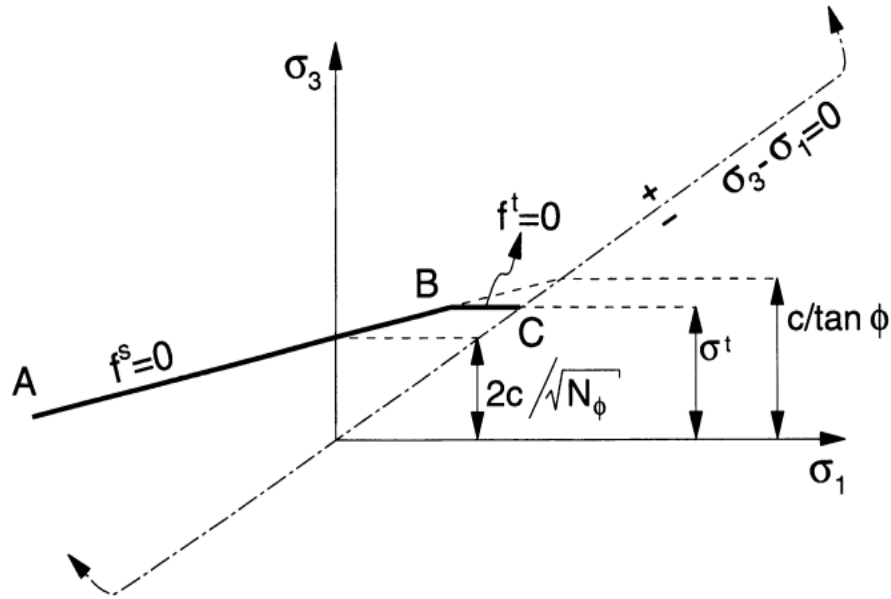
$$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$$

L'enveloppe de rupture (aussi appelée surface de charge) de Mohr-Coulomb (Figure IV.2) est définie du point A au point B par la relation suivante, qui fait intervenir les caractéristiques de résistance au cisaillement du matériau :

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 \sqrt{N_\phi} + 2C\sqrt{N_\phi} = 0 \quad (2-17)$$

Du point B au point C, la rupture est contrôlée par la résistance à la traction du matériau,  $\sigma^t$ :

$$f^s = \sigma^t - \sigma_3 = 0 \quad (2-18)$$



**Figure 2-3 :** Critère de rupture de Mohr-Coulomb dans FLAC, d'après ITASCA.

Les valeurs des paramètres  $N$ ,  $\sigma^t$  et  $\sigma_{cm}$  peuvent être calculées à partir de celles de  $C$  et  $\Phi$  (résistance à la compression du matériau) et inversement :

$$N_{\phi} = \frac{1+\sin \phi}{1-\sin \phi} \quad (2-19)$$

$$\sigma_{cm} = 2C\sqrt{N_{\phi}} \text{ Ou } C = \frac{\sigma_{cm}}{2\sqrt{N_{\phi}}} \quad (2-20)$$

$$\sigma^t \leq \frac{C}{\tan \phi} \text{ Ou } C \geq \sigma^t \tan \phi \quad (2-21)$$

#### II.4.2.2.2 La loi d'écoulement de Mohr-Coulomb

Dans le domaine plastique, une loi d'écoulement définit le comportement du matériau lorsque les déformations sont irréversibles. Le calcul de l'incrément de déformation plastique est déduit d'une fonction potentiel plastique (règle d'écoulement)  $g$ , définie, dans le cas présent, par :

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_{\psi} \text{ et } g^t = -\sigma_3 \quad (2-22)$$

Avec :

$$N_{\psi} = \frac{(1+\sin \phi)}{(1-\sin \phi)} \quad (2-23)$$

$\Psi$  : est l'angle de dilataance du matériau.

L'amplitude des déformations élastoplastiques est alors déterminée à partir de la règle de normalité, selon laquelle le taux de déformation plastique est normal à la surface de charge.

Elle s'exprime :

❖ Dans le cas d'une rupture en cisaillement :

$$d\varepsilon_i^p = \lambda^s \frac{\partial g^s}{\partial \sigma} \text{ avec } i = 1,3 \quad (2-24)$$

❖ Dans le cas d'une rupture en traction :

$$d\varepsilon_i^p = \lambda^t \frac{\partial g^t}{\partial \sigma} \text{ avec } i = 1,3 \quad (2-25)$$

$\lambda^s$  Et  $\lambda^t$  sont les multiplicateurs plastiques, respectivement en cisaillement et en traction, définis par les relations suivantes :

$$\lambda^s = \frac{f^s(\sigma_1, \sigma_3)}{(\alpha_1 - \alpha_2 N_\psi) - (\alpha_2 - \alpha_1 N_\psi) N_\phi} \quad (2-26)$$

Et :

$$\lambda^t = \frac{f^t(\sigma_1^1)}{\alpha_1} \quad (2-27)$$

Où :

$$\sigma_i^1 = \sigma_i^1 + \sigma_i^1 \quad (2-28)$$

Avec  $i = 1,3$

#### II.4.2.3 Implémentation des modèles de comportement mécaniques dans le logiciel

Un certain nombre de modèle de comportement sont disponibles dans le logiciel, que l'on peut classer en trois groupes :

- Le modèle nul : il est utilisé pour représenter des zones de sol excavées.
- Les modèles élastiques : le modèle élastique linéaires isotropes et le modèle élastique transversalement isotrope.
- Les modèles plastiques avec ente autre :

- 1) Le modèle élastique parfaitement plastique de Mohr- Coulomb.
- 2) Le modèle élastoplastique avec écrouissage de Cam Clay.

## **II.5 Conclusion**

Ce chapitre a donné un aperçu du programme FLAC, qui est basé sur la méthode des différences finies et est considéré comme l'outil numérique le plus important dans le domaine de la mécanique des sols, car il est utilisé dans la simulation réaliste du comportement des sols complexes afin de prédire l'effet de différents facteurs sur le sol.

Le programme est basé sur plusieurs modèles, notamment le modèle de Mohr-Coulomb, qui suppose que le matériau se comporte de manière élastique jusqu'à ce qu'il atteigne la rupture et passe à un comportement plastique.

L'une des caractéristiques les plus importantes de ce logiciel est qu'il ne s'agit pas d'une boîte noire, car il montre le cheminement des calculs et permet à l'utilisateur de contrôler toutes les étapes de l'analyse.

## ***Chapitre 3***

### ***Etude numérique***

### III.1 Introduction

Les colonnes ballastées sont un moyen courant d'améliorer la performance des sols aux propriétés médiocres en les remplaçant par des colonnes de gravier compacté qui s'étendent à travers la couche affaiblie :

- Par voie humide (vibro-remplacement)
- Par voie sèche (vibro-déplacement)

La performance d'une colonne ballastée est affectée par une série de facteurs. Dans ce chapitre, FLAC 2d sera utilisé pour simuler le comportement du sol renforcé par une colonne de ballaste. En étudiant l'effet du diamètre de la colonne et de l'angle de frottement interne du sol de la colonne qui, sont deux des principaux facteurs affectant sa performance. Leur modification entraîne un changement direct de la proportion de sol remplacé et de la manière dont les charges sont transférées entre la colonne et le sol environnant, ce qui affecte la capacité portante du sol et son taux d'affaissement.

L'objectif de cette étude est d'analyser les changements résultant de la modification des propriétés géométriques et mécaniques de la colonne de ballastes.

### III.2 Modélisation numérique

Dans cette étude, le logiciel FLAC basé sur la méthode des différences finies a été utilisé pour effectuer une modélisation bidimensionnelle de l'interaction entre la colonne et le sol à traiter sous des charges verticales, où le diamètre et l'angle de frottement de la colonne a été modifiés dans chaque modèle pour étudier leur effet sur la capacité portante.

La loi de Mohr-Coulomb est la loi choisie dans cette étude car elle est considérée comme l'un des modèles les plus simples qui simule le comportement du sol car elle prend en compte :

- L'angle de frottement interne ( $\varphi$ ).
- La cohésion ( $c$ ).
- L'angle de dilatance ( $\psi$ ).
- Le Poids volumique ( $\gamma$ ).
- Le module d'élasticité ( $E$ ).
- Coefficient de poisson ( $\nu$ )

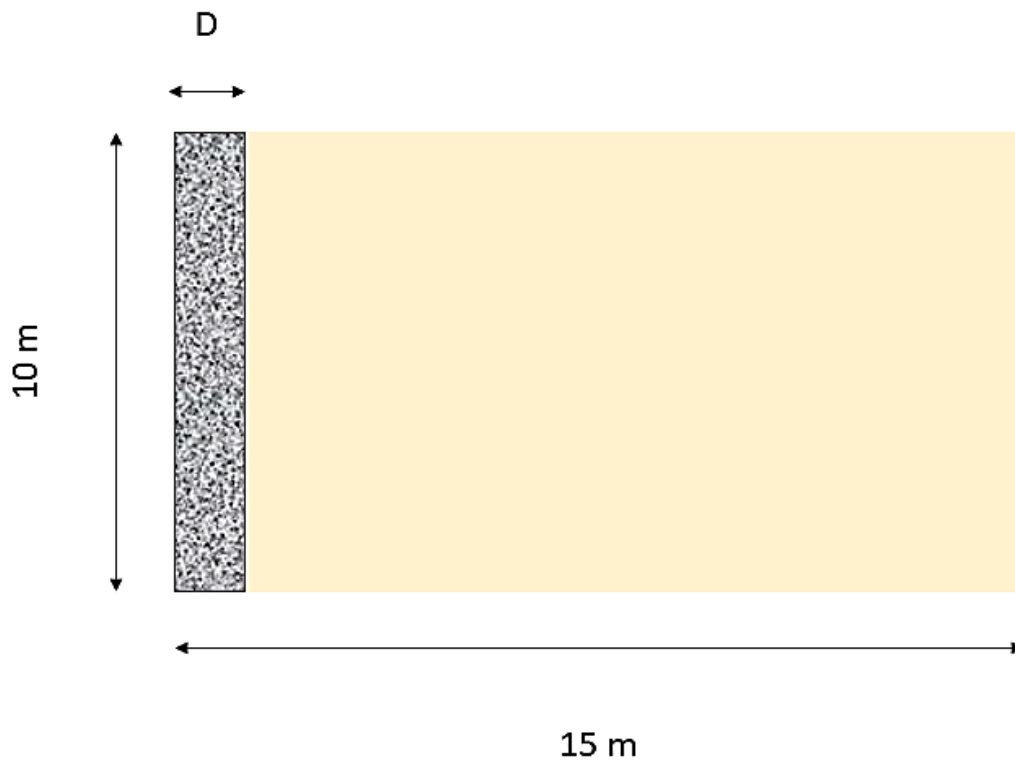
Il convient aux matériaux granulaires dont le comportement plastique peut être représenté par ce modèle, qui est inclus dans le logiciel en tant qu'option de base et intégrée.

### III.3 Présentation du cas étudié

#### III.3.1 Géométrie de modèle

Cette étude porte sur le comportement d'un sol renforcé par une colonne sous une charge verticale répartie. Le modèle représente un sol de 15 m de largeur et de 10 m de hauteur composé de deux matériaux :

- Le sol renforcé.
- La colonne de ballaste.



**Figure 3-1 : Géométrie du modèle**

#### III.3.2 Propriétés des matériaux

La colonne représente un matériau de frottement pur avec une densité volumétrique de  $2000 \text{ Kg/m}^3$ .

Quant au sol traité représente un matériau purement cohérent avec  $C = 100 \text{ kPa}$ .

**Tableau 3-1** : Les caractéristiques géotechniques

| Paramètres                     | Désignation                    | Le sol traitée  | Le ballaste        |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------|
| Poids volumique                | $\gamma$ (Kg /m <sup>3</sup> ) | 2000            | 2000               |
| Cohésion                       | C (kPa)                        | 100             | 0                  |
| Angle de frottement            | $\varphi$ (°)                  | 0               | Varie de 25° à 35° |
| Module de cisaillement         | G (kPa)                        | $1 \times 10^5$ | $1 \times 10^5$    |
| Module volumique               | K (kPa)                        | $2 \times 10^5$ | $2 \times 10^5$    |
| Angle de dilatance             | $\psi$ (°)                     | 0               | 0                  |
| Coefficient de poisson         | $\nu$ (/)                      | 0.28            | 0.28               |
| Module d'élasticité            | E (kPa)                        | 264000          | 264000             |
| Modèle et type de comportement | -                              | Mohr-coulomb    |                    |

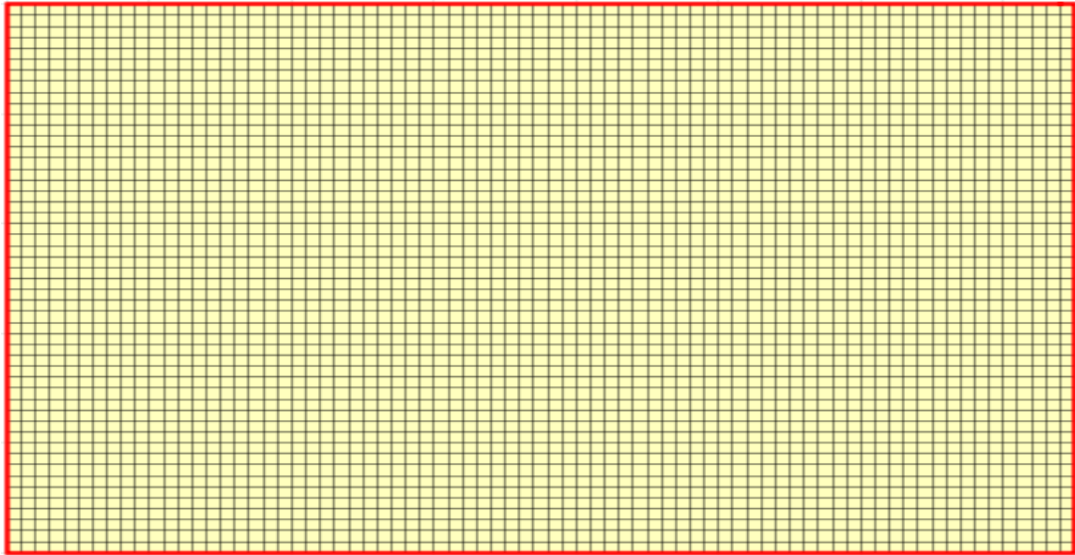
On a :

$$\nu = \frac{3k-2G}{2(3K+G)} \quad (3-1)$$

$$E = 3k (1 - 2\nu) \quad (3-2)$$

### III.3.3 Maillage

Un système de coordonnées axiales est défini, ce qui signifie que le modèle est symétrique par rapport à un axe (généralement utilisé pour simuler des éléments circulaires) et un maillage régulier. Avec des éléments (75 ; 50) est créé.

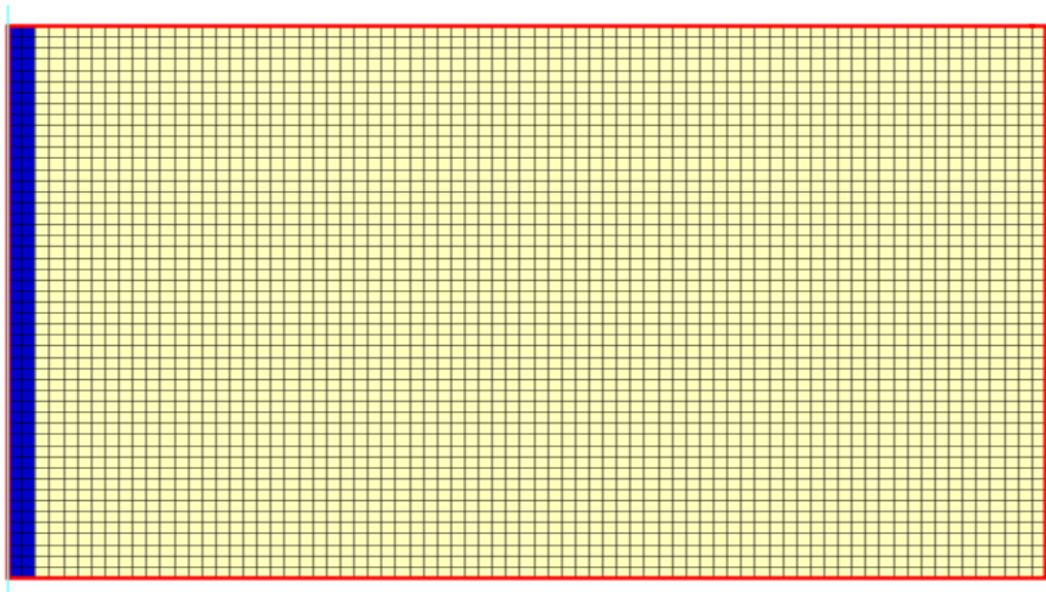


**Figure 3-2 : Maillage**

- Générer deux maillages

L'une représentant la colonne ballastée qui change en fonction du diamètre de colonne.

L'autre représentant le sol traité.

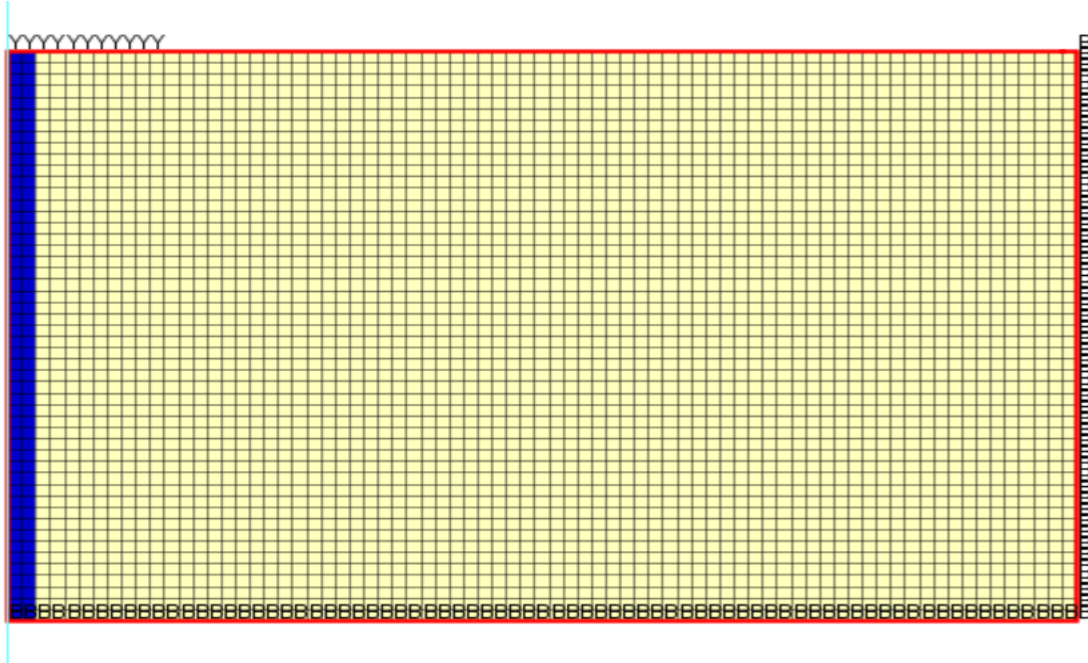


**Figure 3-3 : Génération des deux maillages**

#### III.3.4 Les conditions aux limites

- Des conditions aux limites sont imposées pour empêcher le déplacement horizontal et vertical du bord inférieur.

- Blocage des déplacements horizontaux et verticaux au niveau des frontières latérales droites.
- Blocage des déplacements horizontaux le long de l'axe de symétrie (côté gauche) et seulement le déplacement vertical est permis.



**Figure 3-4 : Les conditions aux limites**

- Activer la gravité  $g=10 \text{ m/s}^2$ , puis appliquer une charge progressive pour simuler le comportement du sol renforcé.

### III.4 Procédure de modélisation

Le logiciel flac 2d a été utilisé pour étudier le comportement du sol renforcé par une colonne ballastée sous une charge verticale.

Les conditions de Mohr-Coulomb ont été utilisées et les propriétés élastoplastiques telles que l'angle de frottement interne, la cohésion, le cisaillement et les modules de masse ont été adoptées. Le diamètre de la colonne a été modifié dans une série de cas numériques et l'angle de frottement interne du sol de la colonne a été modifié pour étudier leur effet sur la capacité portante du sol amélioré.

Les résultats obtenus ont ensuite été analysés en les comparant aux valeurs analytiques et on a calculé l'erreur pour évaluer la performance du modèle et identifier les améliorations résultant de la modification du diamètre et de l'angle de frottement interne.

### III.5 Résultats et discussion

Des déplacements ont été imposés au modèle dans la direction verticale (direction y) et les forces résultantes ont été enregistrées au bord inférieur du domaine étudié, où ces forces représentent les forces de réaction résultant du déplacement appliqué dans ce cas, la force de réaction dans la direction y a été enregistrée à j=51 (force axiale appliquée à la suite du chargement).

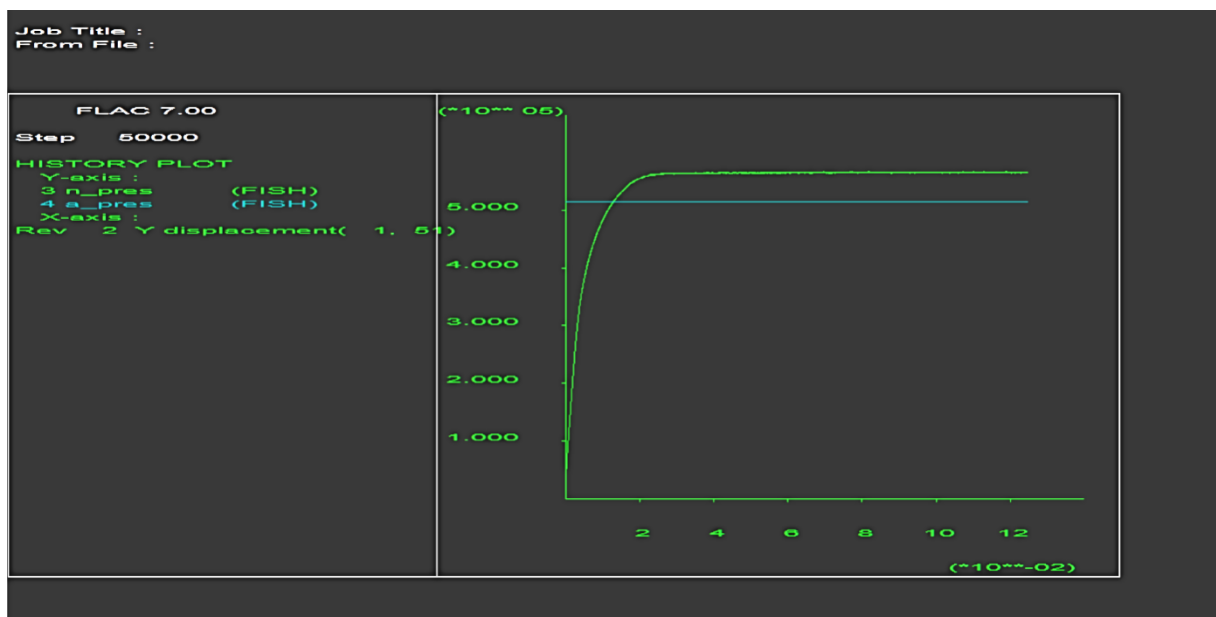
Nous comparons la pression numérique et de la pression théorique avec le calcul du taux d'erreur à l'aide de la relation :

$$Pr = \left| \frac{(a-pres)-(n-pres)}{(a-pres)} \right| \times 100 \quad (3-3)$$

### III.6 Présentation d'études de cas

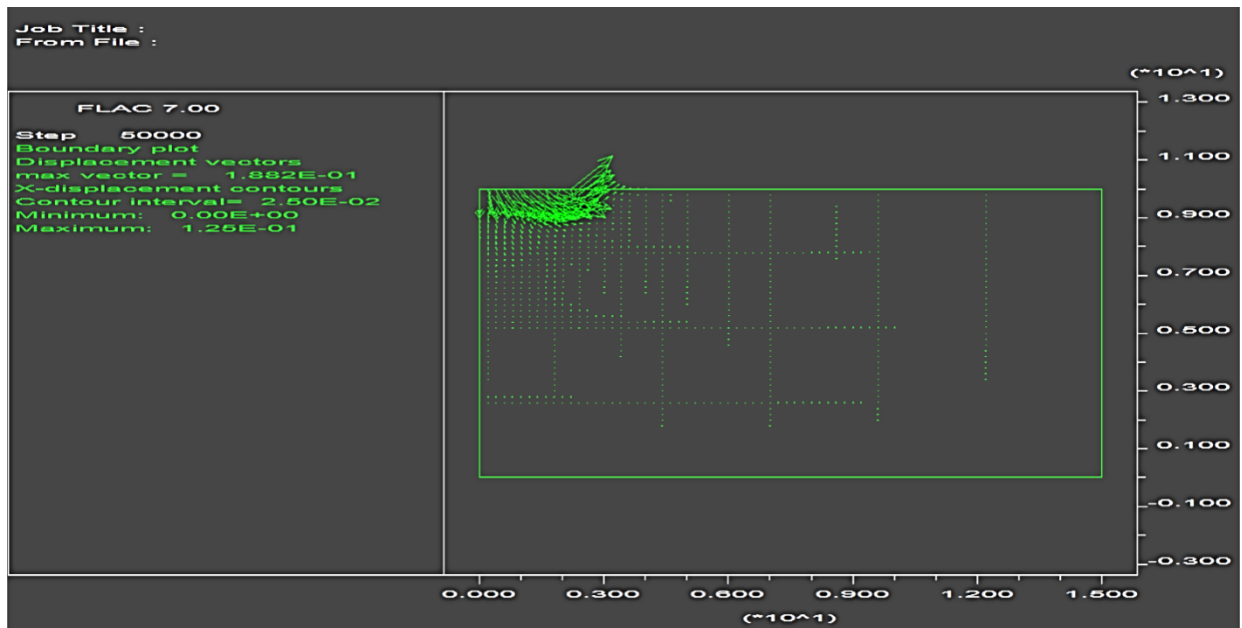
#### III.6.1 Cas n°1 : Avant le renforcement

La figure (3-5) représente l'évolution de la valeur de la capacité portante du sol avant renforcement, où l'on observe que la valeur numérique augmente rapidement dans un premier temps, puis se rapproche de la valeur de la capacité portante analytique et se stabilise.



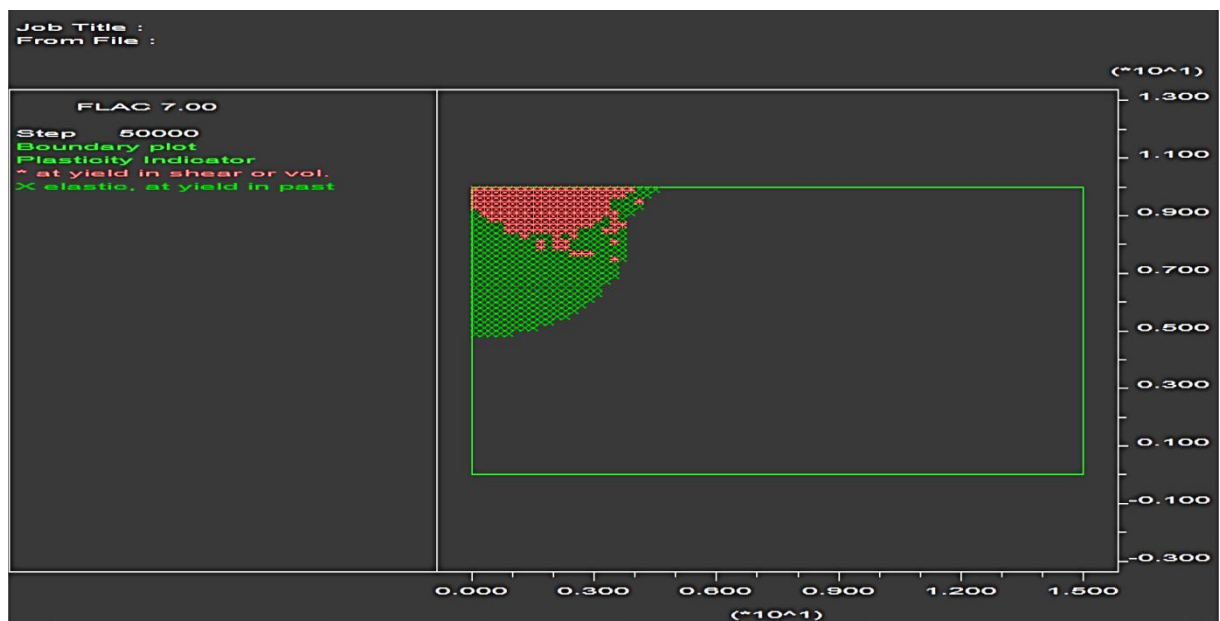
**Figure 3-5** : Evolution de la capacité portante en fonction du déplacement verticale

La figure (3-6) montre un déplacement horizontal du sol sous la fondation vers l'extérieur.



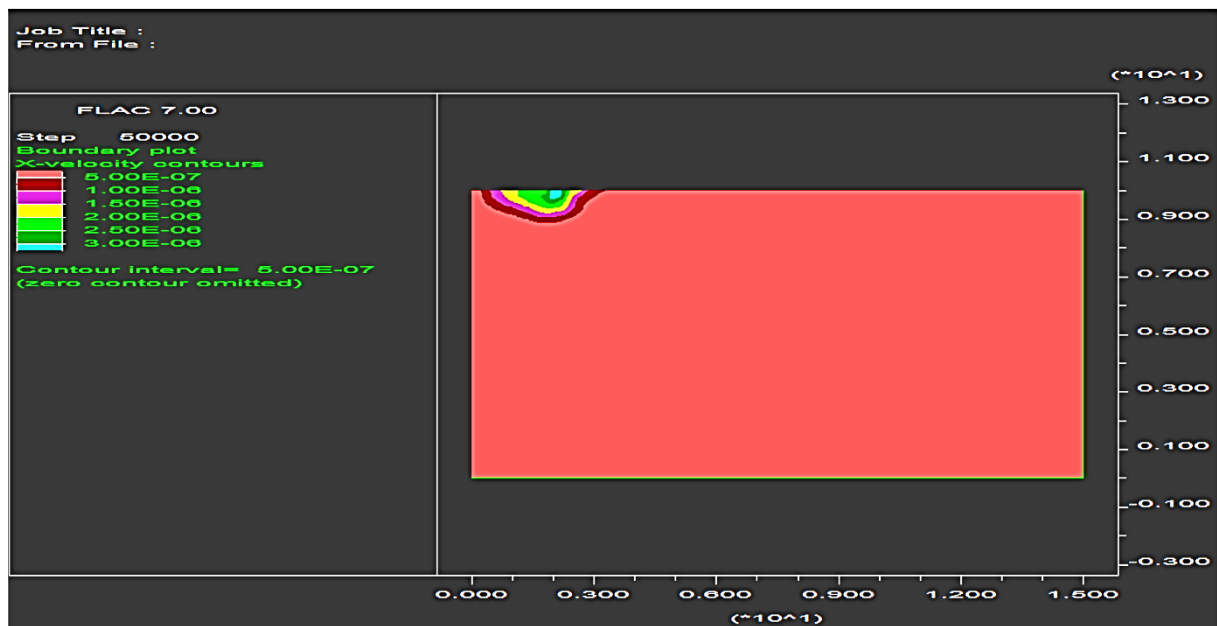
**Figure 3-6 :** Déplacement horizontal du sol sous et au voisinage de la semelle

La figure (3-7) montre les zones plastifiées de couleur rouge centrées sous la fondation, indiquant la présence de déformations directement sous la semelle.



**Figure 3-7 :** Zones plastifiées dans le sol de fondation

La figure (3-8) montre la distribution de la vitesse des déplacements horizontaux (le mécanisme de rupture), le mouvement étant concentré dans le coin supérieur gauche, ce qui indique la présence d'une déformation ou cisaillement.

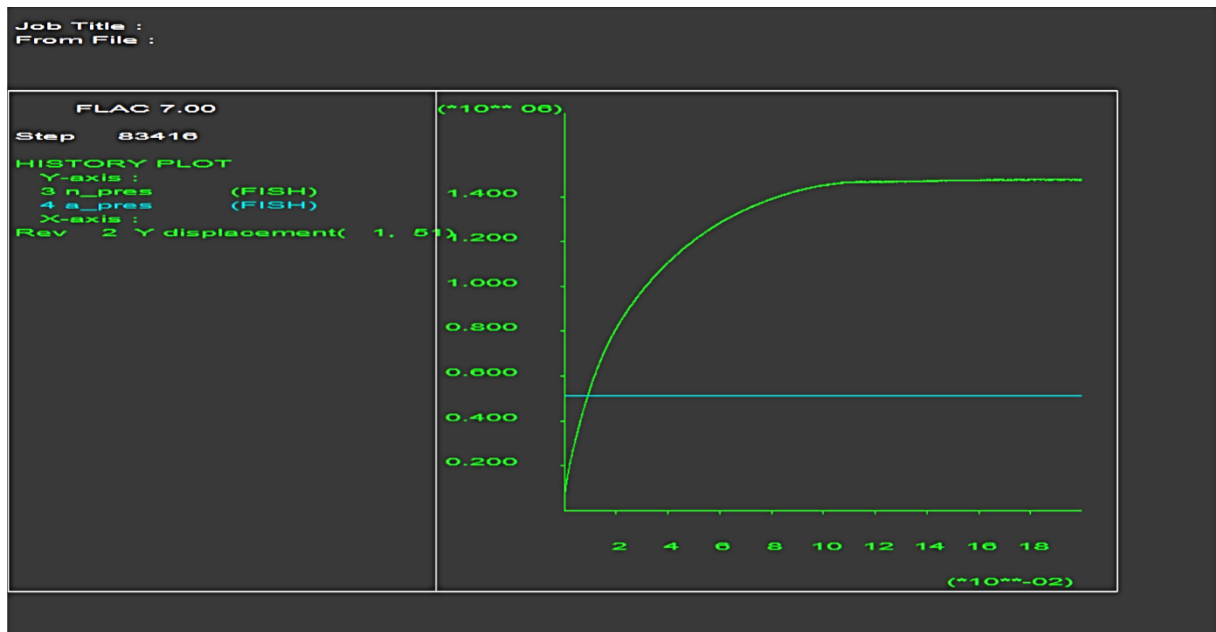


**Figure 3-8 : Mécanisme de rupture avant le renforcement**

### III.6.2 Cas n°2 : Etude numérique du sol renforcé par colonnes ballastées

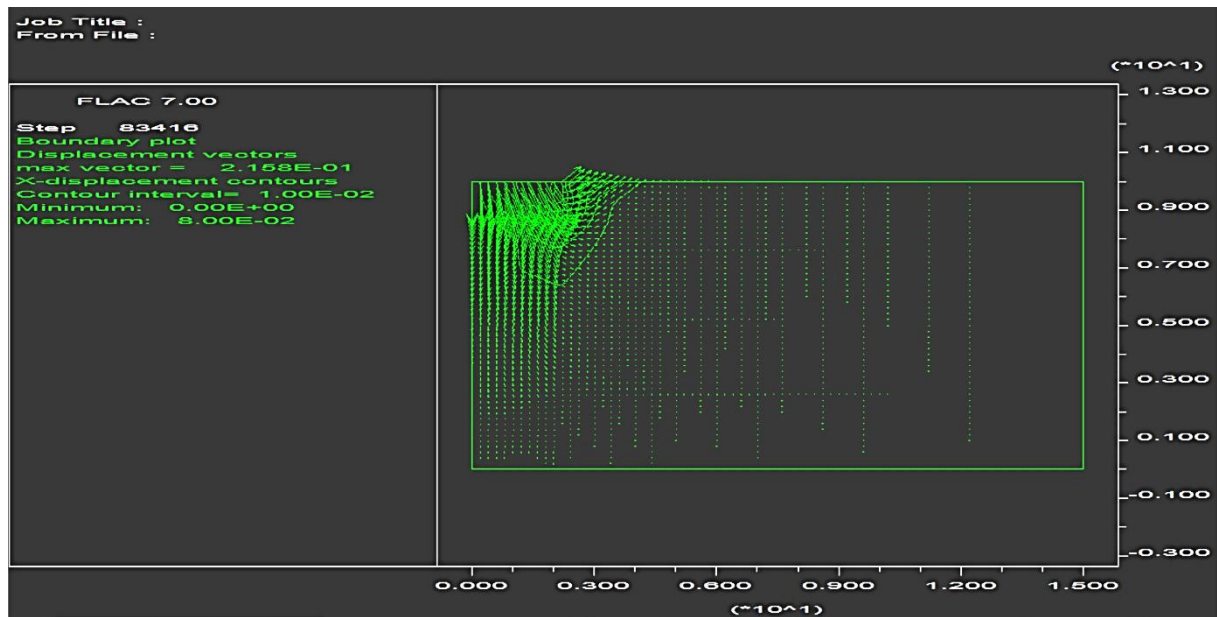
Tout d'abord, on introduit une colonne ballastée de rayon  $R = 2\text{m}$  et d'angle de frottement  $\varphi = 35^\circ$ , dans un massif de sol purement cohérent ( $C = 100\text{kPa}$ ) qui a été étudié dans la section précédente. Ensuite, on exécute le programme par FLAC et on obtient les résultats nécessaires de cette analyse.

La figure (3-9) montre que la valeur de la capacité portante du sol augmente progressivement et se stabilise ensuite à la valeur  $1.477 \times 10^6 \text{ kPa}$ . Elle est supérieure à la valeur analytique d'environ  $9.33 \times 10^5 \text{ kPa}$ .



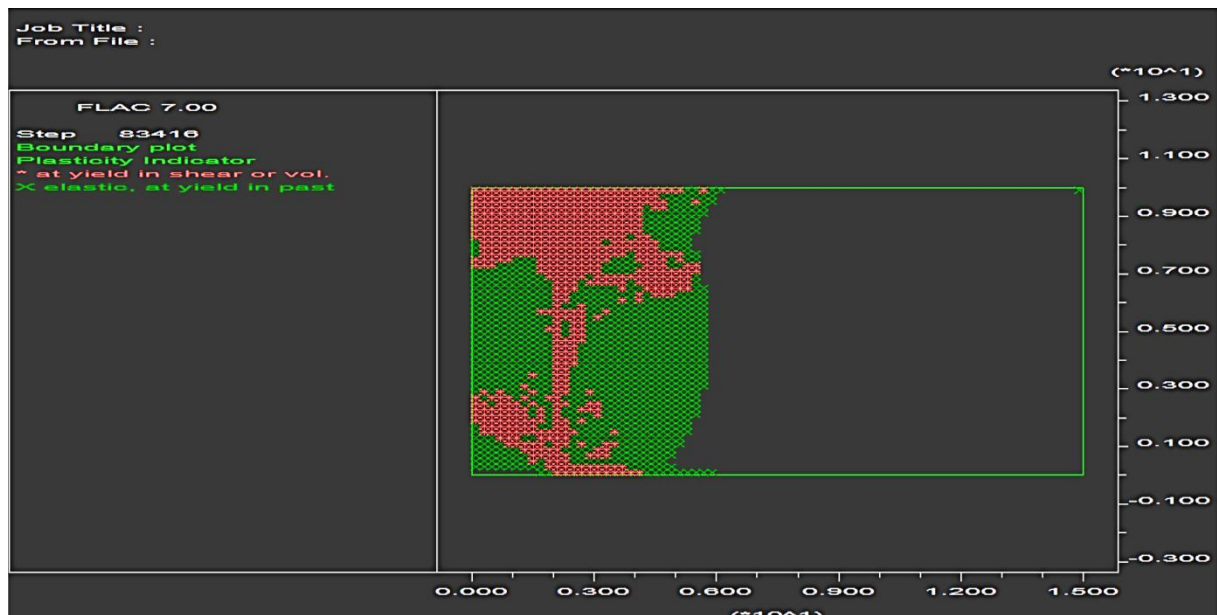
**Figure 3-9 :** Evolution de la capacité portante en fonction du déplacement verticale après le renforcement par colonne ballastée

La figure (3-10) montre les vecteurs déplacement du sol sous la semelle. D'après cette figure on constate que le déplacement du sol au centre de la semelle est vertical, lorsqu'on s'éloigne du centre le sol commence à se déplacer horizontalement vers la droite de la semelle, par contre au voisinage de l'extrémité de la semelle le sol se libère et se déplace vers le haut. Ce phénomène conduit à l'apparition de plusieurs surfaces de glissement dont celle accompagné d'un déplacement maximum est appelée mécanisme de rupture. Cependant, le tassement de la semelle signifie que le sol de la colonne s'est affaissé.



**Figure 3-10 :** Déplacement horizontal du sol après le renforcement

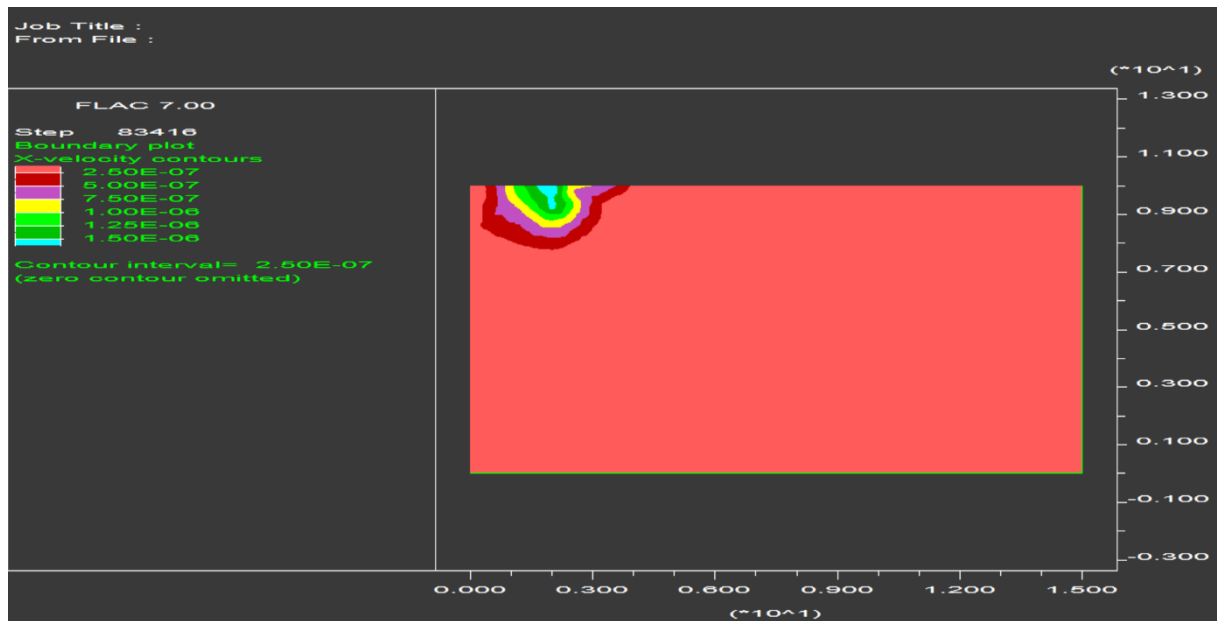
Figure (3-11) montre bien le comportement du sol de fondation sous la semelle, les zones plastifiées sont concentrées sous et au voisinage de la fondation ensuite cette plastification s'étend le long de la surface de contact sol-colonne jusqu'au fond de la colonne, c-à-dire le glissement se produit à l'interface des deux sols de caractéristiques différentes.



**Figure 3-11 :** Zones plastifiées dans un massif de sol renforcé par colonne ballastée

La figure 3-12 montre le contour de vitesse de déplacement horizontal, elle indique aussi la concentration des iso valeurs de vitesse au voisinage du coin gauche de la semelle. On note aussi que

le mécanisme de rupture apparait dans le sol homogène n'est plus comme celui du sol renforcé puisque dans ce dernier il est perturbé par la présence de la discontinuité du matériau.



**Figure 3-12 : Mécanisme de rupture après le renforcement**

### III.6.3 Présentation des résultats

La présente étude comporte trois séries de trente-trois d'analyses effectuées pour étudier le comportement du sol renforcé par colonnes ballastées. Chaque série contient onze analyses est exécutée pour un angle de frottement  $\varphi = 25^\circ$ ,  $30^\circ$  et  $35^\circ$  respectivement. Les trois premières analyses concernent le sol non renforcé c'est le cas de rayon R égal à zéro. Les dix autres analyses s'intéressent du sol renforcé par colonne dont le diamètre varie de 0,20 à 2m avec un incrément de pas de 0,2m. Les résultats obtenus sont résumés et présentés dans le tableau 3-2 ci-dessous.

Tableau 3-2 : Les résultants du calcule par FLAC

| R (m) | $\varphi = 25^\circ$ |        | $\varphi = 30^\circ$ |        | $\varphi = 35^\circ$ |        |
|-------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|
|       | q (kPa)              | Pr (%) | q (kPa)              | Pr (%) | q (kPa)              | Pr (%) |
| 0.0   | $5.658 \times 10^5$  | 10.07  | $5.658 \times 10^5$  | 10.07  | $5.658 \times 10^5$  | 10.7   |
| 0.2   | $5.700 \times 10^5$  | 10.89  | $5.719 \times 10^5$  | 11.26  | $5.753 \times 10^5$  | 11.91  |
| 0.4   | $5.832 \times 10^5$  | 13.46  | $5.923 \times 10^5$  | 15.23  | $6.047 \times 10^5$  | 17.63  |
| 0.6   | $6.050 \times 10^5$  | 17.70  | $6.253 \times 10^5$  | 21.65  | $6.519 \times 10^5$  | 26.84  |
| 0.8   | $6.339 \times 10^5$  | 23.32  | $6.703 \times 10^5$  | 30.40  | $7.175 \times 10^5$  | 39.56  |
| 1     | $6.720 \times 10^5$  | 30.73  | $7.275 \times 10^5$  | 41.53  | $7.990 \times 10^5$  | 55.43  |
| 1.2   | $7.153 \times 10^5$  | 39.16  | $7.945 \times 10^5$  | 54.57  | $9.005 \times 10^5$  | 75.20  |
| 1.4   | $7.657 \times 10^5$  | 48.96  | $8.753 \times 10^5$  | 70.29  | $1.018 \times 10^6$  | 98.05  |
| 1.6   | $8.243 \times 10^5$  | 60.36  | $9.667 \times 10^5$  | 88.07  | $1.153 \times 10^6$  | 124.36 |
| 1.8   | $8.891 \times 10^5$  | 72.97  | $1.071 \times 10^6$  | 108.47 | $1.306 \times 10^6$  | 154.09 |
| 2     | $9.622 \times 10^5$  | 87.19  | $1.188 \times 10^6$  | 131.21 | $1.477 \times 10^6$  | 187.34 |

Pr : Le pourcentage d'amélioration du se calcule par la formule suivante :

$$Pr = \left| \frac{(a-pres)-(n-pres)}{(a-pres)} \right| \times 100 \quad (3-3)$$

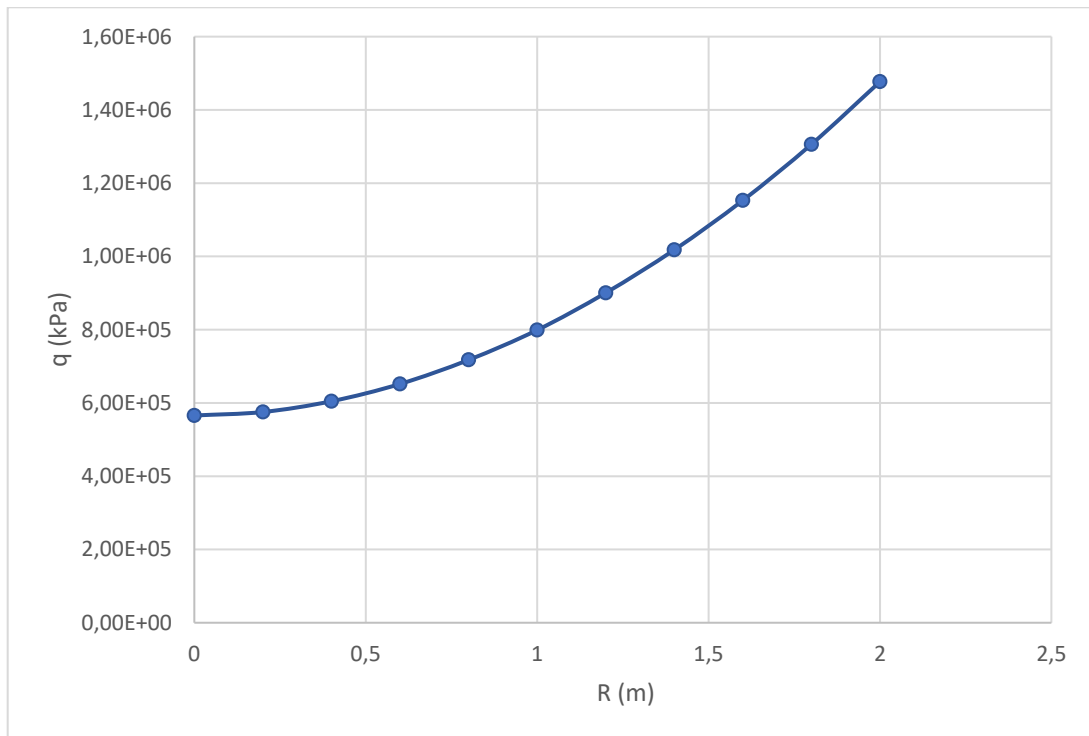
$a_{pres} = 5.14 \times 10^5$  kPa : est la capacité portante obtenue par la méthode analytique.

$n_{pres}$  : est la capacité portante obtenue par la méthode numérique.

Nous remarquons dans le tableau (3-2) que les valeurs de pourcentage d'amélioration augmentent constamment avec l'augmentation du diamètre et de l'angle de frottement interne.

### III.7 Influence du diamètre

La figure (3-13) montre l'évolution de la capacité portante du sol de fondation en fonction du diamètre de la colonne ballastée. On constate que plus la section de la colonne (rayon) augmente, plus la capacité portante du sol est élevée.

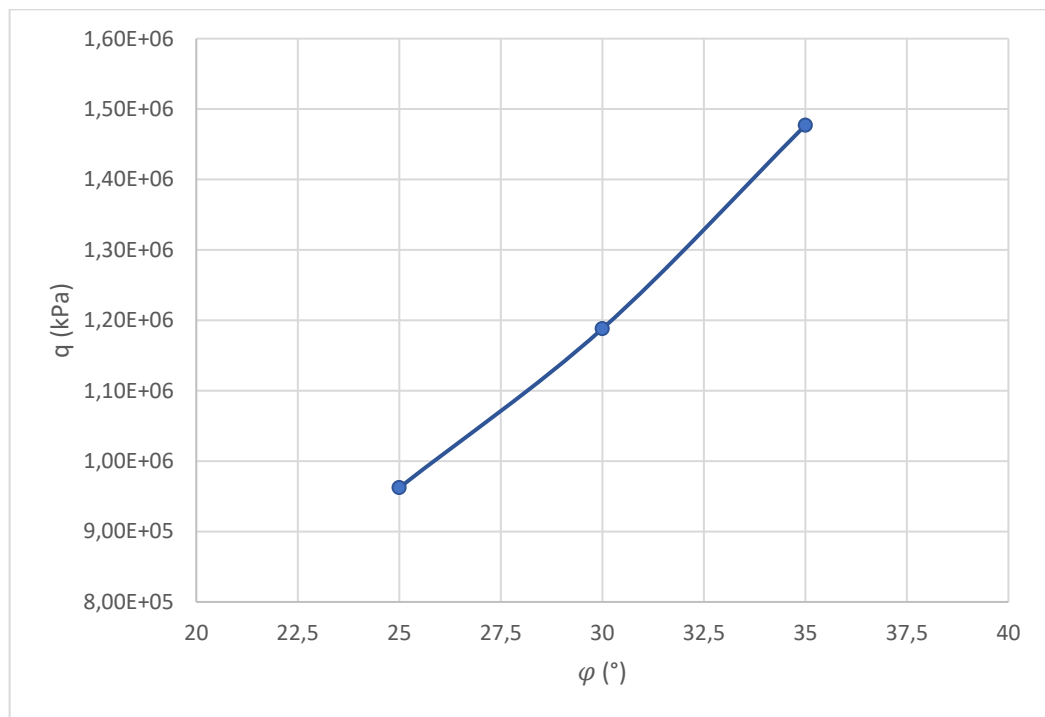


**Figure 3-13 :** Evolution de la capacité portante du sol renforcé en fonction du rayon de colonne ballastée

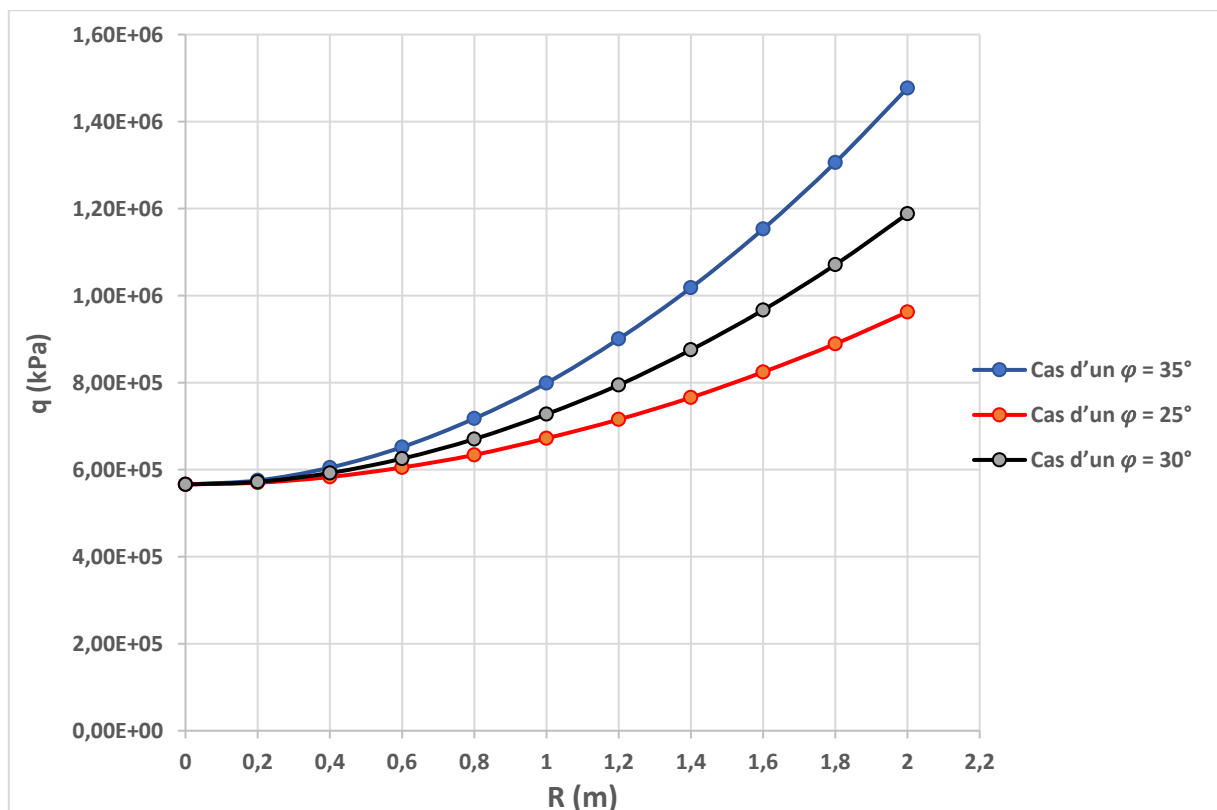
### III.8 Influence de l'angle de frottement

Influence de l'angle de frottement concerne le sol renforcé par une colonne de diamètre constant en faisant d'une part, varié l'angle de frottement interne du matériau constituant la colonne et d'autre part en fixant tous les paramètres du sol et de la colonne, pour tester l'influence de  $\varphi$  sur la capacité portante.

La figure (3-14) représente l'évolution la capacité portante en fonction de l'angle de frottement interne du matériau de la colonne ballastée. On constate que plus l'angle de frottement des ballasts est élevé, plus la valeur de la capacité portante est importante.



**Figure 3-14 :** La variation de la capacité portante du sol en fonction de l'angle de frottement interne du gravier, cas d'une colonne de rayon  $R = 2$  m



**Figure 3-15 :** La variation de la capacité portante du sol en fonction de l'angle de frottement et le rayon de la colonne ballastée

**III.9 Conclusion**

Le présent chapitre comporte une contribution à l'étude numérique du sol renforcé de colonne ballastée par le code FLAC (fast lagrangian analysis of continua). Tout d'abord, cette étude ma permet de familiariser avec ce code et de comprendre son principe de base de calcul. Cependant, une étude numérique de comportement du sol renforcé par des colonnes est effectuée en utilisant trois séries d'analyses pour tester l'influence du diamètre de la colonne ainsi que l'angle de frottement interne du sol constituant la colonne. Les résultats numériques de la capacité portante de ces analyses sont présentés sous forme de valeurs numériques dans le tableau et pour mieux les illustrer ils sont présentés sur les figures.

Les résultats de l'erreur montrent que l'augmentation du diamètre de la colonne entraîne une nette amélioration de la capacité portante et son influence est très significative, tandis que l'angle de frottement interne joue un rôle crucial dans la détermination de l'efficacité du renforcement, étant donné que des valeurs plus élevées de cet angle contribuent à améliorer la cohésion et l'interaction entre la colonne et le sol environnant.

# *Conclusion générale*

Cette thèse est une tentative scientifique de mettre en lumière l'une des techniques efficaces dans le domaine de l'amélioration des sols, à savoir la technique des colonnes ballastées en tant que solution géotechnique économique qui répond aux exigences des sols peu tolérants, et ce sujet a été abordé à travers deux parties principales théoriques et pratiques (numérique).

- La partie théorique : L'aspect théorique est divisé en deux chapitres.

Dans le premier chapitre, une présentation complète des différentes techniques d'amélioration des sols a été présentée avec un accent sur les colonnes ballastées en termes de méthode de mise en œuvre et de mécanismes de rupture potentiels.

Le deuxième chapitre présente l'outil de simulation FLAC 2d utilisé dans cette étude, basé sur le modèle de Mohr-Coulomb, qui représente le comportement du sol de manière simple et efficace.

- La parties pratique :

Dans cet aspect, le logiciel FLAC 2d a été utilisé pour étudier l'effet des variables de l'angle de frottement interne du matériau de la colonne et de son diamètre sur la performance du sol renforcé.

Les résultats de cette étude ont montré que l'efficacité des colonnes ballastée est affectée par certains facteurs mécaniques du matériau de la colonne, tels que l'angle de frottement interne et la cohésion, en plus des dimensions géométriques de la colonne elle-même. Il a été constaté que l'optimisation de ces caractéristiques se répercute directement sur la performance du système dans son ensemble en augmentant la capacité portante du sol et en réduisant le tassement.

Les différences entre les résultats théoriques et numériques incitent à la prudence lorsqu'il s'agit de généraliser des résultats sans vérification empirique.

En conclusion, cette simulation a montré que l'amélioration du sol de cette manière n'augmente pas seulement sa performance, mais lui confère également un comportement plus stable et plus équilibré sous charge, ce qui prouve la faisabilité de la technique dans la pratique, à condition que les paramètres de conception et de mise en œuvre soient soigneusement sélectionnés.

# Références bibliographiques

Bazizi, H., & Kara, D. (2010). Renforcement des sols par colonnes ballastées : Cas de la zone portuaire de Bejaia (Mémoire de Master). Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

COPREC. (2004). Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et ouvrages sensibles aux tassements.

Dhouib, A. (2004). Amélioration des sols en place. Conférence.

Dhouib, A., & Blondeau, F. (2005). Colonnes ballastées : Techniques de mise en œuvre, domaine d'application, comportement, justification, contrôle, axes de recherche et de développement. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

FLAC. (2005). Fast Lagrangian Analysis of Continua. Minneapolis, USA: ITASCA Consulting Group, Inc.

Gueboub, I., & Hamadi, Y. (2015). Renforcement des sols par colonnes ballastées : Centrale électrique turbine à gaz Boufarik (Mémoire de Master). Université de Blida 1.

Guerroui, O. (2018). Renforcement des sols par colonnes ballastées (Mémoire de Master). Université 08 Mai 1945 de Guelma.

Laimeche, A. (2017). Dimensionnement des colonnes ballastées par la méthode de Priebe (Mémoire de Master). École Nationale Polytechnique.

Lzighmi, & Messis, Ch. (2008). Renforcement des sols par colonnes ballastées (Mémoire d'Ingénieur d'État). École des Travaux Publics.

Mekaoussi, A. (2013). Analyse d'un modèle réduit de colonnes ballastées par la méthode des éléments finis (Mémoire de Magistère). Université El Hadj Lakhdar de Batna.

Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. (2011). Article R111-40 du Code de la Construction et de l'Habitation : Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et ouvrages sensibles au tassement (Version n°2).

Noui, A. (2012). Conception des fondations sur colonnes ballastées, cas d'ouvrages d'art (Mémoire de Magistère). Université de Batna.

Romain, A. (2010). Influence d'une colonne ballastée sur le comportement des sols argileux. Institut National des Sciences Appliquées / University of Strathclyde Engineering.

Tabchouche, S. (2018). Étude de comportement des sols mous renforcés par colonnes ballastées (Thèse de doctorat). Université de Biskra.

Zighmi, B. (2011). Étude numérique de l'influence des paramètres géotechniques sur le comportement des sols renforcés par colonnes ballastées (Thèse de Magister). Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.