

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET PUBLIQUE

Ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil

Laboratoire des Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de Master en GÉNIE CIVIL

## Thème

**Etude de renforcement de sol par colonnes  
ballastées sèches cas de Promotion 220 Logements à  
Cardozo à ANNABA (Algérie)**

Réalisé par :

**CHOUGUI Bachir**

Sous la direction de : **Mme. Ratiba KETTAB** Professeur ENP

### Composition du Jury :

Président	M .A. BALI	Professeur	ENP
Rapporteur	Mme. R.MITICHE - KETTAB	Professeur	ENP
	M. C. BOUREZAK	Ingénieur	KELLER
Examineurs	M. S. LAKHAL	MAA	ENP
	Mme. S. STIHI	MAA	ENP

ENP 2017



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET PUBLIQUE

Ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil

Laboratoire des Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de Master en GÉNIE CIVIL

## Thème

**Etude de renforcement de sol par colonnes  
ballastées sèches cas de Promotion 220 Logements à  
Cardozo à ANNABA (Algérie)**

Réalisé par :

**CHOUGUI Bachir**

Sous la direction de : **Mme. Ratiba KETTAB** Professeur ENP

### Composition du Jury :

Président	M .A. BALI	Professeur	ENP
Rapporteur	Mme. R.MITICHE - KETTAB	Professeur	ENP
	M. C. BOUREZAK	Ingénieur	KELLER
Examineurs	M. S. LAKHAL	MAA	ENP
	Mme. S. STIHI	MAA	ENP

ENP 2017

## المخلص

التربة عموماً مادة غير متجانسة ذات خصائص متغيرة جداً المشاكل الرئيسية المرتبطة بالتربة تتمثل عموماً في قدرة تحمل منخفضة، تشوه كبير (تكدسات مطلقة وتفاضلية) تحت الأحمال الساكنة أو الديناميكية (زلازل)، وخاصة التربة الرملية الفضفاضة والمشبعة، تطور ميكانيكا التربة، والبحوث في مجال الهندسة الجيوتقنية، سمح بتطوير مجموعة واسعة من التقنيات لتعزيز التربة ذات خصائص جيوميكانيكية فقيرة ومن بين هذه التقنيات سندرس الأعمدة الحجرية وهي جزء من تحسين التربة عن طريق الإدراج المرن.

**الكلمات المفتاحية:** تقنيات، تدعيم، التربة، عمود، حجر

## Abstract

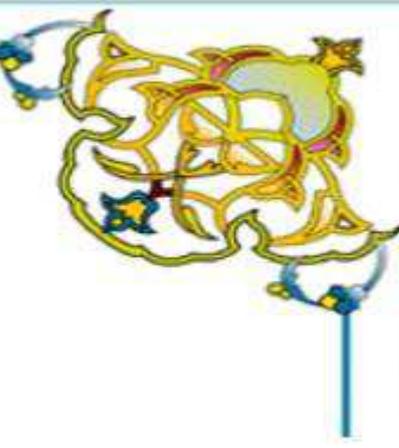
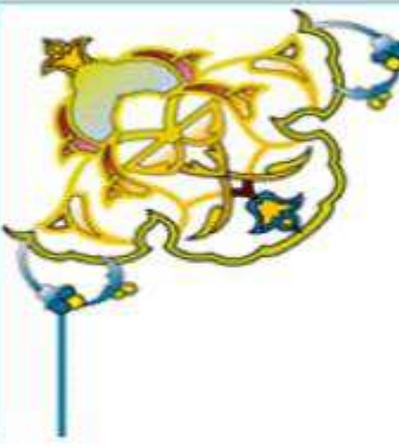
Soil is generally a heterogeneous material with very variable characteristics. The main problems related to the soil are generally manifested by low bearing capacity, large deformations (absolute and differential settlements) under static or dynamic loading (earthquakes) especially loose and saturated sandy soils. The development of soil mechanics, and research in the field of geotechnical engineering, allowed the development of a wide range of techniques for enhancing a soil with poor geomechanical properties. Among these techniques, we will study the stone columns, which are part of land improvements using soft inclusions.

**Keywords:** Techniques, reinforcement, soil, column, ballast.

## Résumé

Le sol est généralement un matériau hétérogène avec des caractéristiques très variables. Les principaux problèmes liés aux sols de manière générale se manifestent par une capacité portante faible, des déformations (tassements absolus ou différentiels) importants sous charges statiques, ou dynamiques (séisme) particulièrement pour les sols sableux lâches et saturés. Le développement de la mécanique des sols, et les recherches dans le domaine de la géotechnique, ont permis la mise au point d'une large gamme de techniques permettant l'amélioration d'un sol présentant de médiocres propriétés géomécaniques. Parmi ces techniques, on étudiera celle des colonnes ballastées, faisant partie des renforcements de sols par inclusions souples.

**Mots clés :** Techniques, renforcement, sol, colonne, ballast



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

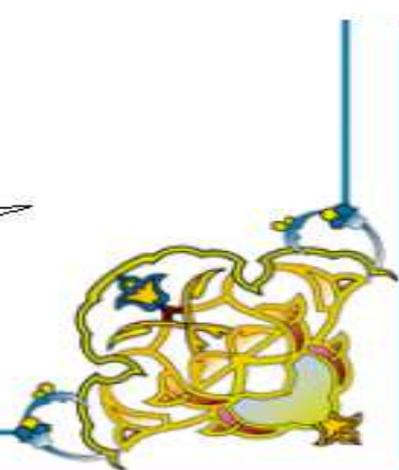
A mes chers parents en témoignage pour leur  
amour et leurs sacrifices sans limites.

A mes frères ADEL et YASIN  
et mes sœurs et leur enfants RAHMA et BARAA et NORE HANE et  
HIBATE ALRAHMANE et MOHAMAD.

A ma grande mère mes oncles, mes tantes, cousins et cousines  
ainsi qu'à toute ma familles.

A BOUCHIHA BACHIR et TALAA MOLOUD

et tous mes amis sans exemption.



CHOUGUI BACHIR

CHOUGUI

## REMERCIEMENT

*En cette mémorable occasion, je tien à remercier en premier lieu et avant tout ALLAH le tout puissant qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail dans les meilleures conditions.*

*Je remercie chaleureusement mon promotrice Pr.R. KETTAB et mon promoteur M.CHAWKI BOUREZAK pour m'avoir encadré et guidé tout au long de ce travail et qui m'ont fait profiter de*

*leurs expériences malgré leurs nombreuses occupations*

*Qu'elles trouvent ici ma sincère gratitude*

*Merci également aux membres du jury qui m'ont fait*

*L'honneur de juger mon travail*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance*

*à Ma familles pour sa précieuse aide*

*Une pensée très spéciale à mes enseignants de*

*L'ENP.*

*Enfin j'adresse mes remerciements à tous mes amis*

## REMERCI

# Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

**Introduction générale** .....11

## **Chapitre I :Etat de connaissances sur les colonnes ballastées**

▪ I.1.introduction .....	13
▪ I.2.Classement des travaux spéciaux .....	13
▪ I.2.1.Explication et comparaison des techniques.....	14
▪ I.2.2.Fondations superficielles.....	15
▪ I.3. Colonnes ballastées .....	15
▪ I.3.1. Présentation .....	15
▪ I.3.2. Domaines d’application.....	16
○ I.3.2. 1.Ouvrages .....	16
○ I.3.2.2. Charge appliquées et tolérances imposées .....	17
○ I.3.2.3. Sols concernés.....	17
▪ I.3.3.Caractéristiques des colonnes ballastées .....	19
○ I.3.3.1.Longueur .....	19
○ I.3.3.2. Diamètre :.....	19
○ I.3.3.3. Maillage .....	20
▪ I.3.4. Choix des matériaux.....	20
○ I.3.4.1 .Matériaux constitutifs des colonnes.....	20
○ I.3.4.2. Matériaux de matelas de répartition.....	21
▪ I.3.5. Mise en œuvre .....	22
○ I.3.4. 1. Mise en place par voie humide .....	22
○ I.3.4. 2. Mise en place par voie sèche. ....	25
▪ I.3.6. Mécanisme de rupture de la colonne ballastée.....	26
▪ I.4.Conclusion.....	27

## **Chapitre II :Présentation du projet**

▪ II.1.Introduction.....	29
▪ II.2.Présentation du projet .....	29
▪ II.3. Caractéristiques de l’ouvrages .....	30
▪ II.4.Contexte sismique.....	31

▪ II.4.Conclusion.....	32
------------------------	----

### Chapitre III: Reconnaissance du site

▪ III.1.Introduction.....	34
▪ III.2. Contexte géotechnique au droit du projet.....	34
▪ III.2.1. Synthèse de la campagne de reconnaissance .....	34
▪ III.3. Caractéristiques retenues.....	37
▪ III.4.conclusion.....	37

### Chapitre IV: Descente des charges et méthode de renforcement choisit

▪ VI.1.Introduction .....	39
▪ IV.2.Descentes des charges .....	39
▪ IV.3.méthode de renforcement choisi .....	40
▪ IV.3. 1.Traitement par colonnes ballastées .....	40
▪ IV.3.2. Objectifs du traitement et Justification de choix.....	40
○ IV.3.2.1. Objectifs du traitement.....	40
○ IV.3.2.2. Justification De Choix.....	40
▪ IV.4. Caractéristiques des matériaux constitutifs.....	41
▪ IV.5. Caractéristiques du traitement.....	42
▪ IV.6.conclusion.....	43

### Chapitre V :Calcul du ronforecement

▪ V.1.introduction .....	45
▪ V.2.Contrainte admissible au sol.....	45
▪ V.3. Portance d'une colonne ballastée isolée.....	47
▪ V.3.1. Contrainte a la rupture .....	47
▪ V.3.2. Contrainte admissible .....	47
▪ V.3.3.capacité portante de la colonne.....	47
▪ V.4. Vérification de la capacité portante par le sol renforce : .....	49
▪ V.5.Calculs de tassements .....	50
▪ V.5.1. Tassements absolus sous les ouvrages .....	50
▪ V.5.2.Calculs du tassements différentiel.....	52
▪ V.6.Conclusion.....	54

## Chapitre VI :Essais de controle et de réception

▪ VI .1 .Introduction .....	56
▪ VI .2. Essais de Contrôle des colonnes ballastées .....	56
▪ VI.2.1. Avant la réalisation .....	56
▪ VI .2 .2. Pendant la réalisation (autocontrôle).....	56
▪ VI.3.Essais de réception des colonnes ballastées .....	57
▪ VI.3.1.Contrôle du diamètre de la colonne .....	57
▪ VI.3.2.Essais au pénétromètre statique (CPT), pour vérifier la compacité et la continuité.....	59
▪ VI .3 .3. Essai de chargement.....	61
○ VI .3 .3.1.Objectifs de l’essai .....	61
○ VI .3 .3.2.Description de l’essai .....	62
○ VI .3 .3.3. Choix des colonnes d’essai .....	62
○ VI .3 .3.4. Charge appliquée.....	62
○ VI .3 .3.5. Paliers de chargement .....	62
▪ VI .4. Conclusion.....	63
▪ <b>Conclusion générale</b> .....	64
▪ <b>Références bibliographique</b> .....	65
▪ <b>Annexes</b> .....	66

## Liste des tableaux

Tableau I.1: Limites d'application des colonnes ballastées : charges appliquées et tolérances imposées .....	17
Tableau I.2: Champ d'application des colonnes ballastées : nature et résistance des sols (étroite latérale) [DHOUIB - colonnes ballastées] .....	18
Tableau I.3: Caractéristiques minimales des matériaux .....	20
Tableau II.1: coefficient d'accélération de zone A .....	32
Tableau III.1: Caractéristiques géomécaniques du sondage P3 .....	37
Tableau III.2: Caractéristiques géomécaniques du sondage P10 .....	37
Tableau IV.1: Charges sous les bâtiments .....	39
Tableau IV.2: Profondeurs des colonnes attendues au niveau de chaque sondage .....	42
Tableau IV.3: les profondeurs des colonnes pour les sondages complémentaires de Keller ...	42
Tableau IV.4: Diamètres des colonnes ballastés .....	43
Tableau V.1: calculs $V_d$ ; $R_0$ ; $V_{résiduelle}$ .....	46
Tableau V.2: la vérification de portance du sol non renforcé sous 91 kPa à l'ELS : .....	46
Tableau V.3: La capacité portante des colonnes A l'ELS .....	48
Tableau V.4: La capacité portante des colonnes A l'ELU .....	48
Tableau V.5: résultats pour le sol renforcé pour sous une contrainte ELS de 91kPa .....	49
Tableau V.6: résultats pour le sol renforcé pour sous une contrainte ELU de 125kPa .....	49
Tableau V.7: Vérifiera de la capacité portante CBet le non fluage du sol .....	50
Tableau V.8: Valeurs de $a_c$ .....	51

## Liste des figures

Figure I.1:Différence de report de charge entre les différents .....	14
Figure I.2:Semelle isolée et semelle filante .....	15
Figure I.3:Tête de colonne ballastée.....	16
Figure I.4: Domaines d'application des techniques de renforcement et d'amélioration de sol en fonction de la granulométrie du sol [DHOUIB - colonnes ballastées].....	19
FigureI.5. Matelas de répartition (Document COPREC 2004) .....	21
Figure I.6: Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide.....	23
Figure I.7: Remplissage(1) Phénomène de liquéfaction(2) Finition d'une colonne (3et4).....	24
Figure I.8 : Exemple de vibreur Keller ( <i>voie humide</i> ) .....	24
Figure I.9: Etapes de mise en œuvre d'une colonne ballastée par voie sèche.....	25
Figure I.10:Type de rupture d'une colonne isolée chargée en tête .....	27
Figure II.1:plan de masse et situation du projet .....	29
Figure II.2:Coupe transversale du bâtiment .....	30
Figure II.3: Niveau 0,00 des différents ouvrages .....	31
Figure II.4: Carte de zonage sismique de l'Algérie (RPA ). .....	31
Figure III.1: Sondages menés par le bureau d'études L.T.P.Est .....	35
Figure III.2: Sondages complémentaires menés par KELLER .....	36
Figure III.3: Délimitation de la zone où le toit de la formation 3 se situe supérieure à 15,0m/TN .....	36
Figure IV.1. Détail de calculs La contrainte en ELUA .....	39
Figure IV.2. Schéma général de l'application des techniques d'amélioration des sols-et domaine de validité .....	41
Figure V.1:Coupe transversal du sondage P3.....	51
Figure V.2: Cote du toit de la formation 3 .....	52
Figure V.3: Résultats CPT de sondages n°1431et n°1535 .....	53
Figure V.4:Coupe transversal du sondage1431.....	54
Figure V.5: Coupe transversal du sondage 1535.....	54
Figure VI.1. Dégarnissage d'une colonne .....	57
Figure :VI.2 :Schéma général sur la section transversale du vibreur .....	58
Figure VI.3 : Mesure des deux dimensions (L et 2R) d'une colonne après son dégarnissage.....	58
Figure VI.4. Exemple de Réalisation de l'essai CPT dans l'axe des colonnes .....	59
Figure VI.5 : Profil pénétrométrique typique dans l'axe des colonnes .....	60
Figure VI.6 : Principe de l'essai de chargement.....	62

## Liste des abréviations

- **a**: Taux d'incorporation (ou coefficient de substitution),
- **Ac**: Section droite de la colonne
- **AS**: Section droite du sol
- **CB** : colonne ballastée
- **CBS** : colonne ballastée sèche
- **CFMS** : Comité Français de Mécanique des Sols
- **CPT** : Cône pénétration test
- **D10**: Diamètre pour lequel le passant égale à 10%,
- **D30**: Diamètre pour lequel le passant égale à 30%,
- **D100**: Diamètre pour lequel le passant égale à 100%,
- **Dc**: Diamètre droit de la colonne ballastée
- **Eoed** : Module œdométrique
- **Qser** : La charge aux états limites de service (ELS) en tête de la colonne
- **q<sub>c</sub>** : Résistance de pointe mesurée au pénétromètre statique (CPT)
- **q<sub>ELS</sub>**: Contrainte à l'état limite de service)
- **qr**: Contrainte de rupture en tête de colonne
- **SPT** : Standard pénétration test
- **φ<sub>c</sub>**: Angle de frottement du ballast,
- **w<sub>i</sub>**: Tassement final (calculé après traitement)
- **NGA** : niveau géologique Alegria
- **TN** : terrain naturelle
- **E<sub>y</sub>** Un module de Young = 60 MPa
- **φ'<sub>c</sub>** : angle de frottement
- **v** : coefficient de Poisson
- **.q<sub>ce</sub>** : la résistance de pointe équivalente.
- **A'sol** : la valeur de la surface effective de la fondation
- **Vd**: la valeur de calcul de la composante verticale de la charge transmise par la fondation superficielle au terrain ;

## Introduction générale

Le développement économique et l'accroissement des populations des villes saturées entraînent l'extension des agglomérations. Ainsi, de plus en plus de constructions et d'infrastructures sont construites sur des sols de qualités médiocres tels que les sols meubles dans les zones côtières ou sur les zones de dépôt de sédiments marécageux. Et ceci sous la menace de plusieurs phénomènes d'instabilité très dangereux et de très lourdes conséquences. Cela entraîne une importance grandissante des nombreuses méthodes et techniques d'amélioration du sol.

Le traitement de sol par colonnes ballastées est l'une des techniques préférée par les géotechniciens grâce à ses avantages techniques et économiques, en plus de l'augmentation de la capacité portante de sol traité, les colonnes jouent plusieurs rôles : elles travaillent comme des drains verticaux, transfèrent les charges structurelles vers un substratum par l'intermédiaire d'un matelas de répartition et empêchent la liquéfaction de sol lors d'un séisme.

Les colonnes ballastées consistent dans le renforcement par compactage et incorporation de matériau granulaire, d'un terrain dont les caractéristiques sont insuffisantes pour une fondation directe sur le sol de charges réparties ou ponctuelles. La colonne ballastée agit comme élément porteur et comme drain vertical.

Dans ce contexte, ce mémoire traite du problème de l'amélioration d'un sol de fondation par colonnes ballastées à Cardozo à ANNABA, qui devra recevoir 220 logements. Notre travail comporte six chapitres.

Ce mémoire, commence par une introduction générale dans laquelle on donne une définition d'amélioration des sols, puis on présente dans le chapitre I le renforcement des sols par colonnes ballastées, domaine d'emploi son fonctionnement ainsi que sa réalisation

On donne dans le chapitre II une présentation du projet. Puis On réalise dans le chapitre III une synthèse géotechnique du sol de fondation sur la base de l'étude de sol effectuée, afin d'arrêter les paramètres de calcul du projet.

Le chapitre IV synthétisé la décente des charges et la méthode de renforcement choisit.

Les calculs sur la capacité portante du sol et le tassement à partir des résultats des essais de laboratoire in-situ feront l'objet du Chapitre V.

Les essais de contrôles qui devraient se faire sur les colonnes sont présentés au Chapitre VI.

En fin, on terminera notre étude par une conclusion générale

# Chapitre I

## Etat de connaissances sur les colonnes ballastées

## I.1.introduction

Ce chapitre présente d'abord les travaux spéciaux de fondations, de renforcement et d'amélioration de sol, avec une explication de comportement mécanique des colonnes ballastées et les techniques de réalisation les plus utilisées.

La technique des colonnes ballastées est un moyen courant de renforcement de sol, Elle peut être mise en œuvre pour tout type d'ouvrages comme des bâtiments, des ouvrages logistiques, des infrastructures, des remblais, la stabilisation des talus, des réservoirs, etc.

Pour pouvoir appliquer les méthodes de dimensionnement, il faut comprendre les bases de la technique des colonnes ballastées.

## I.2.Clasement des travaux spéciaux

Les travaux classiques de fondations sont réalisés sur des sols en place de bonne compacité. Ce sont généralement des fondations superficielles simples, réalisées par des entreprises de gros œuvre.

Lorsque le sol en place n'est pas de bonne compacité, il est nécessaire d'avoir recours aux travaux spéciaux de fondations, On peut distinguer trois grandes catégories de travaux spéciaux:

- **Les fondations, qui peuvent être :**
  - Profondes (pieux forés ou battus par exemple)
  - Semi-profondes (puits bétonnés de faible profondeur)
- **Le renforcement de sol, qui peut être de deux types :**
  - Inclusions rigides (inclusion INSER®)
  - Inclusions souples (colonnes ballastées)
- **L'amélioration de sol**
  - Vibro-compactage
  - Compactage dynamique

L'intérêt principal du renforcement et de l'amélioration du sol est la possibilité après réalisation de mettre en place une fondation superficielle supportant les structures du bâtiment, Le coût rapporté aux fondations est alors diminué par rapport à des fondations profondes ou semi-profondes. C'est donc souvent une alternative financièrement intéressante.

### I.2.1. Explication et comparaison des techniques

Le renforcement de sol et l'amélioration de sol ne sont pas des fondations, mais des traitements de sol ayant pour but d'améliorer les caractéristiques mécaniques du sol en place afin :

- qu'il supporte des charges supérieures à celles qu'il pouvait supporter initialement.
- qu'il admette un tassement inférieur à celui qu'il aurait admis initialement.

Notons la différence entre renforcement et amélioration de sol :

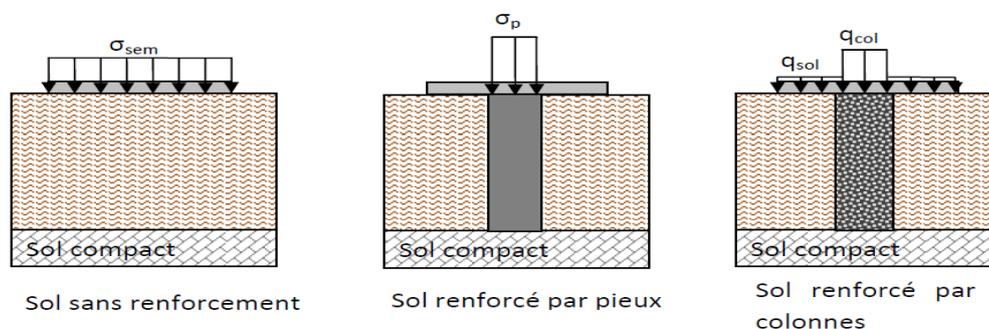
L'amélioration de sol améliore physiquement le sol en place par une réorganisation granulaire du sol et par une diminution de l'indice des vides ; alors que le renforcement fait appel à un matériau extérieur mis en place dans le sol. C'est alors le complexe « sol-renforcement » qui améliore de façon globale les caractéristiques mécaniques du sol.

La mise en place d'inclusions rigides ou souples permet d'augmenter la capacité portante du sol et de réduire les tassements, donc c'est le sol et l'inclusion qui reprennent les charges apportées par la fondation.

Dans le cas du sol non renforcé, la semelle de fondation applique une contrainte globalement constante sous toute sa surface.

Dans le cas du sol renforcé par pieux, les contraintes ne sont pas reprises directement par le sol, mais seulement par les pieux qui les redistribuent au sol par frottement latéral et par résistance de pointe.

Dans le cas du sol renforcé par colonnes ballastées par exemple, la contrainte apportée par la semelle de fondation est reprise, d'une part par la colonne, et d'autre part, et en moindre mesure, par le sol lui-même (Figure I.1). En effet, plus un élément est rigide, plus il reprend une contrainte importante. La colonne ballastée est plus rigide que le sol.



**Figure I.1: Différence de report de charge entre les différents Types de travaux spéciaux**

- $\sigma_{\text{sem}}$  : Contrainte appliquée par la semelle de fondation au sol
- $\sigma_p$  : Contrainte appliquée par la semelle en tête de pieu
- $q_{\text{col}}$  et  $q_{\text{sol}}$  : Contraintes appliquées par la semelle en tête de colonne et au sol

### I.2.2. Fondations superficielles

Dans le dimensionnement on considère trois types de semelles :

- Les semelles de grandes dimensions appelées radiers
- Les semelles filantes
- Les semelles isolées

Ces trois types de semelles peuvent être supportés par des inclusions souples ou rigides. Il est cependant souvent nécessaire de mettre en place un matelas de répartition entre les inclusions et le dallage.

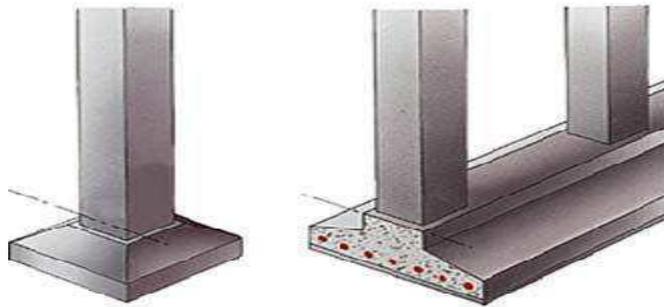


Figure I.2: Semelle isolée et semelle filante

## I.3. Colonnes ballastées

### I.3.1. Présentation

La colonne ballastée fait partie de la famille du renforcement de sol, sa mise en place dans le sol conduit à une augmentation globale des caractéristiques mécaniques du sol en place.

Les quatre principaux avantages d'une colonne ballastée sont :

- La réduction des tassements.
- L'augmentation de la capacité portante.
- L'accélération de la consolidation primaire du sol grâce à sa capacité drainante.
- La stabilité générale et la résistance en zone sismique.

La colonne ballastée non injectée de béton est constituée de matériaux granulaires, sans cohésion, compactés dans le sol encaissant. Le matériau d'apport constituant est souvent une grave avec une granulométrie la plus homogène possible et bien définie, dont les plus gros éléments ont une taille supérieure à 40 mm et le Passant à 80 $\mu$ m < 5%.



**Figure I.3: Tête de colonne ballastée**

### **I.3.2. Domaines d'application**

#### **I.3.2. 1. Ouvrages**

Les domaines d'application des colonnes ballastées sont variés et ont évolué au cours des années en fonction des évolutions technologiques inhérentes à ces méthodes ainsi que des améliorations souhaitées. La liste suivante, bien qu'exhaustive, rend compte de la variabilité des applications :

- remblais routiers, ferroviaires.
- bâtiments tels que des habitations individuelles ou collectives de quelques étages, des bâtiments industriels comme des bureaux hangars.
- zones de production, silos, réservoirs, stations de traitement des eaux usées (bacs de décantation, installations annexes).
- pistes d'aéroport.
- stabilisation des talus.

Toutes ces applications peuvent se résumer en deux grandes catégories en fonction du Mode de chargement par :

- fondations souples.
- fondations rigides.

### I.3.2.2. Charge appliquées et tolérances imposées

Le Tableau I.1 donne les plages de variation des charges apportées aux fondations de projets fondés sur sols améliorés par colonnes ballastées et les tolérances des tassements absolus et différentiels imposées. Il s'agit de données recoupées avec les informations recueillies auprès des entreprises spécialisées ou issues de la littérature (Dhouib et Blondeau2005).

**Tableau I.1: Limites d'application des colonnes ballastées : charges appliquées et tolérances imposées**

Type d'ouvrage	Hauteur/épaisseur (m)	Contrainte appliquée (kPa)
Remblais	2-12*	40-250*
Dallages	0.12-0.20	10-50
Radiers	0.30-0.60	50-80
Semelles isolées	-	150-1500 kN
Semelles filantes	-	100-300 kN/m

### I.3.2.3. Sols concernés

Les colonnes ballastées ne doivent pas être utilisées dans les 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%.

Le Tableau I.2 détaille les sols concernés par l'amélioration des sols par colonnes ballastées et les résistances latérales (ou étreintes latérales) que peut offrir le sol pour la stabilité de la colonne.

**Tableau I.2: Champ d'application des colonnes ballastées : nature et résistance des sols (étrointe latérale) [DHOUIB - colonnes ballastées]**

Sols	Faisabilité	Etreinte latérale (1)				Remarques
		P <sub>1</sub> (kPa)	q <sub>c</sub> (MPa)	N <sub>SPT</sub> (coups)	C <sub>u</sub> (kPa) (2)	
<b>Argile</b>	Oui	150-400	0.6-1.2	4-6	25-50	-
<b>Limon</b>	Oui	150-400	0.6-1.2	4-6	25-50	-
<b>Sable fin lâche</b>	Oui	150-400	0.6-1.2	4-6	-	-
<b>Tourbe</b>	Non	-	-	-	-	Matériau évolutif
<b>Autres sols organiques</b>	Non (3)	-	-	-	-	-
<b>Remblai inerte</b>	Oui (4)	200-500	0.6-1.6	-	-	Matériau évolutif
<b>Décharge</b>	Non	-	-	-	-	Matériau évolutif

En principe, les colonnes ballastées peuvent être mises en place dans tous types de sols. En pratique, elles sont habituellement utilisées pour le traitement des sols de qualité médiocre à très faible : les sables limoneux, les limons argileux, les argiles, les remblais Hétérogènes....

L'application de la colonne ballastée est tout de même limitée par des sols évoluant dans le temps (tourbe, déchets organiques par exemple). La colonne étant constituée d'un matériau sans liant, elle s'évaserait en fonction de la dégradation du sol : son comportement est lié à l'étreinte latérale du sol. Si elle est trop faible, la colonne n'est pas suffisamment tenue latéralement.

Pour les matériaux pulvérulents comportant peu de fines (passant à 80µm inférieur à 15%), l'amélioration du sol est effectuée par vibrations et sans apport de matériaux. C'est la technique du vibro-compactage.

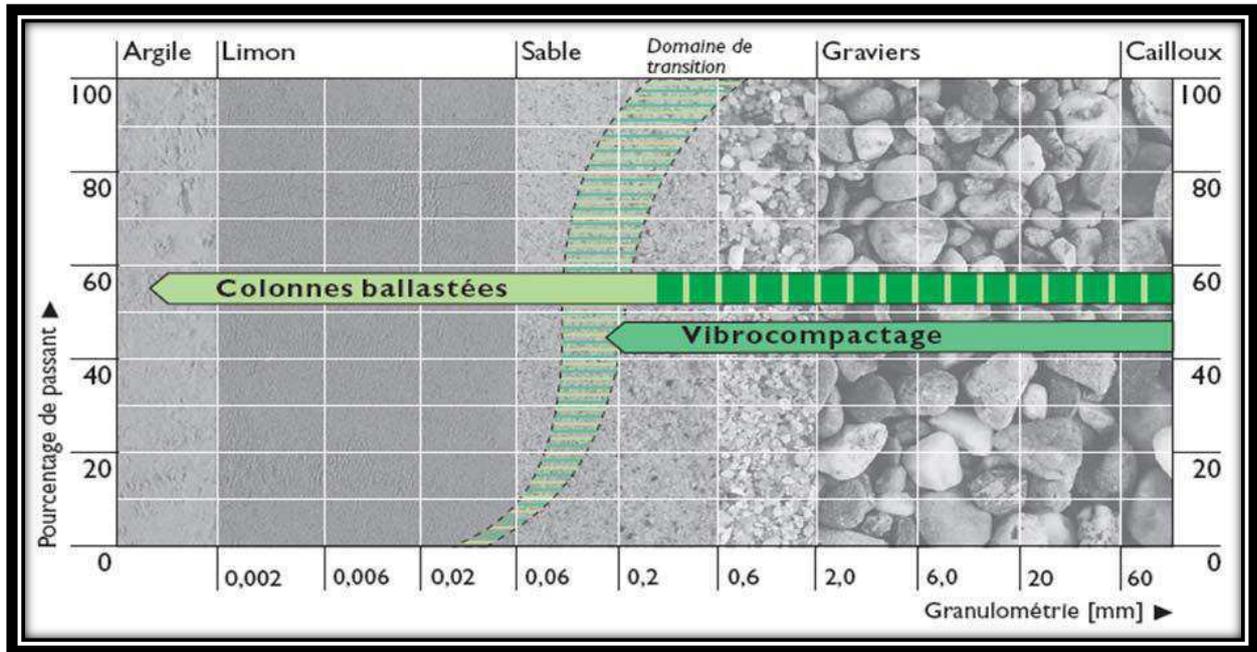


Figure I.4: Domaines d'application des techniques de renforcement et d'amélioration de sol en fonction de la granulométrie du sol [DHOUB - colonnes ballastées]

### I.3.3. Caractéristiques des colonnes ballastées

#### I.3.3.1. Longueur

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

D'après les entreprises spécialisées, les 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 20m, sans excéder 20 à 25 m.

#### I.3.3.2. 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.

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 80 cm et par voie humide variés entre 80 et 120 cm.

### I.3.3.3. Maillage

L'espacement des points de compactage détermine les propriétés du sol à la profondeur traitée. Le procéder 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.

### I.3.4. Choix des matériaux

#### I.3.4.1 .Matériaux constitutifs des colonnes

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

Les caractéristiques minimales des matériaux d'apport sont données dans le Tableau I.3:

**Tableau I.3: Caractéristiques minimales des matériaux**

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

\* Valeurs limites.

\*\* Le critère de propreté au sens de la norme NFP 18591 représente le passant inférieur à 5%.

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 à tube latéral de remplissage par le bas ; en terme de fuseau granulométrique, le plus couramment utilisé est le fuseau 8/40mm.
- Autres procédés : en terme de fuseau granulométrique celui qui est le plus couramment utilisé est le fuseau 20/75mm.

#### I.3.4.2. 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 reprofilage 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 fondation ( 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).

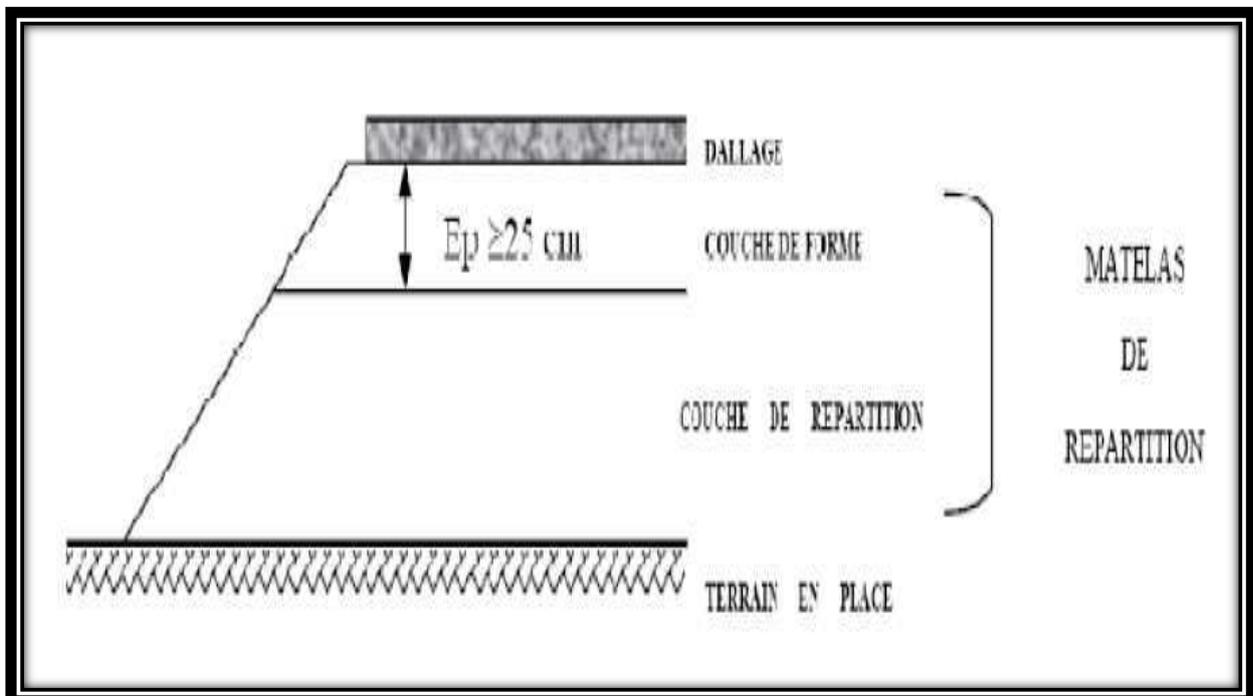


Figure I.5. Matelas de répartition (Document COPREC 2004)

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 général aucun matelas contrairement aux dallages, armés ou non.

### I.3.5. Mise en œuvre

La mise en place des colonnes ballastées peut être réalisée selon deux méthodes différentes :

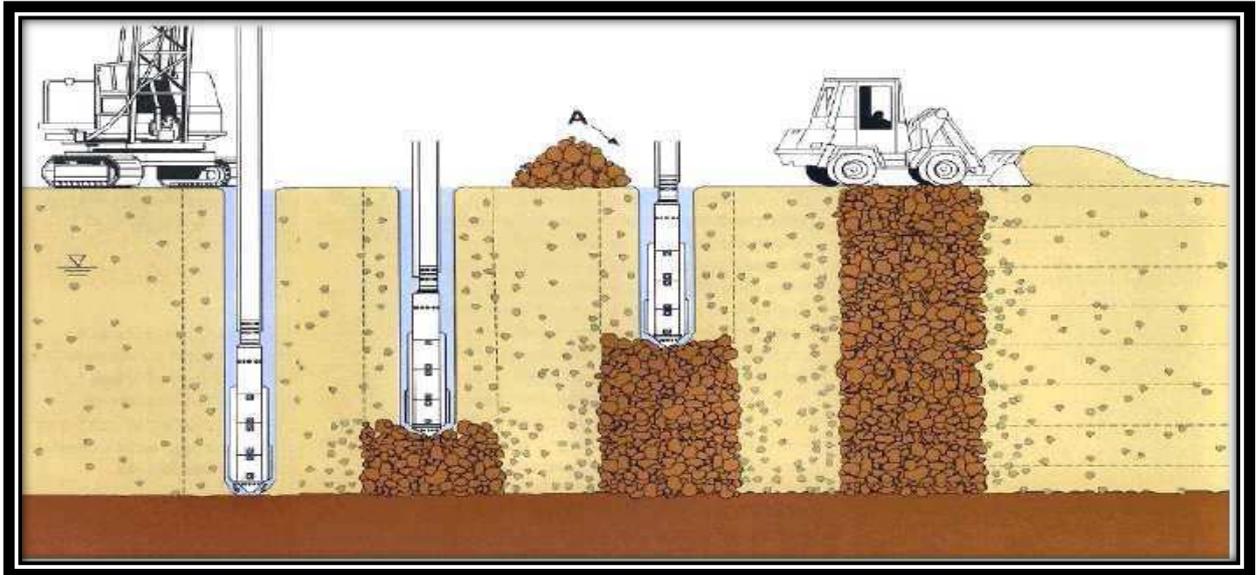
- la mise en place par voie humide.
- la mise en place par voie sèche.

La première méthode consiste à injecter de l'eau sous pression afin de favoriser le fonçage de l'outil de mise en place des colonnes ,cela a le désavantage de ramener une grande quantité d'eau rendant la plateforme de travail boueuse, Les manœuvres des machines deviennent alors difficiles.

La seconde méthode remplace l'injection d'eau par une injection d'air, Le sol est refoulé pendant le fonçage à l'aide d'un tube vibreur, on appelle donc cette technique« vibro-refoulement », cette méthode présente l'avantage de ne pas utiliser d'eau et de ne pas avoir à évacuer de terres extraites.

#### I.3.4. 1. Mise en place par voie humide

Le mode d'exécution des colonnes ballastées par voie humide est presque le même que par voie sèche sauf qu'on utilise l'eau comme fluide de lancement est que le ballast n'est pas introduit à l'intérieur du vibreur mais dans le vide annulaire entre le vibreur et le trou formé ce qui permet d'utiliser des agrégats de diamètres plus grands.



**Figure I.6: Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide**

Le procédé suit les étapes d'exécution de la Figure I.6 :

1. Mise en station de la grue : le vibreur est amené à la verticale du point central de la Colonne à implanter.
2. Démarrage du moteur, le vibreur est descendu lentement.
3. 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 (de l'ordre de quelques centimètres à la périphérie du vibreur) (Figure I.7.(2)). Le vibreur avec le tube de rallonge descend dans le sol sous l'effet de son propre poids ; la vitesse de descente est variable d'un sol à un autre. Elle est relativement rapide dans les sols sableux et limoneux par rapport aux terrains argileux ou vasards.
4. Lorsque la profondeur de traitement requise est atteinte (identifiée par l'enregistreur en temps réel sous forme d'augmentation instantanée de la consommation du courant du vibreur), on remonte progressivement le vibreur pour bien nettoyer l'espace annulaire autour du vibreur.
5. Les matériaux d'apport sont alors introduits dans le trou à l'aide d'un chargeur ou 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.

6. En remontant et descendant le vibreur de façon contrôlée par passes successives (passes de l'ordre de 50 cm) jusqu'au niveau de la plate-forme, le ballast est expansé et compacté dans le sol en place pour former la colonne ballastée, L'augmentation instantanée de la consommation du courant du vibreur jusqu'à une valeur critique traduit le serrage du terrain et permet de vérifier que le compactage optimal a été atteint.

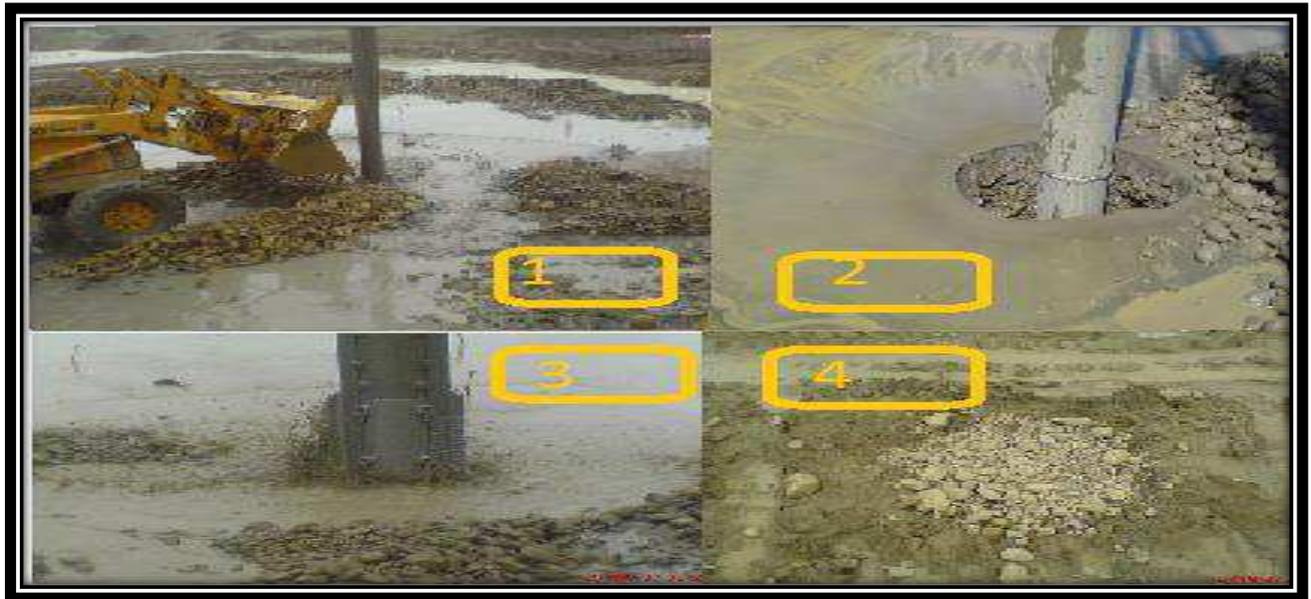


Figure I.7: Remplissage(1) Phénomène de liquéfaction(2) Finition d'une colonne (3et4)

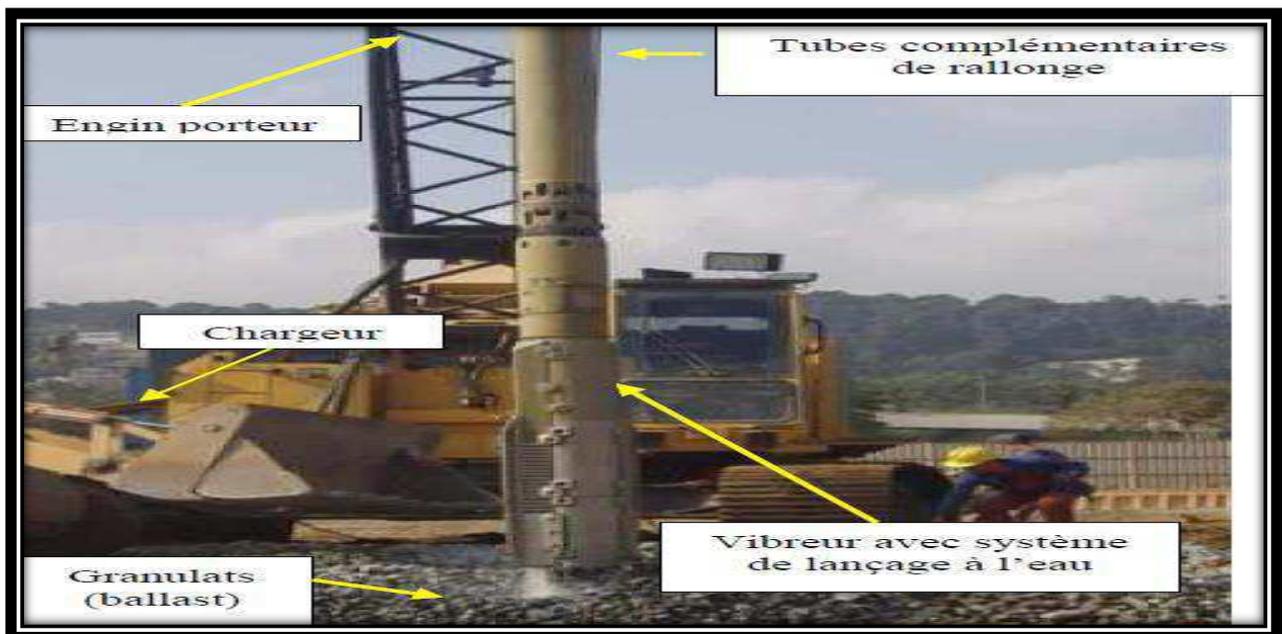


Figure I.8 : Exemple de vibreur Keller (*voie humide*)

### I.3.4. 2. Mise en place par voie sèche.

La mise en œuvre d'une colonne ballastée par voie sèche, se déroule en 4 étapes :

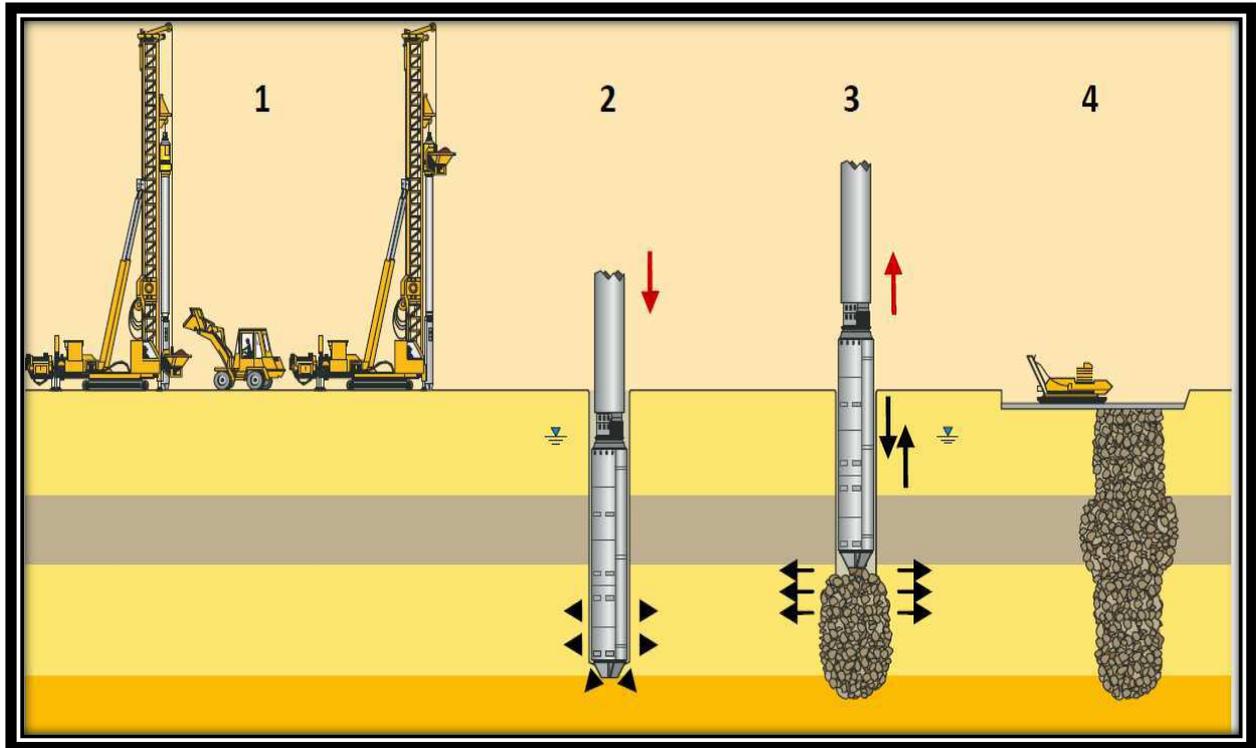


Figure I.9: Etapes de mise en œuvre d'une colonne ballastée par voie sèche

#### 1. Préparation et remplissage :

- La machine est mise en station au-dessus du point d'implantation et stabilisée sur ses vérins. La chargeuse remplit la trémie en gravés.
- La machine possède un vibreur à sas le long du tube d'amenée des matériaux, générant des vibrations horizontales permettant un bon refoulement du sol. Le tube est guidé le long d'un mât garantissant une parfaite verticalité. Il applique une force d'appui de 200kN à 250kN.
- La trémie est montée en haut du mât pour déverser les gravés à l'intérieur du tube.

#### 2. Fonçage :

- Le vibreur est descendu jusqu'à la profondeur souhaitée en refoulant le sol sous l'effet des vibrations et du lançage à l'air.

### 3. Compactage :

- Lorsque la profondeur finale est atteinte, le vibreur est remonté par passe de 50 cm environ, en laissant descendre par gravité le ballast.
- En même temps le vibreur effectue un mouvement de va-et-vient vertical afin de constituer une colonne compactée et expansée latéralement. L'expansion dépend ainsi de la force appliquée par le vibreur lors des passes, ainsi que de la qualité de la couche traversée.

### 4. Finition :

- Une fois la colonne ballastée terminée, on effectue un compactage en surface puis un nivellement avec la chargeuse, afin de laisser la plateforme propre au gros-œuvre.
- Les massifs de fondations sont généralement directement posés sur les colonnes et le sol. La mise en place d'un matelas de répartition est nécessaire pour faire un dallage sur terre-plein.

Les colonnes ballastées peuvent être facilement recépées, si besoin, par le gros-œuvre afin de mettre en place les fondations superficielles, car elles ne possèdent pas de cohésion, contrairement aux colonnes en béton.

On considère, de manière générale, une cadence de 160 mètres linéaires de colonnes ballastées réalisées par jour.

#### I.3.6. Mécanisme de rupture de la colonne ballastée

Les mécanismes de rupture d'une colonne ballastée isolée dans un massif de sol mou homogène sous la charge axiale limite  $\sigma_{c \text{ lim}}$  correspondent, d'après Datye (1982), aux trois configurations schématiques de la Figure I.10:

- Rupture par expansion latérale de la colonne.
- Rupture par cisaillement généralisé.
- Rupture par poinçonnement (colonne filante).

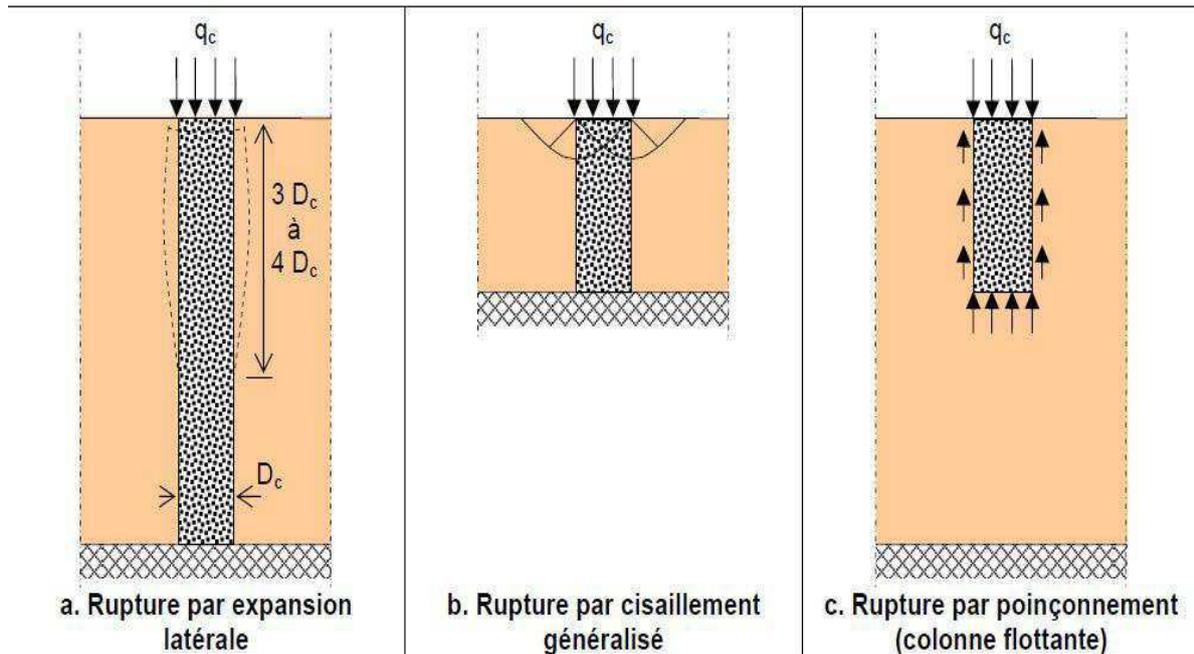


Figure I.10: Type de rupture d'une colonne isolée chargée en tête

#### I.4. Conclusion

La compréhension du comportement des colonnes ballastées de leurs construction jusqu'au 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.

# Chapitre II

## Présentation du projet

## II.1.Introduction

La technique des colonnes ballastées est un moyen courant de renforcement de sol. Elle peut être mise en œuvre pour tout type d'ouvrages comme des bâtiments, des ouvrages logistiques, des infrastructures, des remblais, la stabilisation des talus, des réservoirs, etc.

## II.2.Présentation du projet

Le projet concerne la construction de 220 logements sur la commune d'ANNABA (Algérie).

La solution retenue est un renforcement de sol par colonnes ballastées sèches sous les radiers des différents ouvrages.

Cette solution a l'avantage, en plus de réduire les tassements, d'accélérer la consolidation du terrain grâce à la propriété drainante du matériau utilisé.

Mon calcul a pour objet de valider le dimensionnement du réseau de colonnes sous l'ouvrage en fonction des hypothèses géotechniques retenues et des contraintes liées au projet, à savoir :

- Vérifier la capacité portante du radier.
- Évaluer les tassements absolus et à long terme après la construction de l'ouvrage.

Les colonnes ballastées seront mises en œuvre par voie sèche, selon le procédé Keller plan de masse de la Figure II.1 présente la situation du projet :



Figure II.1: Plan de masse et situation du projet

### II.3. Caractéristiques de l'ouvrages

Les caractéristiques principales du projet sont récapitulées ci-dessous :

➤ **Dispositions générales:**

- Type de bâtiment : Logements (R+4) avec sous-sol.
- Niveau de l'ouvrage : +9,70 NGA et 10.20 NGA selon les ouvrages.
- Niveau moyen du Terrain Naturelle (TN): +7.18 et +8.93 NGA ;
- Niveau dessous radier sous-sol :- 2,9m / 0,00 (avec béton de propreté).
- Niveau plate-forme de travail : supposé proche TN, à confirmer.

La coupe transversale est présentée sur la Figure II.2 :

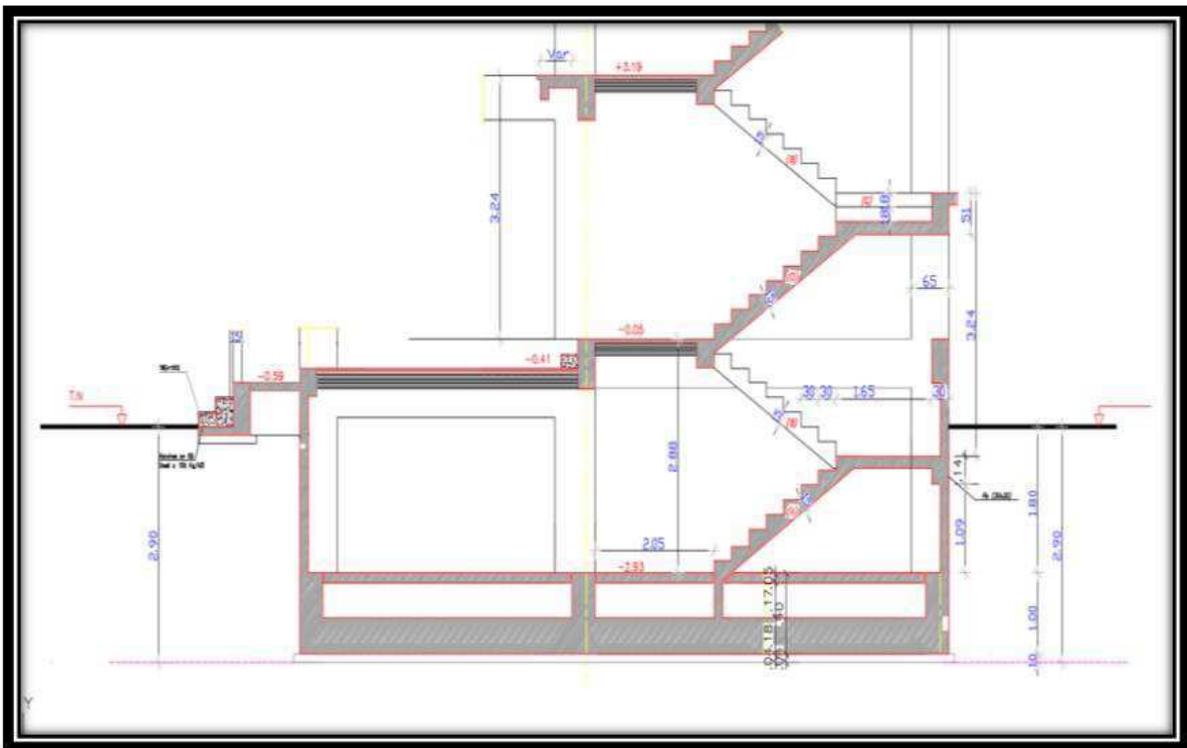


Figure II.2: Coupe transversale du bâtiment

Le niveau 0,00 des différents ouvrages est rappelé ci-après d'après le plan d'implantation général transmis :

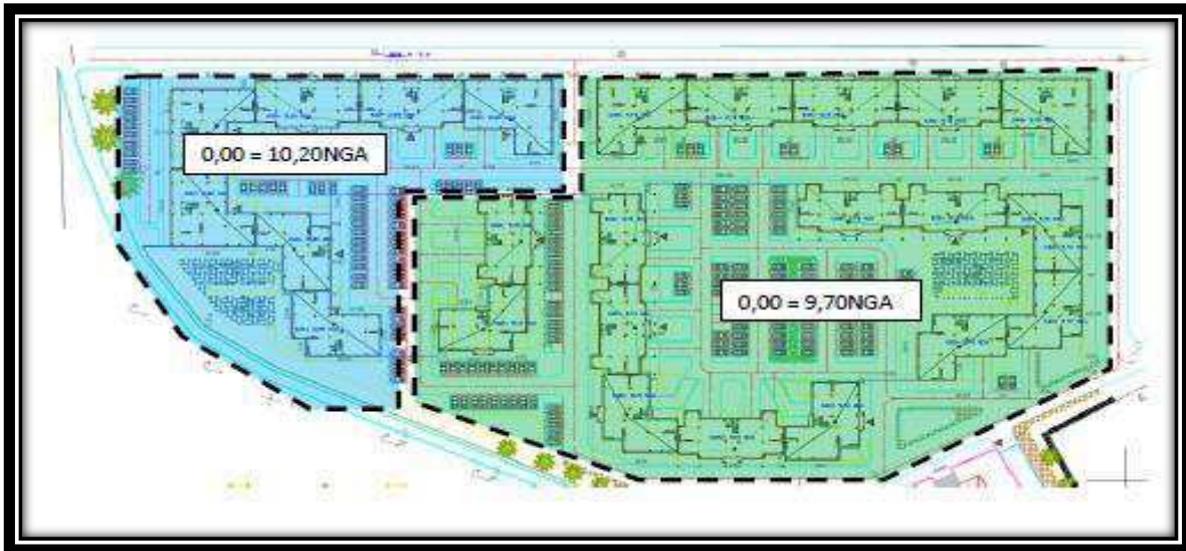


Figure II.3: Niveau 0,00 des différents ouvrages

#### II.4.Contexte sismique

Les Règles Parasismiques Algériennes RPA classent Annaba en zone IIa (sismicité moyenne) comme le montre la Figure II.4: :

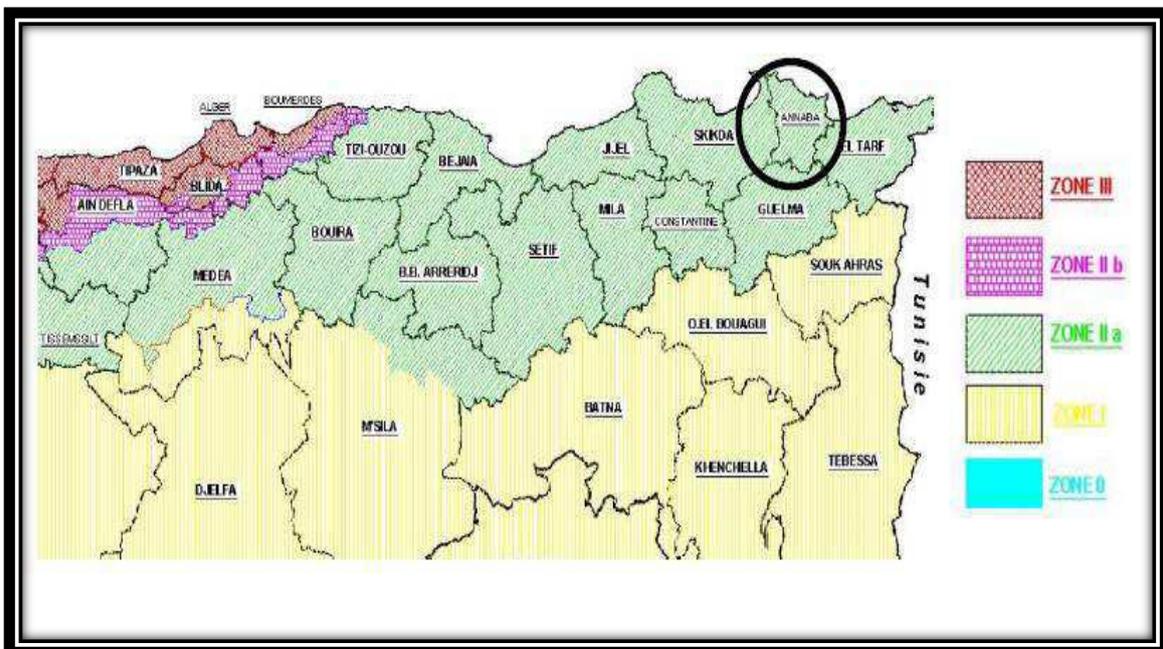


Figure II.4: Carte de zonage sismique de l'Algérie (RPA).

Tableau II.1:coefficient d'accélération de zone A

Groupe	ZONE			
	I	Ila	Ilb	III
1 A	0,15	0,25	0,30	0,40
1 B	0,12	0,20	0,25	0,30
2	0,10	0,15	0,20	0,25
3	0,07	0,10	0,14	0,18

Le coefficient d'accélération de zone A s'élève à 0.2 m/s<sup>2</sup>

### II.5.Conclusion

Les caractéristiques principales de notre ouvrage sont données dans le chapitre II, on procèdera au ensuite au chapitre suivant reconnaissance du site

# Chapitre III

## Reconnaissance du site

### III.1.Introduction

On traite dans ce chapitre l'étude géotechnique à fin d'identifier le sol de fondation de l'ouvrage et les paramètres géotechniques essentiels utilisés dans notre projet

### III.2. Contexte géotechnique au droit du projet

#### III.2.1. Synthèse de la campagne de reconnaissance

Au droit du projet, la campagne de reconnaissance menée par le bureau d'études L.T.P.Est se compose de :

- 8 sondages de reconnaissance géologique notés S1 à S8 descendus à une profondeur variant de 10,00 m à 20,00 m avec réalisation de mesures au S.P.T.( essai de pénétration standard) à raison de 3 à 8 mesures S.P.T. par sondage.
- 10 sondages au CPT (pénétromètre statique) notés P1 à P10 descendus à une profondeur variant de 12,0m à 29,0m.

Ces sondages mettent en évidence successivement :

- ❖ Des remblais hétérogènes dont la nature n'a pas été précisée par le L.T.P.Est jusqu'à 2,5 à 3,5m/TN.
- ❖ Des argiles plastiques organiques molles à très molles entrecoupées par des passages sableux jusqu'à 3.5 à 18,0m/TN.
- ❖ Des argiles à argiles limoneuses fermes à raides parfois sableuses à graveleuses jusqu'à 19,0 à 23,0m/TN.
- ❖ Des gneiss altérés jusqu'à 22,0 à 29,0m/TN.
- ❖ Des gneiss fracturés (rocher) au-delà.
- ❖ Contexte hydrogéologique : au cours de la campagne de reconnaissance, le bureau d'étude de sol a relevé la présence d'eau à -6,50m / TN.

**Remarque**

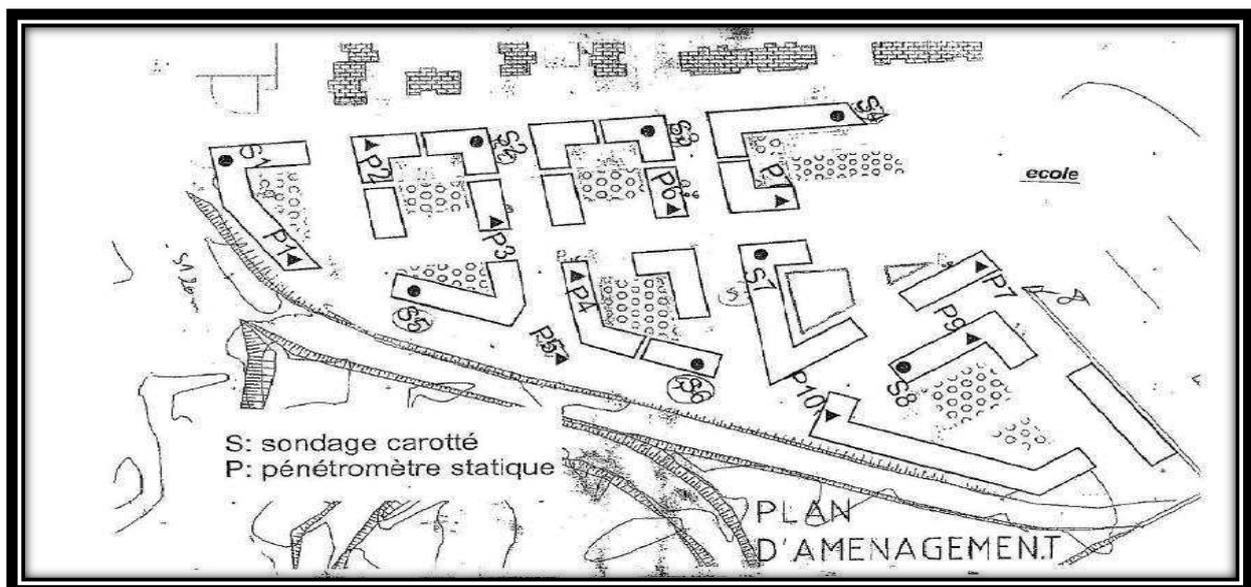
Les gneiss fracturés ont été rencontrés à 12m au niveau des sondages S1 et P1. Ces derniers n'ont pas été rencontrés dans les sondages au pénétromètre statique P7 à P10 descendus entre 25 et 29m/TN.

Les profondeurs sont indiquées par rapport à la plateforme d'intervention des sondages.

Le plan d'implantation des sondages et les sondages de référence sont donnés en Figure III.1. Le site a fait l'objet d'une campagne de sondages complémentaires menés par KELLER afin d'apprécier les variations du toit de la formation 3 (Argile à argile limoneuse parfois sableuse à graveleuse dans Tableau II.1). La campagne se compose de 16 sondages au pénétromètre statique descendus entre 13,0 et 25m / TN.

Les sondages ont été implantés au droit des futures colonnes ballastées. Le numéro du sondage correspond au numéro de la colonne ballastée au droit de laquelle il a été réalisé. Le plan d'implantation des sondages et les sondages sont donnés en Figure III.2.

Les sondages complémentaires au pénétromètre statique ont permis de mieux délimiter le zonage du toit de la formation 3. Le schéma suivant présente les profondeurs rencontrées au droit de chacun des sondages. Il présente également la délimitation approximative de la zone où le toit de la formation 3 se situe à 15,0m/TN (Figure III.3).



**Figure III.1: Sondages menés par le bureau d'études L.T.P.Est**



### III.3. Caractéristiques retenues

Les caractéristiques géomécaniques retenues selon les sondages du bureau d'étude de sol L.T.P Est issus de son étude de sol, et les synthèses géotechniques sont les suivantes :

- Sondages P1 à P6 en retenant le cas du sondage P3 le plus défavorable

Tableau III.1: Caractéristiques géomécaniques du sondage P3

Profondeur	Faciès	Formation	qc	$\alpha c$	Eoed
[m]	[-]		[MPa]	[-]	[MPa]
TN à 3,00	Remblai	1	2,0	3	6,0
3,00 à 18,00	Argile plastique molle à très molle	2	0,5	5	2,5
18,00 à 25,50	Argile à argile limoneuse parfois sableuse à graveleuse	3	5,0	4	20,0
25,50 à 27,00	Gneiss altéré	4	10,0	2,5	25,0
< 27,00	Gneiss fracturé	5	> 20	-	Supposé incompressible

- Sondages, P7 à P10 en retenant le cas du sondage P10 le plus défavorable

Tableau III.2: Caractéristiques géomécaniques du sondage P10

Profondeur	Faciès	Formation	qc	$\alpha c$	Eoed
[m]	[-]		[MPa]	[-]	[MPa]
TN à 3,00	Remblai	1	3,0	3	9,0
3,00 à 10,00	Argile plastique molle à très molle	2	0,5	5	2,5
10,00 à 24,50	Argile à argile limoneuse parfois sableuse à graveleuse	3	3,5	4	14,0
24,00 à 27,00	Gneiss altéré	4	10,0	2,5	25,0
< 27,00	Gneiss fracturé	5	> 20	-	Supposé incompressible

### III.4. Conclusion

Les colonnes ballastées sont utilisées pour améliorer les sols très faibles à médiocres (sables limoneux, limons, limons argileux, argiles, remblais hétérogènes, etc...) et noter seule est bien réponde au critère (argile).

Chapitre IV                      Descente  
des charges et méthode de  
renforcement choisit

**VI.1.Introduction**

La descente de charges a pour but de déterminer les sollicitations maximales transmises par le radier vers le sol.

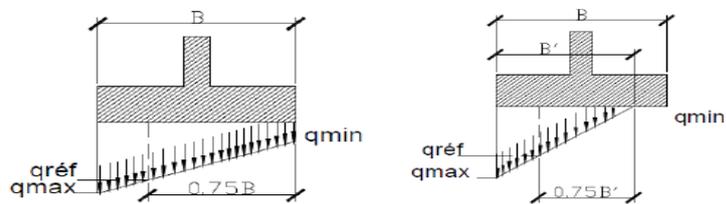
**IV.2.Descentes des charges**

Les charges sous les bâtiments d’angles et les barres sont issues du document complémentaire donné par le bureau d’étude ARABESQUE et sont rappelées dans le tableau suivant :

**Tableau IV.1: Charges sous les bâtiments**

Type Ouvrage	ELS : G + Q	ELU : G + Q	ELUA : G + Q	Surface Radier	Contrainte moyenne totale ELS/ELU/ELUA
	[kN]	[kN]	[kN]	[m <sup>2</sup> ]	[kPa]
Bâtiment Barre	25031 (M <sub>x</sub> = M <sub>y</sub> = 0kN.m)	34292 (M <sub>x</sub> = M <sub>y</sub> = 0kN.m)	25031 (M <sub>x</sub> = M <sub>y</sub> = 16714kN.m)	312,7	80,1/109,7/97,3
Bâtiment Angle	27207 (M <sub>x</sub> = M <sub>y</sub> = 0kN.m)	37274 (M <sub>x</sub> = M <sub>y</sub> = 0kN.m)	27207 (M <sub>x</sub> = M <sub>y</sub> = 13909kN.m)	300,5	90,6/124,1/104

La contrainte en ELUA sera déterminée en dessous du radier de la manière suivante afin d’intègrent les efforts verticaux et les moments (contraintes aux trois quarts). Le détail de ces calculs est donné dans la Figure IV.1.



Avec :

$$q'_{ref} = \frac{(3q_{max} + q_{min})}{4}$$

**Figure IV.1 : Détail de calculs La contrainte en ELUA**

**NB:** Puisque les contraintes à l'ELU fondamental sont plus importantes qu'à l'ELU Sismique nous limiterons l'étude au cas le plus défavorable de l'ELU Fondamental

### IV.3.méthode de renforcement choisit

#### IV.3. 1.Traitement par colonnes ballastées

Les colonnes ballastées sont des inclusions souples constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes successives, Le traitement d'un sol par colonnes ballastées conjugue les actions suivantes :

- Augmentation de la capacité portante du sol.
- Réduction des tassements.
- Homogénéisation des caractéristiques géotechniques.
- Augmentation de la vitesse de consolidation par la création d'éléments drainant.
- Augmentation des caractéristiques équivalentes du massif de sol traité.

#### IV.3.2. Objectifs du traitement et Justification de choix

##### IV.3.2.1. Objectifs du traitement

Les travaux de renforcement de sol auront pour buts :

- ✚ Portance du sol renforcé : 0,15 MPa à l'ELS.
- ✚ Tassements absolus prévisibles :  $\leq 10,0$  cm.
- ✚ Tassements différentiels unitaires :  $\leq 1/500$ .

##### IV.3.2.2. Justification De Choix

- ✚ Noter projet est un bâtiment collectifs de R+4 étages avec sous-sol qui est un ouvrage rependant au renforcement du sol par colonnes ballastées.
- ✚ D'après l'étude géotechnique on a constaté que notre sol est un sol de type argile molle qui est un sol rependant au renforcement du sol par colonnes ballastées et vu que la résistance au pointe trouvée est 0.5 MPa enter 0.4et 2.5MPa et les sollicitations (Contrainte résiduelle) égal à 64.9KPa<80KPa (voir figure Figure IV.2.).

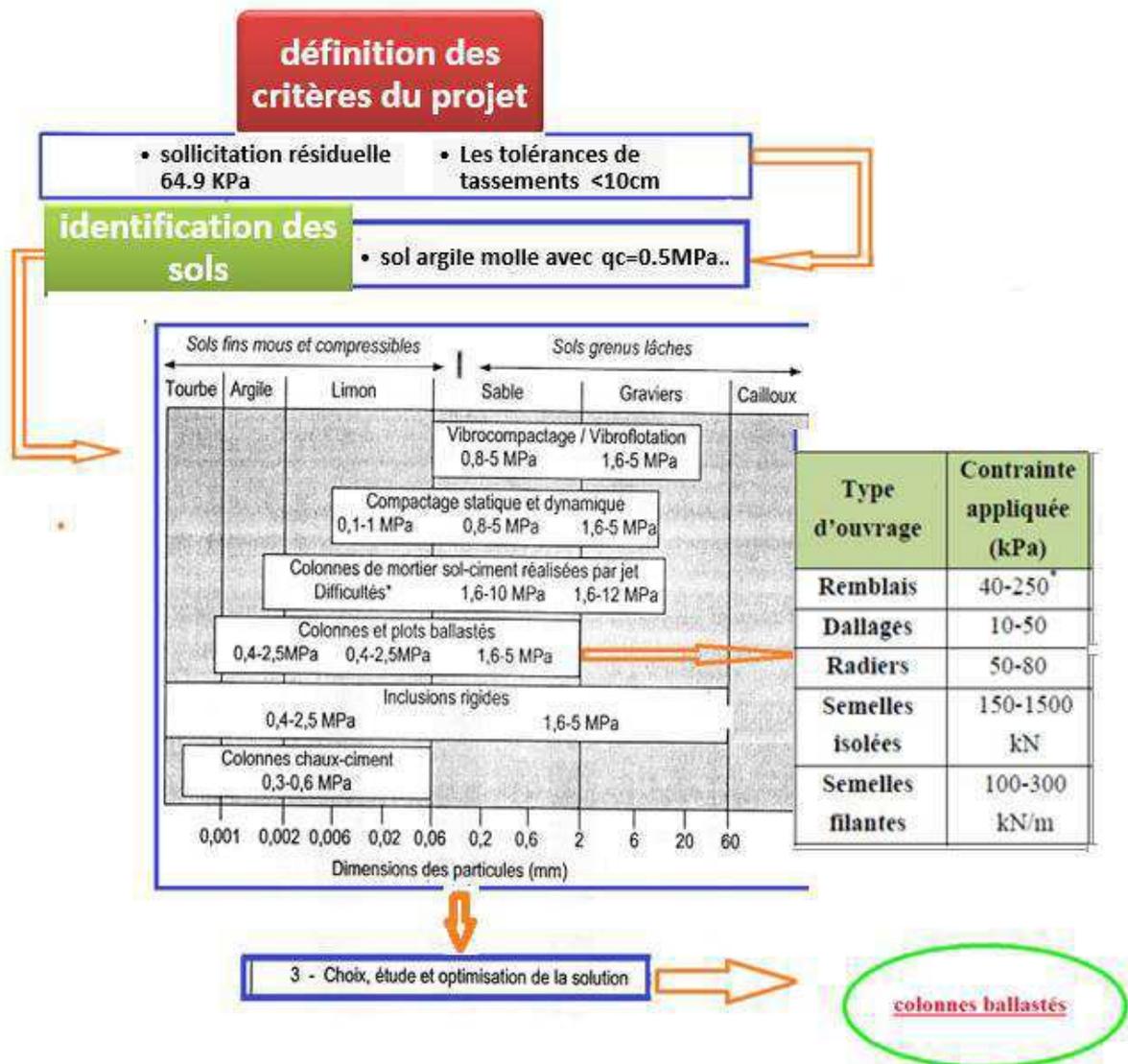


Figure IV.2 : Schéma général de l'application des techniques d'amélioration des sols-et domaine de validité

#### IV.4. Caractéristiques des matériaux constitutifs

Les colonnes ballastées sont constituées de gravier conforme aux recommandations du CFMS et sont caractérisées par :

- Un module de Young  $E_y = 60 \text{ MPa}$ .
- Un angle de frottement  $\varphi'c = 40^\circ$  (concassé).
- Un coefficient de Poisson  $\nu = 0.33$ .

### IV.5. Caractéristiques du traitement

➤ **Longueur**

Les colonnes ballastées seront descendues jusqu'au refus du vibreur au toit de la formation 3.

La variabilité des niveaux des toits et des compacités des différentes couches rencontrés à la vue des sondages, nous amène à proposer un tableau reprenant les profondeurs de colonnes attendues au niveau de chaque sondage.

**Tableau IV.2: Profondeurs des colonnes attendues au niveau de chaque sondage.**

Sondage	[-]	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
<b>Prof. / TN</b>	<b>[m]</b>	10,0	17,5	18,0	15,0	17,0	16,0	11,0	8,0	8,0	9,5

Le tableau suivant récapitule les différentes profondeurs des colonnes pour les sondages complémentaires de Keller :

**Tableau IV.3: Profondeurs des colonnes pour les sondages complémentaires de Keller**

Numéro Sondage	Colonne Associée	Prof refus CBS(m)
1	1431	18.0
2	1535	13.0
3	1374	17.0
4	1912	16.5
5	2854	9.5
6	1927	11.0
7	2760	8.5
8	2284	7.5
9	3288	11.5
10	3272	13.0
11	3333	13.5
12	956	18.0
13	215	18.0
14	1112	18.0
15	3398	18.0
16	911	13.0

### ➤ Diamètre

Nous rappelons que notre mode d'exécution de colonnes ballastées par poussée statique sur l'outil vibrant, avec des passes de compactage de l'ordre de 0,5 m de hauteur, permet d'élargir au maximum le diamètre des colonnes et de mobiliser ainsi pleinement la butée du terrain.

L'expansion d'une colonne va être liée à la résistance des sols traversés : plus la résistance en pointe sera faible, plus la colonne s'expandra.

Les diamètres des colonnes peuvent ainsi varier de :

- 0,50 m à 0,70 m dans les horizons peu compressibles.
- 0,70 m à 0,90 m dans les horizons compressibles.

Par ce mode d'exécution (diamètre des colonnes en fonction de l'étreinte latérale du sol encaissant), nous pouvons garantir une homogénéité de la portance des colonnes quelles que soient la qualité et la résistance mécanique des sols.

Pour les calculs nous retiendrons les diamètres suivants :

**Tableau IV.4: Diamètres des colonnes ballastés**

	<b>Formation</b>	<b>qc</b>	<b>Diamètre CBS</b>
<b>[-]</b>	<b>[-]</b>	<b>[MPa]</b>	<b>[m]</b>
<b>Remblai</b>	<b>1</b>	<b>2,0</b>	<b>0,60</b>
<b>Argile plastique molle à très molle</b>	<b>2</b>	<b>0,5</b>	<b>0,90</b>
<b>Argile à argile limoneuse parfois sableuse à graveleuse</b>	<b>3</b>	<b>5,0</b>	-
<b>Gneiss altéré</b>	<b>4</b>	<b>10,0</b>	-
<b>Gneiss fracturé</b>	<b>5</b>	<b>&gt; 20</b>	-

### ➤ Maillage

Sous les radiers, un maillage de 1,7 x 1,7 m est prévu.

## IV.6.Conclusion

Les principaux caractéristiques des matériaux constitutifs et caractéristiques du traitement (Longueur ; Diamètre ; Maillage) sont donnée dans ce chapitre .on procédera au calcul du renforcement.

# Chapitre V

## Calcul du renforcement

### V.1.introduction

Après avoir défini dans les chapitres précédents les caractéristiques physiques et mécaniques des principales couches du sol, on va procéder dans ce qui suit au dimensionnement des colonnes ballastées et vérifier la capacité portante et les tassements.

### V.2.Contrainte admissible au sol

Conformément à la norme **PR NF P 94-261**, la charge ultime du sol est calculée par la méthode pénétrométrique sous la fondation par la formule suivante :

$$R_{v;d} = A'_{sol} \left( \frac{K_C q_{ce}}{\gamma_{R;d} \gamma_{R;v}} \right)$$

Avec :

- $k_c$  : facteur de portance pénétrométrique.
- $q_{ce}$  : résistance de pointe équivalente.
- $\gamma_{R;d}$  : coefficient de modèle lié au type de données utilisées et à la méthode de calcul employée (= 1,2 pour la méthode pressiométrique ou pénétrométrique).
- $\gamma_{R;v}$  : facteur partiel permettant le calcul de la portance à l'ELU (=1,4), à l'ELS (= 2,3) ou en situation accidentelle (= 1,2).
- $A'_{sol}$  : valeur de la surface effective de la fondation.

#### ➤ A l'ELS :

Méthode pénétrométrique

$$R_{v;d} = A'_{sol} \left( \frac{K_C q_{ce}}{2.76} \right)$$

#### ➤ A l'ELU :

Méthode pénétrométrique

$$R_{v;d} = A'_{sol} \left( \frac{K_C q_{ce}}{1.68} \right)$$

➤ On définit ensuite les 2 domaines suivants

- ❖ **Domaine 1** : Les colonnes ballastées ont pour objectif de **garantir la portance des sols** et de **réduire les tassements**.

$$V_d - R_0 > R_{v;d}$$

- ❖ **Domaine 2** : Les colonnes ballastées n'ont pour objectif que de **réduire les tassements**.

$$V_d - R_0 < R_{v;d}$$

Avec :

- $V_d$ : la valeur de calcul de la composante verticale de la charge transmise par la fondation superficielle au terrain.
- $R_0$ : la valeur du poids du volume de sol constitué du volume de la fondation sous le terrain après travaux et des sols compris entre la fondation et le terrain après travaux.

Le Tableau V.1 récapitule les calculs:

**Tableau V.1: Calculs de  $V_d$  ;  $R_0$ ;  $V_{résiduelle}$**

Type Ouvrage	$V_d$ (Contrainte moyenne ELS)	$R_0$ (Contrainte de sol décaissée)	$V_{résiduelle} (V_d - R_0)$ (Contrainte résiduelle)
	[kPa]	[kPa]	[kPa]
Bâtiment Angle	91	$9\text{kN/m}^3 \times 2.9\text{m} = 26.1$	$91 - 26,1 = 64.9$

Le Tableau V.2 récapitule les calculs de portance du sol :

**Tableau V.2: Vérification de portance du sol non renforcé sous 91 kPa à l'ELS**

Nom	$k_c$	$q_{ce}$	$R_{v;d}$	$V_d$	$R_0$	$V_d - R_0$	Domaine
-		[MPa]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	
Radier du Bâtiment angle	0.29	0.50	53	91	26.1	64.9	1

Sous le radier, la capacité portante du sol sans traitement est inférieure à la charge appliquée totale. On effectuera dans ce cas les vérifications en termes de portance après renforcement de sol par colonnes ballastées.

### V.3. Portance d'une colonne ballastée isolée

#### V.3.1. Contrainte à la rupture

La contrainte de rupture  $q_r$  de la colonne ballastées, par analogie avec les conditions triaxiales, est donnée selon les recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et sous ouvrages sensibles au tassement du Comité Française de Mécanique du Sol (CFMS) par :

$$q_r = \sigma_h \cdot \tan^2 (\pi/4 + \varphi'_c / 2)$$

- $\varphi'_c$  : angle de frottement du gravier constituant la partie supérieure de la Colonne ballastée.
- $\sigma_h$  : contrainte radiale est obtenue par :

$$\sigma_h = q_{ce} / 3$$

- $q_{ce}$  : la résistance de pointe équivalente calculée sur la hauteur de colonne dans chaque couche.

#### V.3.2. Contrainte admissible

Conformément aux recommandations du CFMS, la contrainte admissible par les colonnes aux ELS et ELU est obtenue par :

- $q_{admELS} = \min (q_r/2 ; 0,8 \text{ MPa})$
- $q_{admELU} = 1,33 \times q_{admELS} = \min (q_r/1,5 ; 1,06 \text{ MPa})$

#### V.3.3. Capacité portante de la colonne

La charge admissible sur une colonne est définie par :

$$Q_{CB adm} = q_{adm} \times S$$

Avec:

- $S$  : la section moyenne d'une colonne.

La capacité portante des colonnes est donnée dans les Tableau V.3 et V.4 :

**Tableau V.3: Capacité portante des colonnes à l'ELS**

Nom	$\sigma_h$	$\varphi'_c$	$q_r$	$q_{adm}$	$\phi_{moy}$	$Q_{CB adm}$
[-]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[m]	[kN]
<b>Remblais</b>	<b>0.67</b>	<b>40</b>	<b>3.07</b>	<b>0.80</b>	<b>0.60</b>	<b>226</b>
<b>Argiles molles</b>	<b>0.17</b>	<b>40</b>	<b>0.77</b>	<b>0.38</b>	<b>0.90</b>	<b>244</b>

**Tableau V.4: Capacité portante des colonnes à l'ELU**

Nom	$\sigma_h$	$\varphi'_c$	$q_r$	$q_{adm}$	$\phi_{moy}$	$Q_{Cadm}$
[-]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[m]	[kN]
<b>Remblais</b>	<b>0.67</b>	<b>40</b>	<b>3.07</b>	<b>1.06</b>	<b>0.60</b>	<b>300</b>
<b>Argiles molles</b>	<b>0.17</b>	<b>40</b>	<b>0.77</b>	<b>0.51</b>	<b>0.90</b>	<b>325</b>

Soit au minimum une charge admissible de 244 kN à l'ELS et 325kN à l'ELU dans les argiles molles.

Cette valeur n'est pas forcément la valeur permettant le dimensionnement du projet. Il est encore nécessaire de définir les tassements et d'affiner éventuellement la charge de service pour avoir des tassements compatibles avec la stabilité des ouvrages à réaliser.

#### V.4. Vérification de la capacité portante pour le sol renforcé :

Selon les recommandations du CFMS, la charge admissible du sol renforcé par colonnes ballastées est égale à la somme de la charge admissible par les colonnes sous-jacentes et de la charge admissible du sol non traité, soit :

$$V_d < n_{CB} \times Q_{CB} + A'_{sol} \left( \frac{kc * q_{ce}}{\gamma_{R;d} \gamma_{R;v}} \right) + R_0 = Q_{Total Adm}$$

Avec :

- $n_{CB}$  : nombre de colonnes ballastées
- $Q_{CB}$  : charge admissible par les colonnes ballastées
- $A'_{sol} = S_{semelle} - S_{CB}$

Les Tableaux V.5 et V.6 récapitulent les résultats obtenus pour le sol renforcé pour la maille élémentaire de 1,70 x 1,70m sous une contrainte à ELS de 91kPa et à ELU de 125kPa :

**Tableau V.5:Résultats obtenus pour le sol renforcé sous une contrainte de 91kPa( ELS)**

Nom	kc	qce	Ø CB	Maille	A' CB	A' sol	Qsol	QCB	R0	Qtota adml	Vd
	-	[MPa]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN]	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>
<b>Radier angle</b>	<b>0.29</b>	<b>0.50</b>	<b>0.90</b>	<b>2.89</b>	<b>0.64</b>	<b>2.25</b>	<b>53.0</b>	<b>244</b>	<b>26.1</b>	<b>156.3</b>	<b>91</b>

**Tableau V.6:Résultats obtenus pour le sol renforcé sous une contrainte de 125kPa(ELU)**

Nom	kc	qce	Ø CB	Maille	A' CB	A' sol	Qsol	QCB	R0	Qtota adm	Vd
-	-	[MPa]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	kN/m <sup>2</sup>	[kN]	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>
<b>Radier angle</b>	<b>0.29</b>	<b>0.50</b>	<b>0.90</b>	<b>2.89</b>	<b>0.64</b>	<b>2.25</b>	<b>86</b>	<b>325</b>	<b>26.1</b>	<b>204.9</b>	<b>125</b>

Puisque les contraintes à l'ELU Fondamental sont plus importantes qu'à l'ELU Sismique, nous limiterons l'étude au cas le plus défavorable de l'ELU Fondamental.

La capacité portante du sol renforcé (égale 0.156MPa à ELS) est donc suffisante pour la reprise des charges appliquées.

## V.5.Calculs de tassements

### V.5.1. Tassements absolus sous les ouvrages

Les tassements sont limités en profondeur jusqu'à  $\Delta\sigma_f / \sigma_0 < 20\%$  d'après l'EC7 avec  $\Delta\sigma_f$  augmentation de contrainte et  $\sigma_0$  la contrainte initiale dans le sol.

On vérifiera :

- le non dépassement de la capacité portante de la colonne ballastée (244 kN)
- le non fluage du sol ( $Rv; d = A'_{sol} (kc * qce) / 1,68 \geq V_{res} - R_0$ ).
- $\Delta\sigma_f / \sigma_0 < 20\% \Rightarrow h > 25.24 / (0.2 * 9)$  c à dire  $h > 14.02m$
- la charge admissible de la colonne sera minorée par un coefficient de 1,5.

On aura donc :  $Q_a \text{ sans essais} = Q_a / 1,5 = 162.66 \text{ kN}$ .

**Tableau V.7: Vérification de la capacité portante de la colonne ballastée et du non fluage du sol**

Semelle	Radier angle et barrette
Charge $V_{résiduelle}$	$91 - 26.1 = 64.9 \text{ kN/m}^2$
Maille	$2.9 \text{ m}^2$
$V_{resté}$	$64.9 * 2.9 - 244 / 1.5 = 25.24 \text{ kN/m}^2$
$A'_{sol}$	$2.25 \text{ m}^2$
$R_0$	$26.1 \text{ kN/m}^2$
$V_{resté} < Q_{sol}$	$18.9 \text{ kPa} < 53 \text{ kPa}$
$Q_{CB} = \text{Maille} \times V_{résiduelle}$ - $A'_{sol} \times V_{res} < Q_{CB \text{ adm}}$	$2.9 * 64.9 - 2.25 * 25.24 = 131.42 \text{ kN} < 244 \text{ kN}$

Le tassement du radier du bâtiment d'angle le plus chargé déterminé avec la synthèse géotechnique la plus défavorable (sondage P3) des sondages P1 à P10 est présentée dans la Figure V.1 :

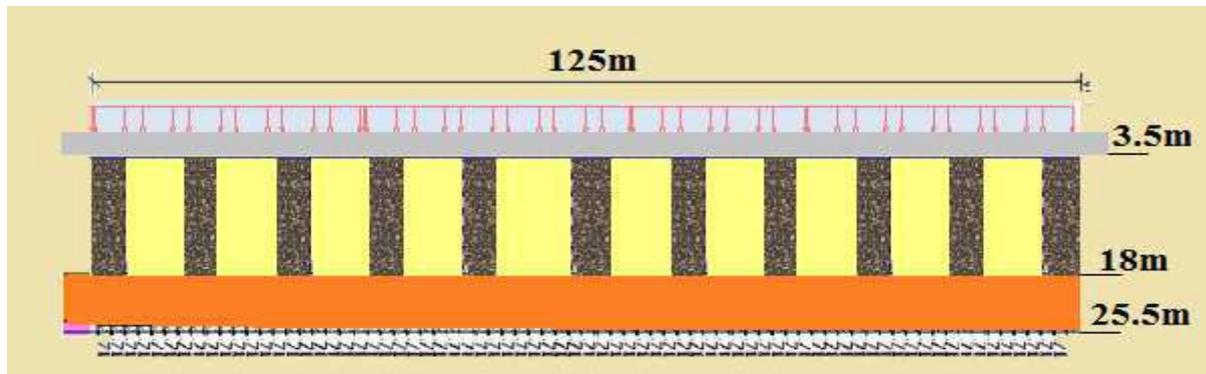


Figure V.1: Coupe transversale du sondage P3

Dans le cas où on dispose d'essais au pénétromètre statique on peut faire les corrélations suivantes pour les sols les plus courants et normalement consolidés :

$$E_{sol} = \alpha_c \cdot q_c$$

Avec:

- $\alpha_c$  : valeurs habituelles proposées dans le Tableau V.8.
- $E_{sol}$  : module œdométrique du sol.

Tableau V.8: Valeurs de  $\alpha_c$

Type de sol	Argile	Limon	Sable
$\alpha_c$	4 à 6	4 à 5	2 à 3.

NB : pour d'autres types de sols, on pourra proposer d'autres corrélations.

En se référant aux recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et sous ouvrages sensibles au tassement du CFMS. les formules de calcul sont :

$$w_i = \frac{h_i \cdot \sigma_t}{a_i \cdot E_{col} + \{(1 - a_i) \cdot \alpha_c \cdot q_{ci}\}}$$

- $a_i$  : pourcentage d'incorporation (rapport des sections), dans la couche i considérée.
- $E_{col}$  : module d'Young de la colonne ( $E_{col} = 60 \text{ MPa}$ ).
- $\sigma_t$  : contrainte verticale moyenne apportée par l'ouvrage.
- $h_i$  : épaisseur de la couche i.

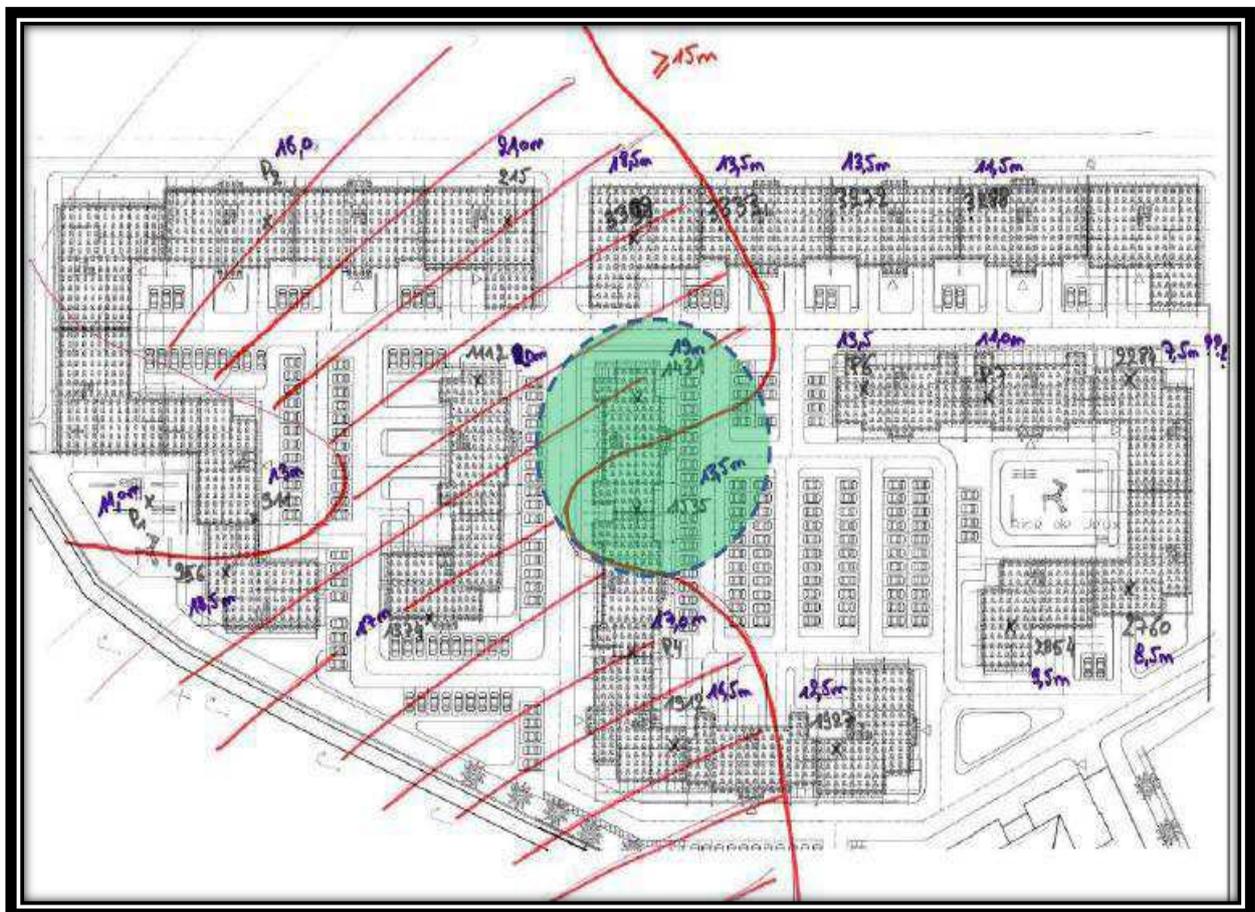
$$w_i = \frac{(18-3.5) \cdot 0.064}{0.28 \cdot 60 + \{(0.72) \cdot 5 \cdot 0.5\}} = 4.98 \text{cm} < 10 \text{cm} \quad \text{condition vérifiée}$$

**V.5.2. Calculs du tassement différentiel**

L’objectif de ce paragraphe est de vérifier que le tassement différentiel sous les ouvrages reste admissible.

Les différents sondages complémentaires réalisés sur le site montrent une variabilité du toit de la formation 3 pouvant aller de 1 à 5m sous un même ouvrage.

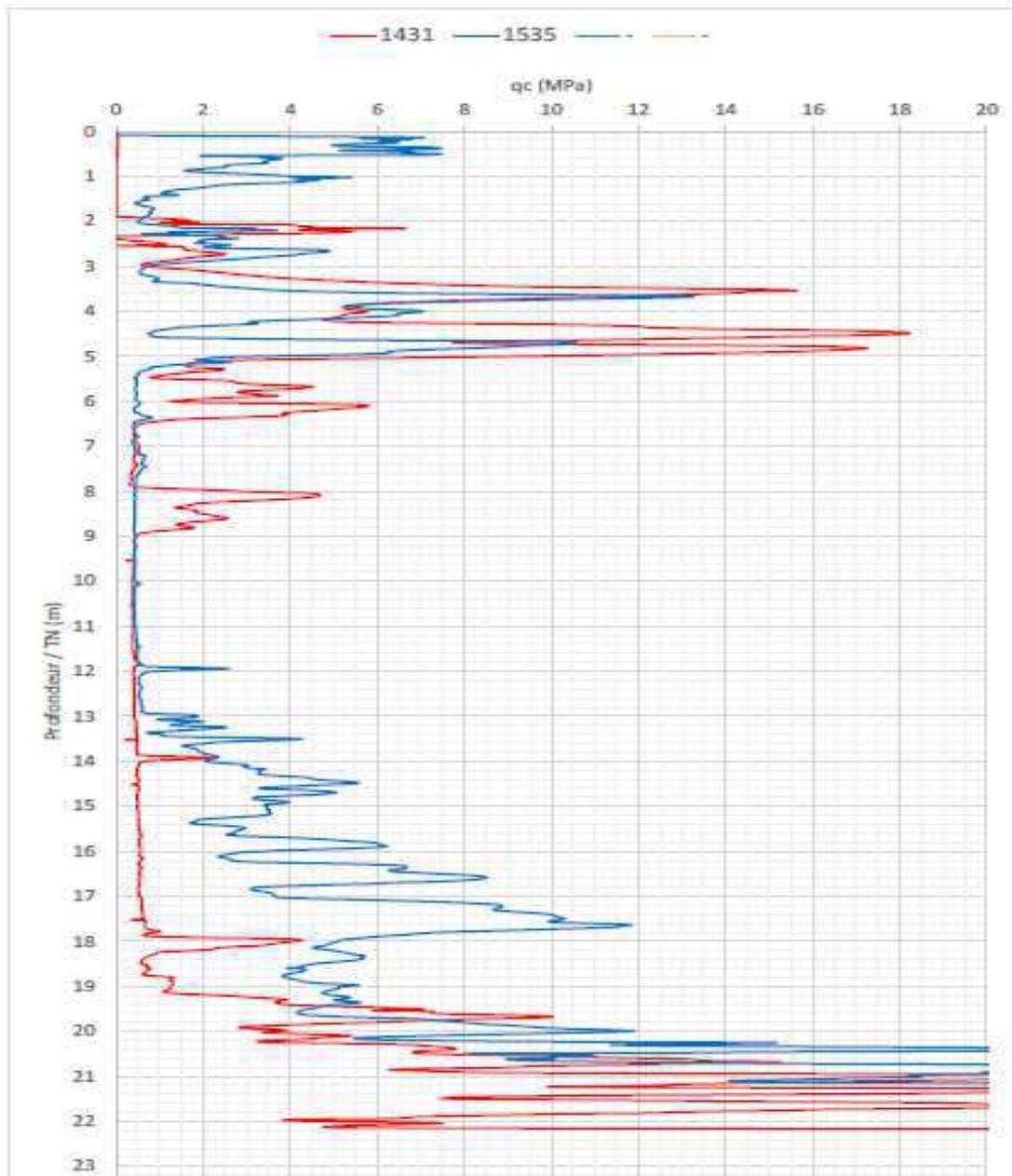
On donne dans la Figure V.2 la cote du toit de la formation 3 :



**Figure V.2: Cote du toit de la formation 3**

La zone entourée en vert sur le schéma de la figure V.2 correspondant au cas où la variation du toit de la formation 3 est la plus importante sous le même ouvrage. Il correspond au cas des sondages complémentaires CPT n°1431 et 1535.

On donne dans la Figure V.3 les résultats CPT de ces deux sondages :



**Figure V.3: résultats CPT de sondages n°1431 et n°1535**

On constate que le toit de la formation 3 se situe à 19m/TN pour le sondage CPT n°1431 et à 13,0m pour le sondage CPT n°1535.

Nous reprendrons donc la profondeur des formations 3 à 13,0 et 19,0m/TN.

Les résultats sont présentés dans les Figures V.4 et V.5:

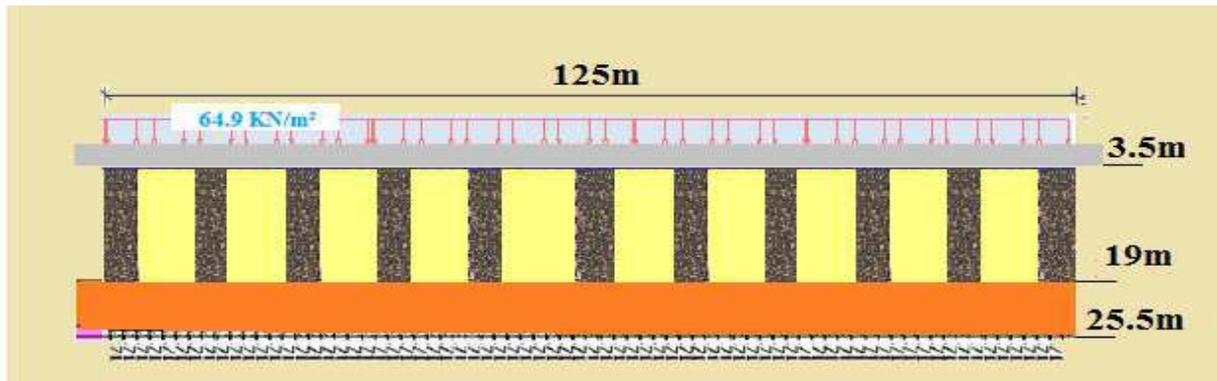


Figure V.4: Coupe transversale du sondage 1431

$$\bullet w_i = \frac{(19-3.5) \cdot 0.064}{0.28 \cdot 60 + \{(0.72) \cdot 5 \cdot 0.5\}} = 5.3 \text{ cm}$$

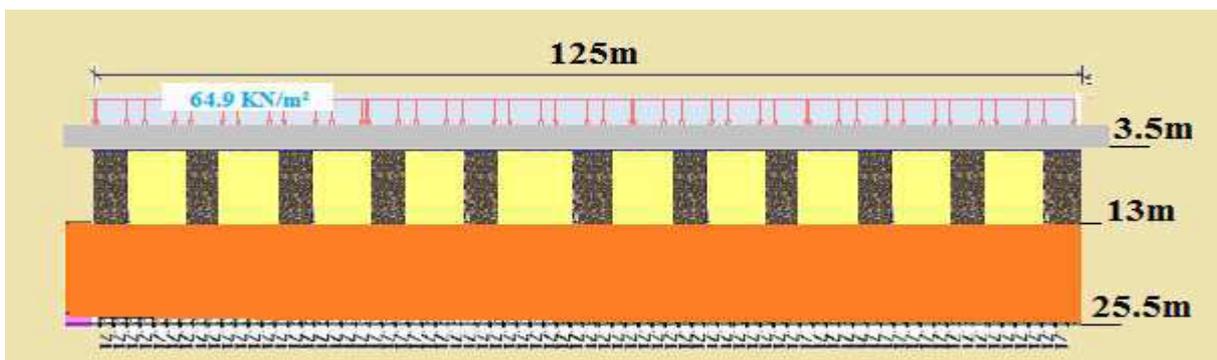


Figure V.5: Coupe transversale du sondage 1535

$$\bullet w_i = \frac{(13-3.5) \cdot 0.064}{0.28 \cdot 60 + \{(0.72) \cdot 5 \cdot 0.5\}} = 3.26 \text{ cm}$$

Soit un tassement différentiel de l'ordre de 2.04cm sur une longueur de bâtiment de 26m, soit :

$$0,02 \text{ m} / 26,0 \text{ m} = 7,69 \cdot 10^{-4} < 2,0010^{-3} = 1/500. \quad \text{Condition vérifié}$$

Le tassement différentiel est donc vérifié.

## V.6.Conclusion

Vis-à-vis des contraintes, les charges apportées par l'ouvrage peuvent être supportées par le sol qui présente une étreinte latérale suffisante pour empêcher la rupture par expansion latérale . Concernant les tassements, les résultats retrouvés sont admissible et doivent être confirmés par l'essai de chargement.

# Chapitre VI

## Essais de contrôle et de réception

## VI.1 .Introduction

Le contrôle se fait conformément au cadre contractuel, et dans le respect de la norme relative à l'exécution des colonnes ballastées.

## VI.2. Essais de Contrôle des colonnes ballastées

### VI.2.1. Avant la réalisation

#### ➤ Matériaux constitutifs des colonnes

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

- La granulométrie du matériau d'apport doit vérifier les trois conditions :  
 $d_5 > 0,1\text{mm}$ ,  $d_{30} > 10\text{mm}$ ,  $d_{100} > 100\text{mm}$ .
- Le fuseau granulométrique doit être choisi selon la fonction essentielle que l'on veut conférer à la colonne ballastée.
- Le rôle porteur est accru par un fort pourcentage de cailloux ; Le matériau d'apport doit être roulé ou concassé en fonction des disponibilités locales.
- La roche constituant les éléments du matériau d'apport doit avoir des caractéristiques mécaniques élevées ( $R_c > 25\text{MPa}$ ).

### VI.2.2. Pendant la réalisation (autocontrôle)

Les données importantes de chaque étape de compactage peuvent être mesurées, enregistrées et imprimées sous forme de fiches individuelles et récapitulatives. L'appareillage de mesure se compose (voir annexe):

- d'un appareil de commande dans la cabine du porteur.
- d'une unité centrale avec enregistrement des données.
- d'un ordinateur avec imprimante.

Pour chaque colonne ballastée réalisée, un graphique parallèle en fonction du temps est édité permettant de vérifier :

- l'atteinte de la couche compacte en fin de fonçage de l'outil.
- l'intensité du compactage à tous les niveaux de la colonne.
- la continuité de la colonne sur toute sa longueur.
- la profondeur en fonction du temps (vitesse de pénétration).
- la durée de réalisation d'une colonne.
- Il est également possible d'enregistrer la consommation en énergie.

### VI.3.Essais de réception des colonnes ballastées

Les essais de réception des colonnes sont à la charge de l'entreprise de réalisation des colonnes.

#### VI.3.1.Contrôle du diamètre de la colonne

On Contrôlé un par tranche de 50 colonnes, Le contrôle se fait par dégarnissage des colonnes de l'ouvrage sur une profondeur minimale de 1m sous la plateforme, la tolérance d'exécution des colonnes est de  $\pm 10\text{cm}$  (voire Figure VI.1).



**Figure VI.1 : Dégarnissage d'une colonne**

#### ➤ Evaluation du diamètre moyen des colonnes

En réalité, les colonnes ballastées n'ont pas une section circulaire, la section du vibreur est composée d'un demi-cercle et d'une demi ellipse (voir Figure VI.2).

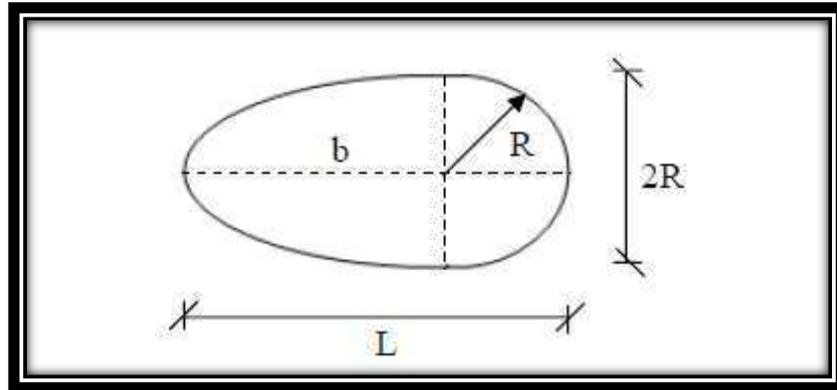


Figure VI.2 : Schéma général sur la section transversale du vibreur

En calculant la section totale du vibreur, on peut estimer le diamètre moyen des colonnes réalisées avec de telles dimensions.

$$S = \frac{\pi \cdot b \cdot R}{2} + \pi \cdot \frac{R^2}{2} \quad \Rightarrow \quad S = \frac{\pi \cdot R}{2} \cdot (b + R) = \frac{\pi \cdot R \cdot L}{2}$$

Le cercle équivalent aura une section  $S_{eq} = \frac{\pi \cdot \phi_{eq}^2}{4}$ .

On posant  $S = S_{eq}$ , le diamètre équivalent sera donc donné par :  $\phi_{eq} = \sqrt{2 \cdot R \cdot L}$

On peut vérifier le diamètre moyen des colonnes après chaque dégarnissage en mesurant les dimensions L et 2R (voir Figure V.3)



Figure VI.3 : Mesure des deux dimensions (L et 2R) d'une colonne après son dégarnissage

### VI.3.2. Essais au pénétromètre statique (CPT) pour vérifier la compacité et la continuité

L'expérience montre que le pénétromètre statique (CPT) est l'outil le mieux adapté en raison de la continuité de la mesure, tout en se heurtant à des difficultés communes telles que le faux refus sur blocs, la déviation des tiges.

➤ **Contrôle de la continuité en cas de défaut d'enregistrement,**

On contrôle 1 par tranche de 50 colonnes. Le contrôle de la continuité se fait par essai de pénétration statique (CPT) ou dynamique (DPT) (voir Figure VI.4).



**Figure VI.4 : Exemple de Réalisation de l'essai CPT dans l'axe des colonnes**

➤ **Contrôle de la compacité de la colonne,**

On contrôle 1 par tranche de 50 colonnes. Le contrôle de la compacité se fait par essai pénétromètre statique (CPT) en descendant de 1m sous la tête de la colonne, sauf refus sur la couche d'assise.

La résistance pénétrométrique minimale en tout point de l'axe de la colonne, à partir de 1m de profondeur, doit être égale à 15MPa (DTU13.2). Lorsqu'il y a un refus, cela implique que le critère de compacité est vérifié.

La zone de contrôle s'étale de 1m de profondeur jusqu'à 3 à 4m. Au-delà, les tiges commencent à se dévier et on enregistre de faibles valeurs de résistance.

Les profondeurs de ces sondages pourront varier en fonction des contraintes qui accompagnent la réalisation de ce type d'essai. Dans un matériau de si grande classe granulométrique la principale contrainte rencontrée est la difficulté de réaliser l'essai exactement dans l'axe de la colonne ce qui conduit à la déviation du train de tiges.

En cas de difficulté de réalisation de tels essais, éventuellement en cas de blocage de l'appareillage sur de gros éléments de la colonne, ou déviation du train de tiges, l'entrepreneur doit proposer un autre programme de contrôle.

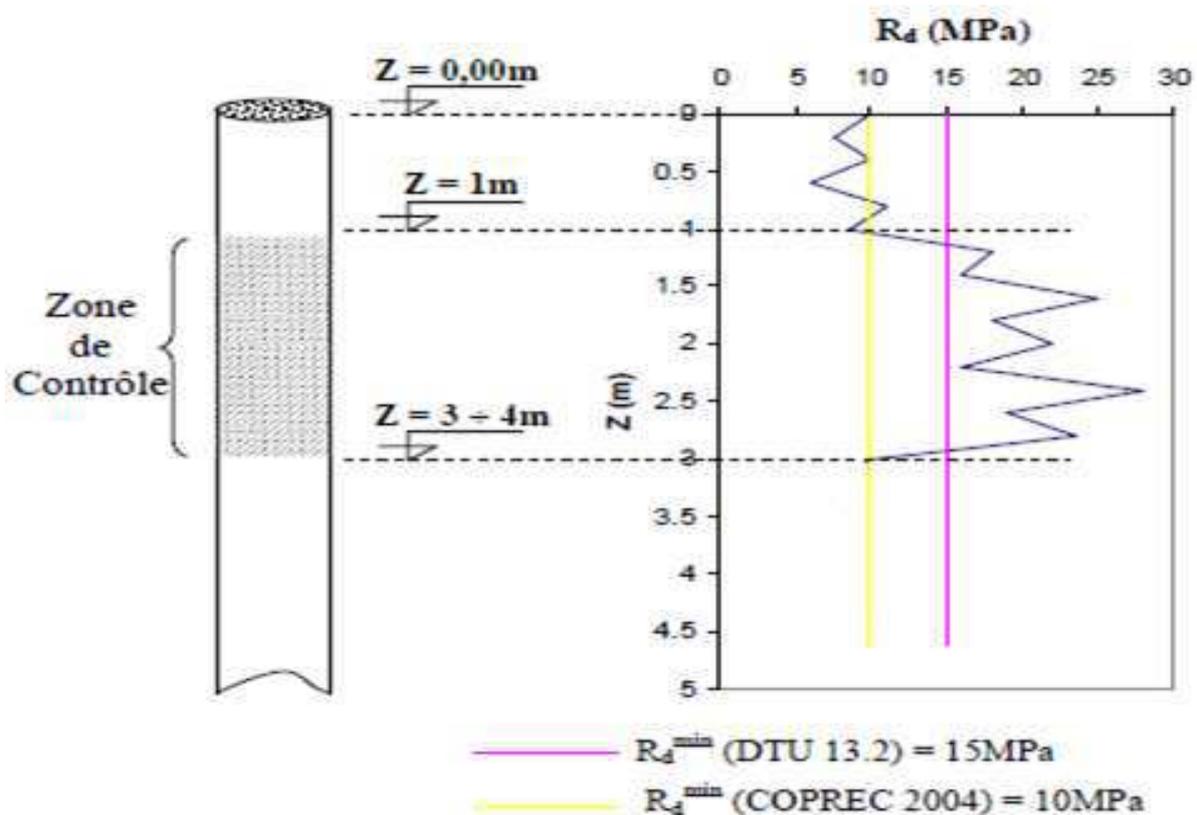


Figure VI.5 : Profil pénétrométrique typique dans l'axe des colonnes

### VI .3 .3. Essai de chargement

C'est un essai de chargement à 1,5 fois la charge ELS de la colonne  $Q_N$  sur une colonne de l'ouvrage.

L'essai de chargement nécessite la mise en place d'une semelle en tête de la colonne préalablement arasée sous le matelas de répartition. La surface de la semelle doit rester inférieure à 2,5 fois la section théorique de la colonne.

L'essai est de type à effort contrôlé, exécuté en compression ; il consiste à mesurer l'enfoncement de la tête de la colonne (à l'aide de deux ou trois comparateurs) soumise à une charge verticale. Cette charge est appliquée progressivement en six paliers :  $Q_N/4$ ,  $Q_N/2$ ,  $3Q_N/4$ ,  $Q_N$ ,  $5 Q_N/4$ ,  $3 Q_N/2$ .

A chaque palier, les mesures de déplacement sont prises aux temps suivants : 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 45 et 60 minutes ou jusqu'à stabilisation des comparateurs.

- La déformation est dite « stabilisée » lorsque sa variation n'excède pas 2 centièmes de mm par minute.
- Les premiers paliers peuvent donc avoir une durée de 30 minutes. Le déchargement se fait en quatre paliers maintenus 5 minutes.

Le compte-rendu de l'essai comprend :

- le programme de chargement/déchargement avec les mesures des comparateurs en fonction du temps et de la charge.
- un graphique tassement/temps par paliers.
- un graphique de tassement à la fin de chaque palier en fonction de la charge.
- un graphique de la pente de fluage en fonction de la charge.

#### VI .3 .3.1.Objectifs de l'essai

Le but de cet essai est de vérifier le comportement d'une colonne ballastée en matière de déformation sous une charge verticale donnée, C'est l'essai le plus fiable pour le contrôle des colonnes ballastées car il permet de soumettre la colonne à une charge égale à 1,5 fois la charge à l'ELS et de mesurer son tassement.

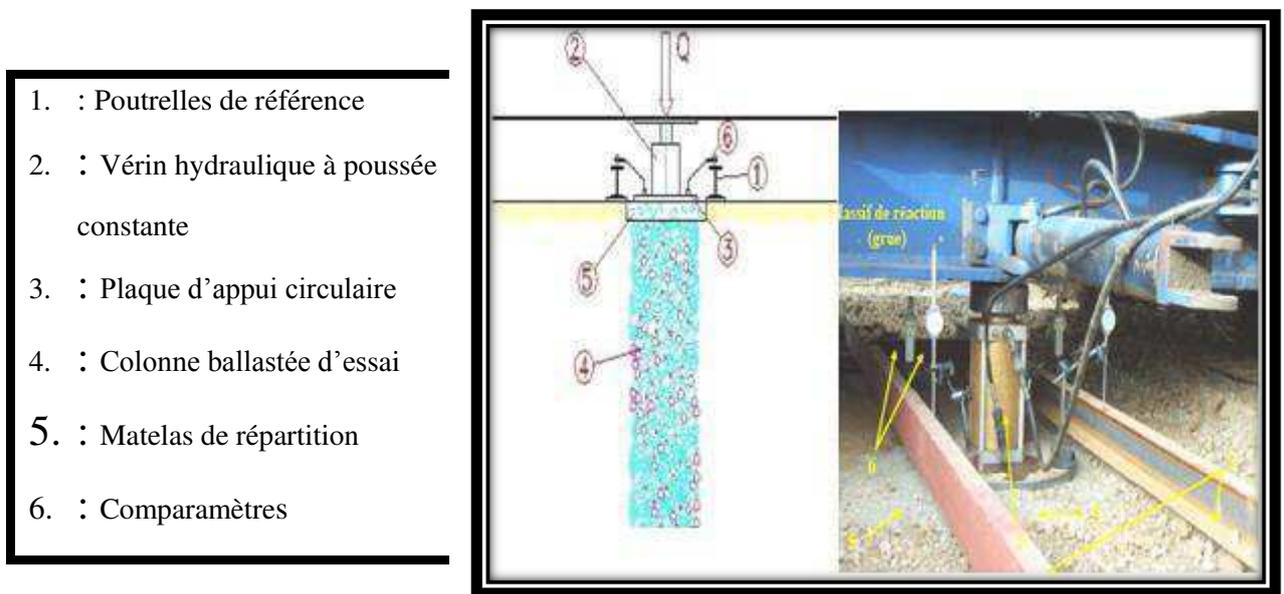
L'essai est considéré comme probant, si les deux critères suivants sont satisfaits :

- la charge critique n'est pas atteinte.
- le tassement en fin du palier de la charge de service  $Q_N$  reste inférieur à celui compatible avec tolérances imposées par la structure ou une partie de l'ouvrage (5 cm dans notre cas).

Les courbes de tassements obtenues mettent en évidence le mode de déformation élastoplastique classique des colonnes ballastées sans atteindre de point de rupture (voir annexe).

### VI.3.3.2. Description de l'essai

La charge est appliquée par un vérin hydraulique sur une plaque circulaire d'un diamètre proche de celui de la colonne (environ 80 cm) et d'épaisseur 1 à 2 cm, en sollicitant le poids propre d'un massif de réaction suffisamment lourd (une grue, par exemple). Ce vérin qui est actionné par une pompe doit en principe être muni d'une rotule pour assurer la verticalité des efforts et éviter les pertes par frottement.



1. : Poutrelles de référence
2. : Vérin hydraulique à poussée constante
3. : Plaque d'appui circulaire
4. : Colonne ballastée d'essai
5. : Matelas de répartition
6. : Comparateurs

Figure VI.6 : Principe de l'essai de chargement

### VI.3.3.3. Choix des colonnes d'essai

Généralement, la colonne d'essai sera choisie aléatoirement, de préférence dans une zone où l'essai présente un intérêt particulier (profil géotechnique défavorable, charge plus importante, ...).

### VI.3.3.4. Charge appliquée

Conformément aux prescriptions du D.T.U 13.2, cet essai mesure les tassements jusqu'à 1,5 fois la charge de service, notée  $Q_N$ .

### VI.3.3.5. Paliers de chargement

Le cycle et les paliers de chargement sont inspirés de ceux de l'essai de contrôle de la norme AFNOR NF P 94 150-1 applicable aux pieux. Cependant, pour répondre aux exigences du D.T.U. 13.2 (chargement à 150% de la charge de service  $Q_s$ ) et pour obtenir des résultats significatifs et exploitables dans le cas d'un essai sur colonnes ballastées, les paliers suivants seront respectés :

- préchargement de 0 à  $0,25 Q_s$  maintenu pendant 15 minutes et déchargement rapide pour vérifier le bon fonctionnement du système et pour supprimer les défauts de contact entre la plaque et la tête de la colonne.
- chargement de 0 à  $1,5 x Q_s$  par 6 paliers égaux de  $0,25 x Q_s$ .
- chaque palier est maintenu constant pendant 60 minutes (\*).
- pour chaque palier, les lectures des déformations sont faites aux temps suivants :
  - ✓ toutes les minutes entre 1 et 5 min.
  - ✓ toutes les 5 min. entre 5 et 30 min.
  - ✓ toutes les 15 min. entre 30 et 60 min.
  - ✓ déchargement par paliers de  $0,25 Q_s$  maintenus pendant 5 minutes avec lectures toutes les minutes.

Les mises en charge doivent être les plus rapides possibles et le temps initial de chaque Palier correspond à la fin de la mise en charge.

### VI.4. Conclusion

Le dimensionnement des colonnes ballastées doit impérativement être suivi par un programme de contrôle en cour et après réalisation pour vérifier que les critères pris en considération dans les calculs sont respectés (diamètre,...) et de vérifier le comportement réel des colonnes vis-à-vis des contraintes et tassements sous les charges de service.

Vu les nombreux avantages que nous procure les colonnes ballastées nous proposerons de renforcer notre sol par cette technique qui a donné le fruit de ses avantages sur le terrain.

## Conclusions générale

Ce modeste travail, fruit de cinq années de formation théorique, nous a été très bénéfique, car il nous a permis de compléter nos connaissances dans le domaine des procédés d'amélioration des sols en général, et de les approfondir, dans la technique des colonnes ballastées, en particulier.

Cette étude traite d'une partie du projet de 220 logements sur la commune d'ANNABA (Algérie), qui doivent être fondés sur un sol, présentant des caractéristiques géotechniques et rhéologiques très médiocres, à savoir :

1. une faible capacité portante ;
2. des tassements importants ;

Afin de pouvoir résoudre ces problèmes, la solution technique optimale, a consisté à fonder l'ouvrage au moyen du procédé de colonnes ballastées par ce que c'est un procédé facile à mettre en œuvre, relativement rapide et surtout économique.

Le matériau d'apport étant des cailloux ou du gravier. Cette solution est très économique aux problèmes des sols médiocres du littoral constitué de vases très compressibles.

Dans le cadre des contrôles des colonnes ballastées, les essais au pénétromètre statique et au pénétromètre dynamique ont démontré qu'on peut atteindre avec les colonnes ballastées des résistances en pointes très élevées.

L'action des colonnes ballastées en matière de tassement est donc très significative.

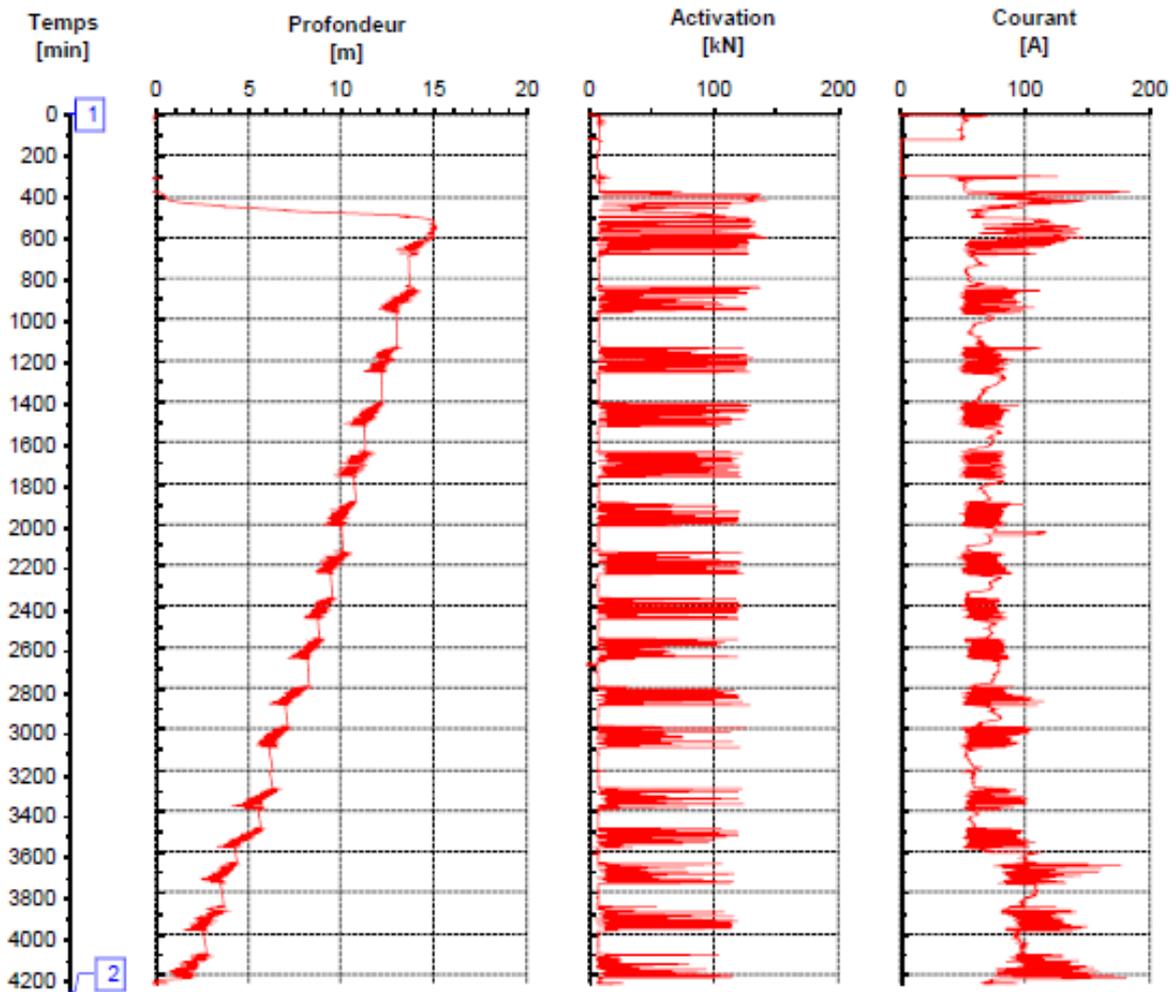
## *Références bibliographiques*

- [ 1 ] Complément des recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et sous ouvrages sensibles au tassement du Comité Française de Mécanique du Sol (CFMS), version n° 2 de 2011.
- [ 2 ] Documents Techniques Unifiés (DTU.13.2) (1992) « Fondation profondes pour le bâtiment – Chap.VIII : Colonnes ballastées », Paris.
- [ 3 ] Pezot, B & Liausu Ph. « Renforcement de sols mous par colonnes à module contrôlé », article de Ménard Sol traitement.
- [ 4 ] Keller Fondations Spéciales ®, « Les procédés de vibration profonde des sols », brochure 10-02 F, imprimée en Allemagne.
- [ 5 ] Dhouib, A. et Blondea, F (2005) « Colonnes Ballastées - techniques de mise en œuvre, domaines d'application, comportement, justification, contrôle, axes de recherche et développement », Presse de L.C.P.C, France.
- [ 6 ] Magnan, J.P. & Pilot, G. (1988) « Amélioration des sols », mécanique des Sols, Techniques de l'Ingénieur.C255, France.
- [ 7 ] Imene Bisma ZIGHMI et Chawki MESSIS (2008). Renforcement des sols par colonnes ballastées ; Mémoire pour l'obtention du diplôme Ingénieur d'état en travaux publics. ENSTP ,2008.

# ANNEXE

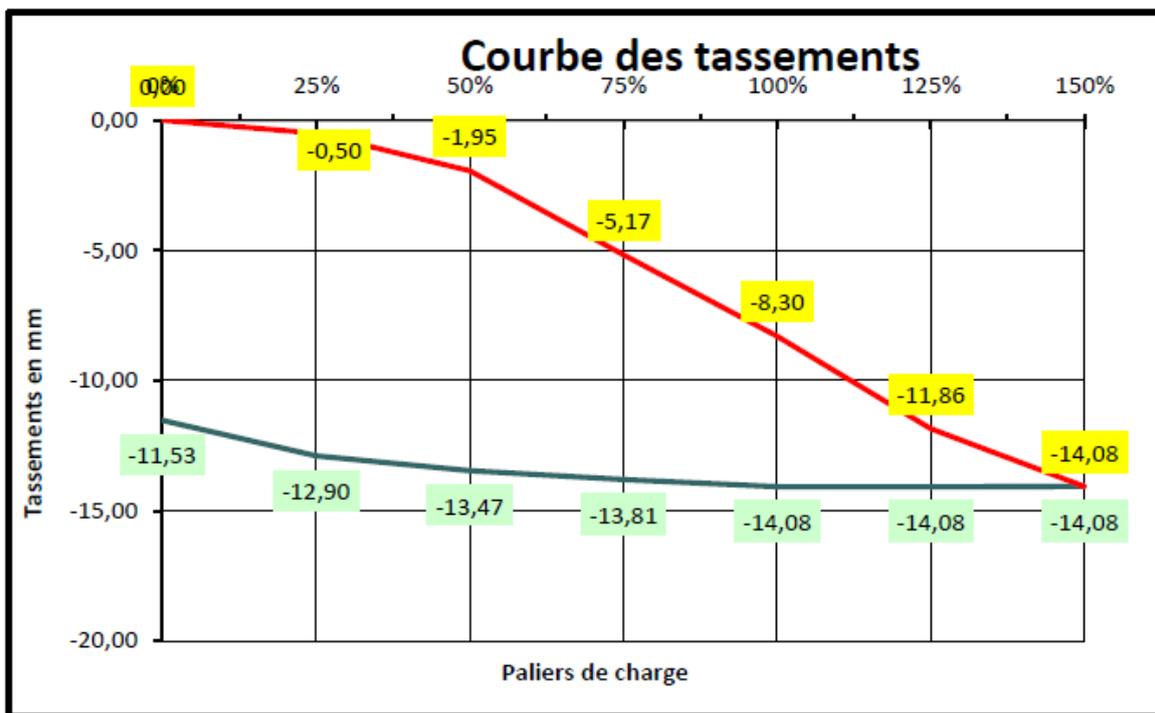
Autocontrôle :

Procédé vibration profonde



Evènement	Désignation	Heure	Profondeur
№		[hh:mm:ss]	[m]
0	Debut Forage	08:50:37	0,0
0	Fin	10:01:27	0,1

Les résultats des essais de chargement :



Ainsi que la courbe détaillée des tassements en fonction du temps :

