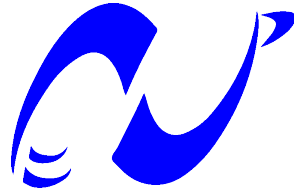


RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Civil

Mémoire de Master en Génie Civil

# Dimensionnement des colonnes ballastées par la méthode de Priebe

**LAIMECHE Abderrahim**

Sous la direction de

**Pr. S. Belkacemi**

Présenté et soutenu publiquement le 29/06/2017

## Composition du Jury :

Président	R.MITICHE KETTAB	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
Promoteur	S. BELKACEMI	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
Examineurs	M. DEMIDEM	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique
	B.K. BENZAOUZ	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique

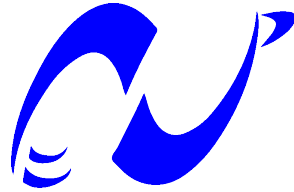
**ENP 2017**



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Civil

Mémoire de Master en Génie Civil

# Dimensionnement des colonnes ballastées par la méthode de Priebe

**LAIMECHE Abderrahim**

Sous la direction de

**Pr. S. Belkacemi**

Présenté et soutenu publiquement le 29/06/2017

## Composition du Jury :

Président	R.MITICHE KETTAB	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
Promoteur	S. BELKACEMI	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
Examineurs	M. DEMIDEM	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique
	B.K. BENZAOUZ	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique

**ENP 2017**

## ملخص

تعزير التربة هي تقنية مستخدمة ومعروفة منذ فترة من الزمن. التقنية تعتمد على وضع وإنشاء عنصر مقاوم في التربة نفسها من أجل تشكيل خليط تربة /تقنية التعزيز، مما يؤدي إلى زيادة إجمالية في الخصائص الميكانيكية العامة للأرض (تخفيض نسبة التسوية تحت الهيكل العام أيضا زيادة في القدرة الاستيعابية للتربة والأرض). تقنية الأعمدة الحجرية هي الأكثر استخداما في المجال، هي إدراج وإشمال حصى مضغوطة ومتراصة في التربة. الكلمات المفتاحية : التربة، تقنية تعزير، القدرة الاستيعابية، حجر.

## Abstract

Soil reinforcement is a well-known technique. It consists of putting in place a resistant element in order to form a soil / reinforcement complex, which leads to an overall increase in the mechanical characteristics of the soil (A reduced settlement under the structure also an increase in the soil carrying capacity).

The technique of ballasted columns is the most used in field, they are inclusions made up of compressed gravels into the ground.

**Keywords:** Soil, reinforcement technique, carrying capacity, gravels.

## Résumé

Le renforcement de sol est une technique utilisée et reconnue depuis longtemps. Elle consiste à mettre en place un élément résistant dans le sol afin de former un complexe sol/renforcement, ce qui conduit à une augmentation globale des caractéristiques mécaniques du sol (Un tassement réduit sous l'ouvrage et une augmentation de la capacité portante du sol).

La technique des colonnes ballastées est la plus utilisée, ce sont des inclusions de graviers refoulées et compactées dans les dépôts du sol.

**Mots clés :** Sol, technique de renforcement, capacité portante, graviers.



# Dédicace

*Je dédie ce travail à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et l'encouragement sont l'essentiel de ma réussite. Sans eux je ne serai pas à ce stade aujourd'hui.*

*A mes frère et ma sœur pour leurs soutiens continues durant mon parcours.*

*A ma grande famille.*

*Et à tous mes amis.*

*Abderrahim*

# Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce travail.

Ce travail que nous présentons a été effectué sous la direction de Monsieur S. BELKACEMI, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, qui a suivi de très près ce travail, pour ses orientations pédagogiques pour l'élaboration de ce mémoire.

Nous tenons à remercier madame R.MITICHE KETTAB, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour l'honneur qu'elle nous fait de présider le jury de notre soutenance.

Que Messieurs ..... et ..... , professeurs à l'Ecole Nationale Polytechnique, soient convaincu de notre sincère reconnaissance pour avoir accepté d'examiner et de critiquer ce mémoire.

Nous remercions tous nos amis qui nous ont aidé pour l'élaboration de ce mémoire.

Enfin, nous tenons à remercier tous les gens qui ont contribué à notre réussite tout au long de notre parcours d'étude.

# Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

<b>Introduction Générale</b>	<b>10</b>
<b>1 La liquéfaction du sol</b>	<b>12</b>
1.1 Introduction :	12
1.2 Phénomène de la liquéfaction du sol :	12
1.3 Les effets de la liquéfaction :	12
1.3.1 Niigata, Japon (1964)	13
1.3.2 Moss Landing, Californie (1989)	14
1.3.3 Port d'Island, Kobe, Japon (1995)	14
1.3.4 Christchurch, New Zealand (2011)	15
1.4 Conclusion	16
<b>2 Les techniques d'amélioration du sol</b>	<b>18</b>
2.1 Introduction :	18
2.2 Compactage dynamique	19
2.3 Drains verticaux :	20
2.4 Inclusions :	21
2.4.1 Colonnes ballastées :	22
2.5 Vibroflottation :	22
2.6 Le Jet Grouting :	24
2.7 Injection solide :	25
2.8 Soil mixing :	26
2.9 Conclusion :	27
<b>3 Les colonnes ballastées</b>	<b>29</b>
3.1 Introduction :	29
3.2 Les colonnes ballastées :	30
3.3 Présentation :	30
3.4 Domaine d'application :	30
3.5 Méthodes et matériels :	32
3.5.1 Préforages :	32
3.5.2 Matériaux d'apport :	33
3.6 Mise en oeuvre :	34
3.6.1 La mise en oeuvre par voie sèche :	34

3.6.2	La mise en œuvre par voie humide : . . . . .	36
3.7	Modèles de comportement d'un réseau de colonnes isolées sous charge statique verticale : . . . . .	38
3.7.1	Définition du réseau de colonnes ballastées : . . . . .	38
3.7.2	Diamètre équivalent : . . . . .	39
3.7.3	Profondeur de la colonne ballastée : . . . . .	40
3.7.4	Rapport de remplacement ( $a_s$ ) : . . . . .	40
3.8	Mode de rupture d'une colonne de ballast : . . . . .	41
3.8.1	Rupture par expansion latérale : . . . . .	41
3.8.2	Rupture par poinçonnement du sol : . . . . .	42
3.8.3	Rupture par cisaillement généralisé : . . . . .	42
3.9	Contrôle des colonnes ballastées : . . . . .	43
3.9.1	Avant la réalisation : . . . . .	43
3.9.2	Pendant la réalisation : . . . . .	43
3.9.3	Après la réalisation : . . . . .	43
3.10	Conclusion : . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Dimensionnement des colonnes ballastées par la méthode de Priebe</b>	<b>46</b>
4.1	Introduction : . . . . .	46
4.2	Principe de base : . . . . .	46
4.3	Hypothèses simplificatrices : . . . . .	47
4.4	Facteur d'amélioration : . . . . .	47
4.5	Prise en compte de la compressibilité du matériau constitutif de la colonne ballastée : . . . . .	48
4.6	Prise en compte du poids des terres sus-jacentes : . . . . .	49
4.7	Détermination de la résistance au cisaillement : . . . . .	50
4.8	Paramètres du sol : . . . . .	52
4.8.1	Angle de frottement : . . . . .	52
4.8.2	Cohesion : . . . . .	52
4.9	Tassements de semelles filantes et isolées : . . . . .	52
4.10	Conclusion : . . . . .	54
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>55</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>56</b>

# Liste des tableaux

3.1	Champ d'application des colonnes ballastées : Nature et résistance des sols (étroite latérale).[7]	32
3.2	Caractéristiques du ballast pour colonnes ballastées.	33

# Liste des figures

1.1	Inclinaison des bâtiments d'appartements de Kawagishi-cho à Niigata au Japon dues à la liquéfaction . . . . .	13
1.2	Rupture du pont de Showa, à Niigata au Japon, dues à l'épandage latéral dans le sol. . . . .	13
1.3	Rupture routière induite par la liquéfaction, Moss Landing State Beach.[2]	14
1.4	Séisme de Hyogo-ken Nanbu, Kobe, Japon, 1995. . . . .	15
1.5	Exemple de l'ébullition de sable. . . . .	15
2.1	Resumé sur l'applicabilité générale des méthodes d'amélioration du sol pour les sols de diverses distributions granulométriques, Mitchell 2008.[7] . . . .	18
2.2	Compactage dynamique profond, en montrant le schéma des points d'impact primaire.[3] . . . . .	19
2.3	Exemple du site subissant une amélioration des sols par compactage dynamique. . . . .	19
2.4	Exemple d'un pylon. . . . .	20
2.5	Chantier de réalisation des drains verticaux. . . . .	20
2.6	Amélioration de sol par inclusion. . . . .	21
2.7	Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides d'après Berthelot et al. (2003) . . . . .	21
2.8	Colonnes ballastées.[9] . . . . .	22
2.9	(a) Illustration schématique d'un vibroflot typique (après Bell, 1993), et (b) vibroflots pour densifier des sols susceptible à la liquéfaction dans une installation de traitement des eaux usées en Californie (photo courtoisie de Hayward Baker). . . . .	23
2.10	Le cône d'affaissement autour du vibreur . . . . .	24
2.11	Différentes étapes de la réalisation d'une colonne de Jet Grouting . . . . .	25
2.12	Amélioration de sol par injection solide. . . . .	25
2.13	Amélioration de sol par soil mixing. . . . .	26
3.1	Diagramme explicatif du domaine d'application des différents procédés d'amélioration du sol en fonction de la nature du sol et les ouvrages projetés. . . . .	29
3.2	Domaines d'application des techniques de renforcement et d'amélioration du sol en fonction de la granulométrie du dépôt du sol in-situ. . . . .	31
3.3	Exemple de mise en œuvre par voie sèche, (site : mosquée de Boudouaou) . . . . .	35
3.4	Une colonne de ballast après la finition . . . . .	35
3.5	Etapes de mise en oeuvre des colonnes ballastées . . . . .	36
3.6	Exemple de mise en œuvre par voie humide. . . . .	36
3.7	Phénomène de liquéfaction local (Site : barrage Kissir- Jijel). . . . .	37
3.8	Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide. . . . .	38
3.9	maille triangulaire. . . . .	38
3.10	maille hexagonal. . . . .	39
3.11	maille carré. . . . .	39

3.12 Réseau de colonnes ballastées : domaine d'influence de la colonne et caractéristiques des colonnes. . . . .	40
3.13 Mécanismes de rupture d'une colonne ballastée isolée. . . . .	41
3.14 Rupture par expansion latérale d'une colonne ballastée isolée sous charge axiale en tête.[7] . . . . .	42
3.15 Clavier et unité centrale de l'appareil de mesure M4 (Document de Keller®) . . . . .	43
4.1 Facteur d'amélioration ( $n_0$ ) en fonction du rapport des sections ( $A/A_c$ ). . .	48
4.2 Prise en compte de la compressibilité du matériau de la colonne ballastée. .	49
4.3 Détermination du facteur de profondeur. . . . .	50
4.4 Coefficients de proportionnalité ( $m$ ) et ( $m'$ ) de la charge reprise par les colonnes ballastées en fonction des rapports de surface. . . . .	51
4.5 Tassements des semelles isolées. . . . .	52
4.6 Tassements des semelles filantes. . . . .	53

# Introduction Générale

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 qui peut entraîner des problèmes majeurs (La liquéfaction des sols) qui cause des dégâts souvent irréparables, tant à des ouvrages existants qu'à de nouvelles constructions.

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 propriétés géo-mécaniques médiocres. Parmi ces techniques, on étudiera celle des colonnes ballastées, faisant partie des améliorations de sols par inclusions, connues pour leur aptitude à la déformation de façon considérable sous l'action d'un chargement.

Dans ce présent travail, nous nous intéressé à mieux comprendre le comportement de la colonne ballastée et définir des paramètres intervenants dans le dimensionnement d'un réseau de colonnes de ballastes en passant par les étapes suivantes :

D'abord, un premier chapitre qui définit c'est quoi une liquéfaction d'un sol aussi les différentes caractéristiques de ce phénomène tout en illustrant avec des exemples sur les dommages et les effets de la liquéfaction.

Ensuite, un deuxième chapitre pour examiner les différentes techniques d'amélioration des sols les plus communes.

Après, un troisième chapitre discute en détail l'une des méthodes abordées au chapitre précédent qui est les colonnes ballastées, en passant par la définition de la méthode et son principe de fonctionnement ainsi les différentes techniques de mise en œuvre dans les zones appropriées.

Enfin, un quatrième chapitre pour expliquer les différents paramètres qui interviennent dans le dimensionnement des colonnes ballastées par la méthode de Priebe, à partir de bases théoriques d'essais de laboratoire sur modèles réduits afin de proposer des courbes empiriques concernant la capacité portante des colonnes et la réduction des tassements.



Chapitre 01 :  
La liquéfaction du sol

# Chapitre 1

## La liquéfaction du sol

### 1.1 Introduction :

La liquéfaction est l'un des sujets les plus importants et les plus complexes en géotechnique. Ses effets dévastateurs ont attiré l'attention des ingénieurs géotechniciens en 1964 après les tremblements de terre du Alaska et Niigata au Japon. Les deux séismes ont produit des exemples spectaculaires de dommages induits par la liquéfaction, y compris des ruptures des couches du sol, des renversements de ponts et des fondations de bâtiments.

Ce chapitre nous donne une idée sur la liquéfaction et les différentes terminologies, aussi les effets de ce phénomène.

### 1.2 Phénomène de la liquéfaction du sol :

L'une des causes les plus dramatiques qui causent des dommages aux structures pendant les tremblements de terre est l'occurrence et la répétition de la liquéfaction dans les dépôts de sable saturé. Le sable lâche tend à se contracter sous le chargement cyclique imposé par le tremblement de terre, qui peut transférer les contraintes normales de la matrice de sable à l'eau interstitielle, si le sol est saturé et largement incapable de se drainer pendant les secousses, il en résulte une réduction de la contrainte effective dans le sol et une perte de résistance et de raideur associée qui contribue à la déformation du dépôt de sol.[1]

L'augmentation de la pression interstitielle dans des conditions de charge non drainées est une caractéristique de tous les phénomènes de liquéfaction.[1]

*La liquéfaction se caractérise par la nature soudaine de leur origine, la rapidité avec laquelle elle se développe et la grande distance sur laquelle les matériaux liquéfiés se déplacent souvent.*

### 1.3 Les effets de la liquéfaction :

La liquéfaction des sols cause des dégâts souvent irréparables, tant à des ouvrages existants qu'à de nouvelles constructions, ainsi la liquéfaction peut provoquer :

- Le basculement d'immeuble.
- La rupture des culées des ponts.
- Le tassement des dépôts de sable, le déplacement latéral du terrain.

En illustrant ci-dessous, les exemples les plus importants des dommages qui ont été attribués à la liquéfaction et marqué par l'histoire.

### 1.3.1 Niigata, Japon (1964)

La ville de Niigata est située à l'estuaire des fleuves d'Agano et Shinano. Cet environnement géologique a engendré des dépôts de sables lâches avec une nappe phréatique peu profonde. Durant le séisme de Niigata, 1964, la liquéfaction a été observée dans les espaces près des rivières. Cette liquéfaction a été accompagnée par des sévères dommages dans plusieurs structures tels que les ponts, les bâtiments et les réseaux enterrés. Les séries de bâtiments d'appartements à Kawagishi-cho sont devenues très connues comme symbole des effets de la liquéfaction des sols(Figure 1.1).



FIGURE 1.1: Inclinaison des bâtiments d'appartements de Kawagishi-cho à Niigata au Japon dues à la liquéfaction .

Lorsque la liquéfaction s'est produite, l'épandage latérale du sol a causé le déplacement du sol sous le lit de la rivière de Shinano, imposant des pressions sur les pieux de fondation qui ont, par la suite, subit une déflexion et se sont déplacés et ont induit une rupture du tablier et l'effondrement du pont de Showa(Figure 1.2).



FIGURE 1.2: Rupture du pont de Showa, à Niigata au Japon, dues à l'épandage latéral dans le sol.

### 1.3.2 Moss Landing, Californie (1989)

Un autre exemple est illustré par la rupture routière de Moss Landing State Beach induite par la liquéfaction. Cette route a été construite à travers un estuaire qui a subi des dommages importants en raison de la liquéfaction, il a diminué plusieurs mètres pendant le séisme et par conséquent, il s'est séparé des sections adjacentes de la route. La section transversale exposée des sédiments (Figure 1.3b), montre clairement un sable de plage de couleur claire qui a été liquéfié.



(a) Rupture routière induite par la liquéfaction



(b) Section transversale des couche sols sous-jacents

FIGURE 1.3: Rupture routière induite par la liquéfaction, Moss Landing State Beach.[2]

### 1.3.3 Port d'Island, Kobe, Japon (1995)

Les installations portuaires sont souvent situées dans des zones susceptibles à la liquéfaction, d'ailleurs, plusieurs ont été endommagées par ce phénomène durant les séismes passés.

La plupart des ports ont des structures de soutènement majeurs, ou des murs de quai, pour permettre aux grands bateaux d'amarrer au bord des quais. Lorsque le sol derrière et/ou sous un tel mur se liquéfie, la pression qu'il exerce sur le mur peut augmenter énormément, suffisamment pour causer le glissement du mur et son inclinaison vers l'eau(Figure 1.4).



FIGURE 1.4: Séisme de Hyogo-ken Nanbu, Kobe, Japon, 1995.

Le terme de liquéfaction a été utilisé en conjonction avec une variété de phénomènes qui impliquent des déformations permanentes du sol comme l'ébullition de sable, un exemple de ce cas est le suivant.

### 1.3.4 Christchurch, New Zealand (2011)

Le séisme de Christchurch (2011) qui a frappé la région de Canterbury en New Zealand a provoqué des dommages étendus en particulier dans le centre-ville et les faubourgs de l'est, avec des dégâts aggravés aux infrastructures.



(a) Véhicule enlisé dans des ébullitions du sable, après le tremblement de terre à Christchurch, New Zealand (2011).



(b) Déformation du terrain dues à la liquéfaction, après le tremblement de terre à Christchurch, New Zealand (2011).

FIGURE 1.5: Exemple de l'ébullition de sable.

## 1.4 Conclusion

La liquéfaction des sols est un phénomène d'instabilité complexe et très dangereux, qui impliquent des déformations du sol causées par des chargements monotones, transitoires ou répétées dans des conditions non-drainé pour un sol saturé.

Comme on a vu dans ce chapitre, plusieurs exemples des dégâts irréversibles ont été induit par ce phénomène qui impliquent :

- Les fissurations au niveau de la surface du sol.
- Les déformations du sol et glissements du terrain : latérales ou verticales.
- Le bouleversement des structures et l'arrachement des fondations structurelles.

Dû aux graves conséquences et dégâts de ce phénomène, on était obligé de trouver des méthodes et des solutions pour le contrer. C'est bien l'objet de ce travail et le chapitre suivant, qui est les techniques de renforcement et l'amélioration des sols.

## Chapitre 02 :

# Les techniques d'amélioration du sol

# Chapitre 2

## Les techniques d'amélioration du sol

### 2.1 Introduction :

Les champs d'application des différentes techniques dépendent essentiellement de la nature et de la granulométrie des terrains que l'on désire améliorer.

Certaines des méthodes d'amélioration des sols les plus communes sont énumérées dans la figure 2.1, qui montre la gamme des tailles de grain du sol dans lesquelles les méthodes sont susceptibles d'être raisonnablement efficaces (Mitchell 2008). Bien qu'il soit approximatif dans son orientation, cette figure illustre que le premier critère est le choix d'une méthode d'amélioration du sol qui convient bien aux sols à traiter.

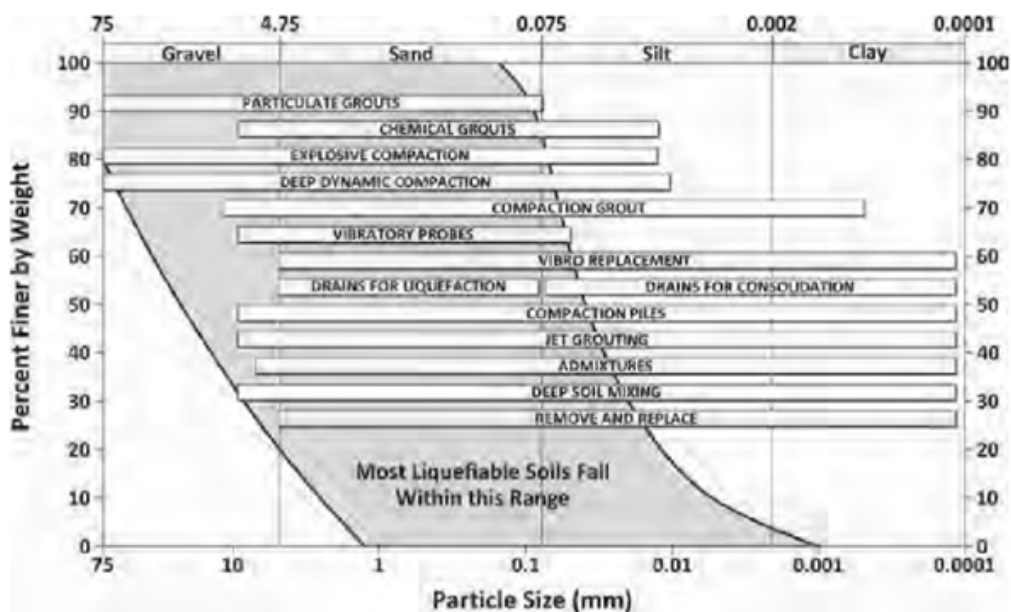


FIGURE 2.1: Résumé sur l'applicabilité générale des méthodes d'amélioration du sol pour les sols de diverses distributions granulométriques, Mitchell 2008.[7]

Ce chapitre décrit brièvement les méthodes les plus utilisées pour améliorer le sol afin de réduire les risques de liquéfaction.



## 2.2 Compactage dynamique

Cette méthode permet de traiter le sol en profondeur par des actions en surface du sol, en compactage dynamique profond, une grue lâche de manière méthodique et répétitive selon un maillage défini une grande masse d'une hauteur significative sur la surface du sol, comme le montre la figure 2.2.

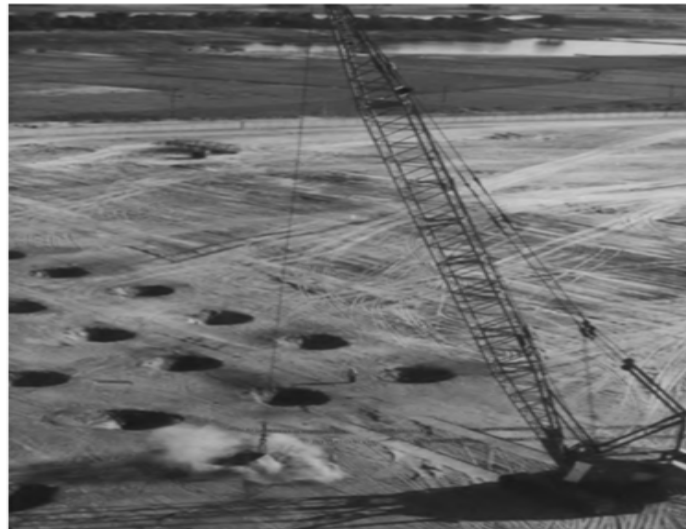


FIGURE 2.2: Compactage dynamique profond, en montrant le schéma des points d'impact primaire.[3]

Les grues à chenilles peuvent lâcher en chute libre des masses pesant jusqu'à 33 tonnes à partir de hauteurs allant jusqu'à 30 m, et les machines spécialement construites peuvent déposer des masses encore plus grandes. L'impact de ces masses sur la surface du sol produit un cratère dont la profondeur dépend de la résistance du sol en surface et de la propagation des puissantes ondes de stress dynamiques à travers les différentes couches du sol souterraines.



FIGURE 2.3: Exemple du site subissant une amélioration des sols par compactage dynamique.



FIGURE 2.4: Exemple d'un pilon.

Ces contraintes dynamiques peuvent être suffisamment grandes pour liquéfier ou, au moins, générer des pressions excessives d'eau des pores dans les sols sous le point d'impact. La dissipation de ces pressions excédentaires de l'eau interstitielle densifie le sol, augmente la pression latérale in-situ et améliore les caractéristiques géotechniques du terrain.

Par contre, Cette technique reste peu courante du fait de l'encombrement qu'occasionnent les appareils et le bruit engendré par les impacts. Cette méthode est utilisée surtout dans des surfaces importantes à l'écart d'habitations.

### 2.3 Drains verticaux :

Dans les dépôts des sols fins, les vitesses de consolidation sont en général faibles parce que l'eau interstitielle doit parcourir un long chemin pour sortir du massif du sol. Il s'ensuit que les tassements peuvent durer pendant longues périodes (plusieurs mois, années ou dizaines d'années, suivant les sites), ce qui est souvent inacceptable.

La mise en place de réseaux drainants qui consiste à fonder verticalement dans le terrain, suivant un maillage régulier, un drain préfabriqué dans le massif du sol pour réduire la distance que l'eau doit parcourir pour sortir du sol.



FIGURE 2.5: Chantier de réalisation des drains verticaux.

Les drains verticaux sont utilisés pour l'amélioration des sols fins saturés en eau. Lors de la mise en charge du terrain, les drains facilitent l'évacuation de l'excès de l'eau interstitielle jusqu'à la surface, permettant ainsi une consolidation accélérée des sols traités.

## 2.4 Inclusions :

Le renforcement par inclusions rigides est envisagé pour des ouvrages lorsque le sol est trop compressible pour supporter sans tassements importants l'ouvrage à construire. Les inclusions sont généralement verticales et disposées suivant un maillage régulier, elles doivent présenter des caractéristiques intrinsèques de déformation et de raideur, compatibles avec les terrains encaissants et les structures à porter.



FIGURE 2.6: Amélioration de sol par inclusion.

On caractérise le renforcement par inclusions rigides par la combinaison entre les inclusions qui assurent le renforcement et une plateforme de transfert assure la répartition de la charge, disposée entre le réseau d'inclusions et l'ouvrage.

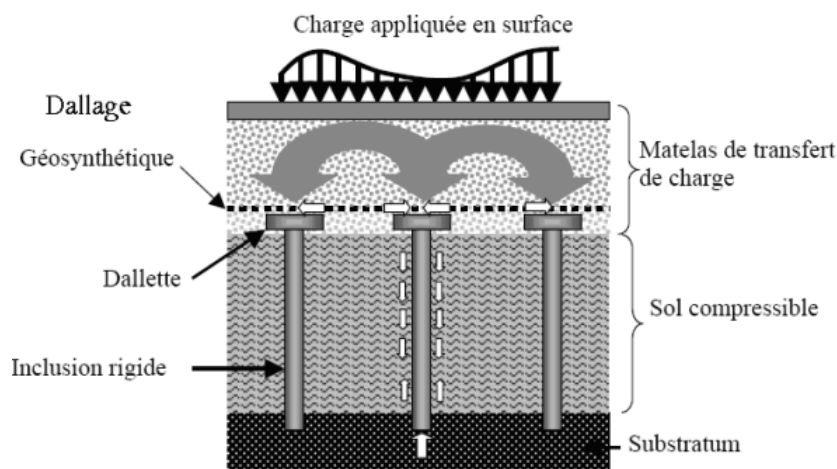


FIGURE 2.7: Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides d'après Berthelot et al. (2003)

Différents modes de mise en œuvre (forage avec ou sans refoulement, battage, vibration) et différents types de matériaux (ballast, gravier, etc...) sont utilisables pour permettre la réalisation à moindre coût. Ce procédé permet de réduire fortement les tassements sous les ouvrages.

### 2.4.1 Colonnes ballastées :

Les dépôts de sol peuvent être améliorés par l'inclusion de colonnes denses de gravier connues sous le nom de colonnes ballastées. En principe, les colonnes ballastées peuvent être mise en place pour tous types de sols.



FIGURE 2.8: Colonnes ballastées.[9]

Les colonnes ballastées peuvent être utilisées dans les sols à grain fin et à grain grossier, ils sont généralement utilisés pour augmenter la résistance au cisaillement sous les structures et les talus en accélérant la consolidation (en permettant un drainage radial) et en introduisant des colonnes de matériau plus résistant.

Pour l'atténuation des risques sismiques, ils sont couramment utilisés pour l'amélioration des dépôts de sol liquéfiables car elles servent également de drains et permettent une accélération du processus naturel de consolidation.

*Notre memoire traite en particulier l'amélioration du sol par la technique des colonnes ballastées qui sera expliquée en détail dans les chapitres suivants.*

## 2.5 Vibroflottation :

La vibroflottation, (parfois appelée vibrocompaction), s'applique essentiellement aux sols granulaires non cohérents, tels que sables et graviers. Les vibrations engendrent un phénomène temporaire de liquéfaction du sol environnant le vibreur qui met les grains du sol dans un état liquéfié et ensuite ils se réarrangent en un état plus dense.

Dans cette méthode une sonde vibrante (la vibroflot) suspendue par une grue pénètre de manière répétitive dans les sols liquéfiés afin de les densifier, dans cet état, les forces inter-granulaires sont quasiment annulées, et les grains sont réarrangés dans une configuration plus dense. La vibroflot, généralement de 30 à 46 cm de diamètre et d'environ 10 à 16 m de longueur, contiennent des poids montés excentricement sur un arbre central



entraîné par une alimentation électrique, ce qui est montré dans la figure 2.9.

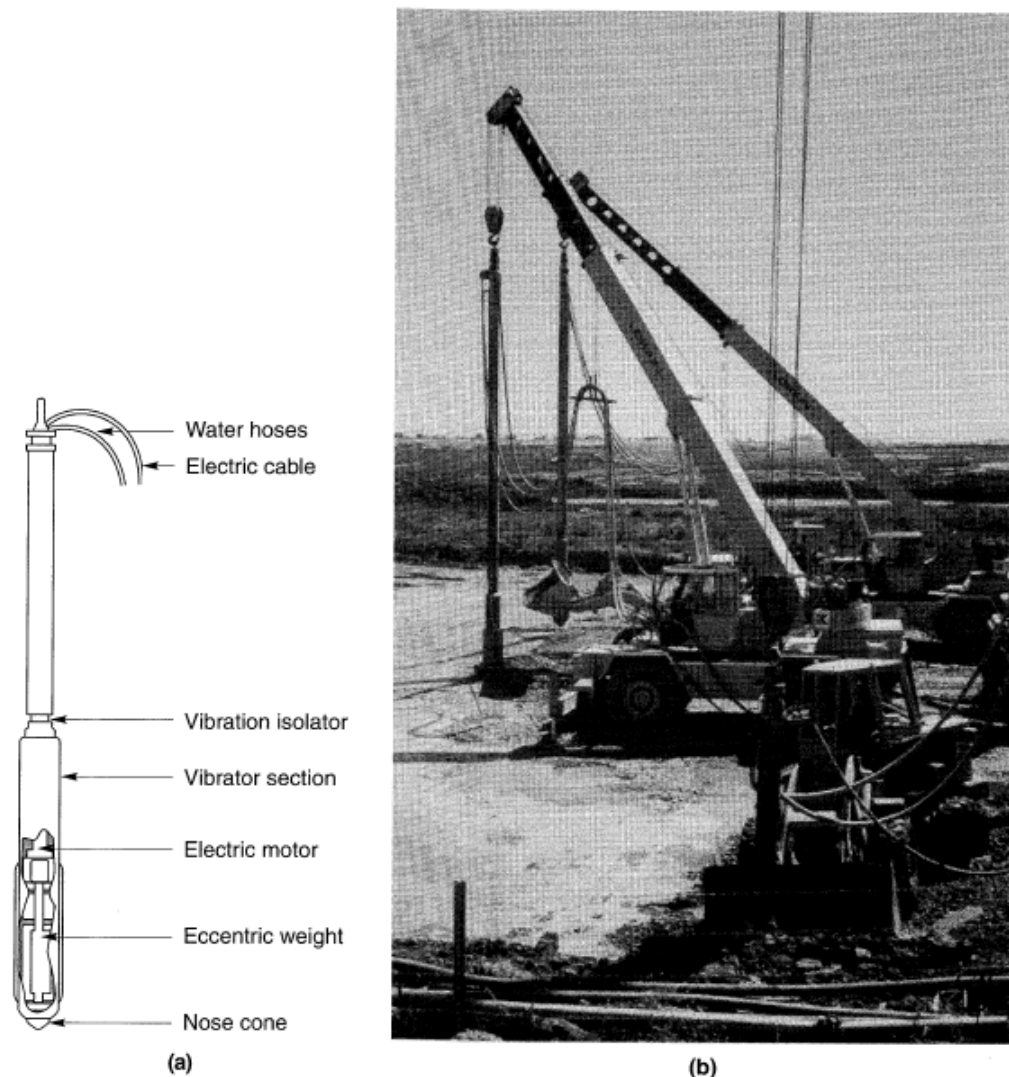


FIGURE 2.9: (a) Illustration schématique d'un vibroflot typique (après Bell, 1993), et (b) vibroflots pour densifier des sols susceptible à la liquéfaction dans une installation de traitement des eaux usées en Californie (photo courtoisie de Hayward Baker).

Il existe de nombreux types d'équipements et de procédures, connus sous divers noms génériques et exclusifs, par exemple : Mosely et Kirsch 2004, Kitazume 2005. La catégorisation la plus simple des méthodes est la suivante :[3]

- La tige vibrante : une vibration verticale est appliquée au sommet d'une sonde ou d'une tige pénétrante.
- La vibroflottation : un moteur à vibration horizontale est logé dans la pointe de la sonde pénétrante.

La sonde vibrante est initialement abaissée au fond du dépôt par une combinaison de vibrations, ensuite la retirer de manière incrémentale dans des intervalles de 60 à 90 cm à une vitesse globale d'environ 30 cm / min tout en vibrant. L'eau peut être jetée par des orifices dans la partie supérieure du vibroflot pour desserrer temporairement le sol au-dessus et aider à la retrait. Les vibrations produisent une zone localisée de liquéfaction temporaire qui fait que le sol entourant la vibroflot se densifie. Une dépression conique se

forme généralement à la surface du sol au-dessus de la sonde, cette dépression peut être remplie de matière granulaire (comme le sable ou le gravier) lorsque la vibroflot est retiré (Figure 2.10).



FIGURE 2.10: Le cône d'affaissement autour du vibreur

## 2.6 Le Jet Grouting :

Cette technique a été développée d'une part pour le renforcement des sols compressibles et d'autre part pour leur stabilisation. La réalisation d'une colonne de Jet Grouting passe par trois étapes :

1. Réalisation d'un forage par une colonne de tiges dotée d'une tête de perforation classique (tricône par exemple) et d'un dispositif de lançage.
2. Ouverture de la colonne de lançage, la colonne est équipée soit d'une buse (mono-jet), soit de deux ou trois buses d'injection (double ou triple jet).
3. Injection en remontant :
  - Dans la technique mono-jet : Un coulis de ciment à haute pression est injecté, le coulis assure à la fois la déstructuration du terrain et la consolidation par introduction du ciment.
  - Dans les techniques à double ou triple jets : le sol est d'abord déstructuré par une injection d'air ou d'un mélange air et eau avant d'être injecté séparément par du coulis à l'aide d'une buse située plus bas sur la colonne de forage (Figure 2.11).

Le diamètre de la colonne obtenue dépend de la nature du terrain, de la puissance du jet et des vitesses de remontée et de rotation ; il varie généralement entre 0,6 et 1,0 m. La résistance à la compression simple dépend de la qualité du ciment utilisé, du rapport C/E du coulis et de la nature du sol.



FIGURE 2.11: Différentes étapes de la réalisation d'une colonne de Jet Grouting

## 2.7 Injection solide :

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

Une technique éprouvée, économique et souple, elle permet en outre de réduire le potentiel de liquéfaction en cas de séisme et contrairement à d'autres, elle peut être utilisée sous des constructions existantes.



FIGURE 2.12: Amélioration de sol par injection solide.

## 2.8 Soil mixing :

La technique consiste en la réalisation de colonnes plus ou moins rigides en mélangeant, in-situ, un liant avec le terrain en place, généralement à base de ciment.

La déstructuration du terrain en place et le mélange sont effectués au moyen d'outils rotatifs qui assurent également un malaxage mécanique. Différentes configurations de lignes d'outils ont été développées permettant la réalisation de colonnes isolées, de panneaux, de blocs ou enfin des tranchées.[7]



FIGURE 2.13: Amélioration de sol par soil mixing.

Le malaxage se fait à l'aide de tarières creuses couplées et tournant en sens inverse. La réalisation d'une colonne passe par deux étapes : le forage et la remontée.

1. La phase de forage permet la déstructuration du terrain et l'incorporation du liant par les tiges creuses. Cette opération est réalisée pendant la descente de tarières. La rotation provoque un mouvement ascendant qui favorise le malaxage et l'homogénéisation du mélange.
2. Au cours de la phase de remontée, le sens de rotation est inversé, provoquant la circulation descendante des matériaux, qui, avec l'application simultanée d'une poussée verticale à l'aide de la machine de forage, assure un compactage du mélange.

Le liant peut être introduit sous forme pulvérulente ou sous la forme d'un coulis et son dosage permet d'obtenir une large gamme de résistance et donc de mieux adapter les caractéristiques du mélange aux caractéristiques du projet.



## 2.9 Conclusion :

Le but de toute amélioration est de conférer au sol de nouvelles caractéristiques, générales et/ou locales sous l'ouvrage à construire, afin que les différents éléments d'infrastructure ( Semelles isolées ou filantes, radiers, dallages... ) aient un comportement prévisible, justifiable et compatible avec les règlements et tolérances s'appliquant à la structure de l'ouvrage et à son exploitation.

Pour évaluer la pertinence d'une méthode d'amélioration du sol pour un site spécifique, il est important de :

1. Comprendre les mécanismes de base de la technique d'amélioration afin que les procédures de conception technique et les critères de contrôle de qualité ou de vérification soient fiables
2. Connaître les problèmes de construction afin que la méthode sélectionnée soit rentable.

L'objectif global des techniques d'amélioration du sol est de développer et sélectionner parmi ces options la solution la plus optimale afin que les avantages par rapport aux coûts reste toujours raisonnable.

**Chapitre 03 :**  
**Les colonnes ballastées**

# Chapitre 3

## Les colonnes ballastées

### 3.1 Introduction :

Nous avons exposé dans le chapitre précédent les techniques les plus utilisés en pratique pour l'amélioration des sols. Le problème majeur qui se trouve en face de l'ingénieur est : Quelle est la technique à choisir pour un projet donné ?

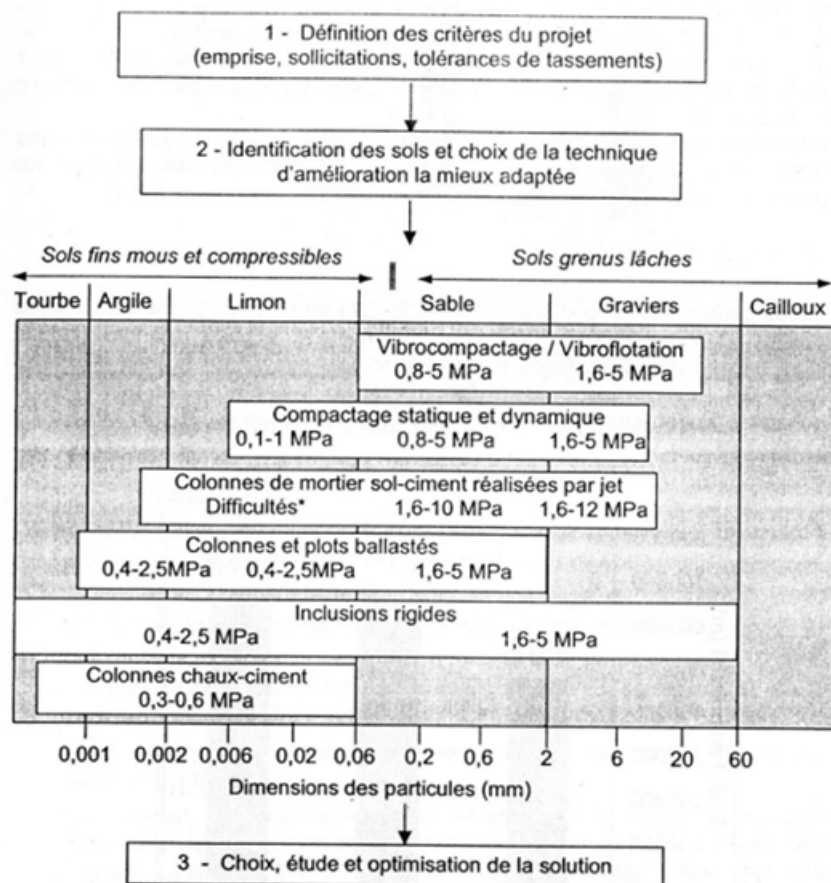


FIGURE 3.1: Diagramme explicatif du domaine d'application des différents procédés d'amélioration du sol en fonction de la nature du sol et les ouvrages projetés.

Ce chapitre présente une vue globale sur les colonnes ballastées : leur composition, leur domaine d'application, leur mise en œuvre et les paramètres de conception de base de cette technique.

## 3.2 Les colonnes ballastées :

La technique appropriée pour l'amélioration du sol sous les fondations est d'installer des colonnes ballastées verticales dans le sol. Les colonnes de ballastes sont essentiellement une méthode de renforcement du sol dans laquelle le sol doux et cohésif est remplacé à des points discrets par des pierres concassées (ballastes) compacté dans des trous verticaux.

### *Pourquoi les colonnes ballastées ?*

La technique des colonnes ballastées présente des caractéristiques mécaniques élevées et un fort caractère drainant sous les ouvrages à surcharge répartie (remblais, radiers, dallages. . .).

Les colonnes ballastées peuvent également être disposées en groupes sous les charges isolées (semelles de fondations) ou en files (Semelles filantes, murs de soutènement. . .), et dans ce cas elles permettent d'accroître la capacité portante du terrain.

## 3.3 Présentation :

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

La colonne est une inclusion composée seulement de matériaux granulaires, sans cohésion, compactés dans le sol encaissant. Le matériau d'apport constituant est souvent des graviers avec une granulométrie la plus homogène possible.

Les quatre principaux avantages d'une colonne ballastée sont :

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

## 3.4 Domaine d'application :

Une colonne ballastée est un procédé d'amélioration du sol : ce n'est ni un élément de fondation, ni une fondation profonde.

Le procédé est adapté pour traiter les sols présentant des caractéristiques mécaniques faibles à très faibles (sables limoneux, argiles, limons, remblais hétérogènes. . .), mais il doit être exclu dans les sols présentant un caractère évolutif (matériaux organiques. . .) dans lesquels l'étreinte latérale autour des colonnes n'est pas garantie à long terme.[10, 11]

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.

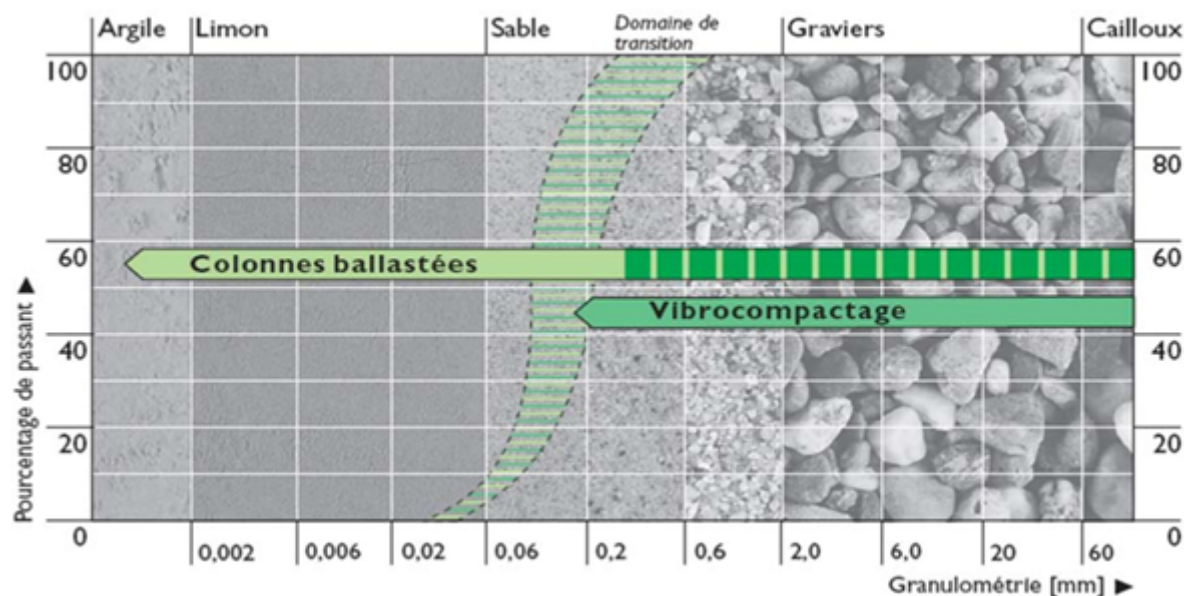


FIGURE 3.2: Domaines d'application des techniques de renforcement et d'amélioration du sol en fonction de la granulométrie du dépôt du sol in-situ.

#### *Application par types d'ouvrages :*

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

- Halls industriels.
- Bâtiments collectifs.
- Surfaces commerciale.
- Maisons individuelles.
- Silos et réservoirs de toute nature.
- Ouvrages hydrauliques étanches (réservoirs, stations d'épuration).

La fondation d'un ouvrage reposant sur un sol traité par colonnes ballastées est toujours de type superficiel : semelle filante ou isolée, radier, dallage. C'est la maîtrise du comportement de la fondation de ces ouvrages qui est recherchée et notamment le coefficient de réduction des tassements qui est généralement compris entre 1,5 et 4 sous charges réparties.[10]

#### *Application par zone sismique :*

Il est également possible d'utiliser les colonnes en zone sismique où elles peuvent contribuer à la diminution du potentiel de liquéfaction des sols, et à l'augmentation de résistance au cisaillement.[10]

#### *Limites du domaine d'application :*

Les colonnes ballastées sont réalisées dans les sols mous non organiques (argile, limon), dans les sables fins décomprimés et dans les remblais anthropiques inertes et qu'elles sont proscrites dans les sols organiques en raison de leur comportement évolutif dans le temps.

Le tableau 3.1 détaille des 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.

TABLE 3.1: Champ d'application des colonnes ballastées : Nature et résistance des sols (étreinte latérale).[7]

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

(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.

(2) 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.

*les colonnes ballastées de manière générale ne doivent pas être utilisées dans des terrains présentant des risques de perte dans le temps des caractéristiques volumétriques et/ou mécaniques.*

## 3.5 Méthodes et matériels :

### 3.5.1 Préforages :

- La traversée de couches compactes ou d'obstacles peut être facilitée par un forage préalable, avec ou sans extraction du terrain.
- Tout volume excavé ou remanié doit être comblé et compacté par le matériau de la colonne.

### 3.5.2 Matériaux d'apport :

*Matériaux constitutifs des colonnes :*

- Les matériaux d'apport doivent être de qualité et de granulométries contrôlées et les plus homogènes possibles, il peut être roulé ou concassé en fonction des disponibilités locales.
- Le fuseau granulométrique doit être choisi selon la fonction essentielle que l'on veut conférer à la colonne ballastée.
- Les caractéristiques minimales des matériaux d'apport sont les suivantes :
  1.  $LA < 35$
  2.  $MDE < 30$
  3.  $LA + MDE < 60$

LA : essai Los Angeles, norme NF EN 1097-2.

MDE : essai Micro Deval, norme NF EN 1097-1.

*Remarque : Les vibreurs avec alimentation en pied sont plus sensibles à La granulométrie qui dépend essentiellement du matériaux d'apport « une granulométrie inadaptée est source de bouchons dans le tube ».*[10, 11]

On peut retenir les valeurs indicatives suivantes :

- vibreur à 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  $80 \mu m$  est inférieur à 5%.

Les caractéristiques adoptées pour le ballast servant à la réalisation des colonnes ballastées dans la pratique courante sont résumées dans le tableau 3.2 :

TABLE 3.2: Caractéristiques du ballast pour colonnes ballastées.

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 ses de la norme NFP 18591 représente le passant inférieur à 5%.

### **Matériaux du matelas de répartition**

Le DTU 13.2 stipule que « 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 plate-forme de travail elle-même qui joue le rôle de couche de répartition ».

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 aussi les caractéristiques des colonnes ballastées (diamètre, maillage).

Il stipule enfin que l'épaisseur du matelas doit être d'au moins 0.4 m sous les charges réparties avec des entraxes entre colonnes d'au plus 3 m.

## **3.6 Mise en oeuvre :**

La mise en place des colonnes ballastées peut être réalisée selon deux méthodes :[10]

- la mise en place par voie humide :

Dite aussi la vibro-substitution (Vibro-replacement en anglais) 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 et les manœuvres des machines deviennent alors difficiles.

- la mise en place par voie sèche :

Consiste à remplacer l'injection d'eau par une injection d'air à forte pression dans le sol, le sol est refoulé pendant le fonçage à l'aide d'un tube vibreur, on appelle donc cette technique la vibro-refoulement (vibro-displacement en anglais). Cette méthode présente l'avantage de ne pas consommer d'eau et de ne pas avoir à évacuer de terres extraites et par conséquent c'est la technique la plus fréquemment employée.

*Le choix de l'outil, de ses caractéristiques et de la méthode de réalisation dépend étroitement de la nature et de l'état de saturation du sol, du but recherché et des caractéristiques des matériaux d'apport.*

*Il appartient à l'entreprise, en fonction de son savoir-faire et de son expérience, de choisir l'outil et le procédé le mieux adaptés dans chaque cas.*

### **3.6.1 La mise en œuvre par voie sèche :**

La mise en œuvre d'une colonne ballastée se déroule en 4 étapes :

#### **Préparation et remplissage :**

La machine est mise en station au-dessus du point de fonçage, et se stabilise sur ses vérins. Un chargeur à godet assure l'approvisionnement en agrégats. Le contenu de la benne est vidé dans le sas (Vibreux équipé d'un excentrique situé en pied) et après sa fermeture, l'air comprimé permet de maintenir un flux contenu de matériau jusqu'à l'orifice de sortie.



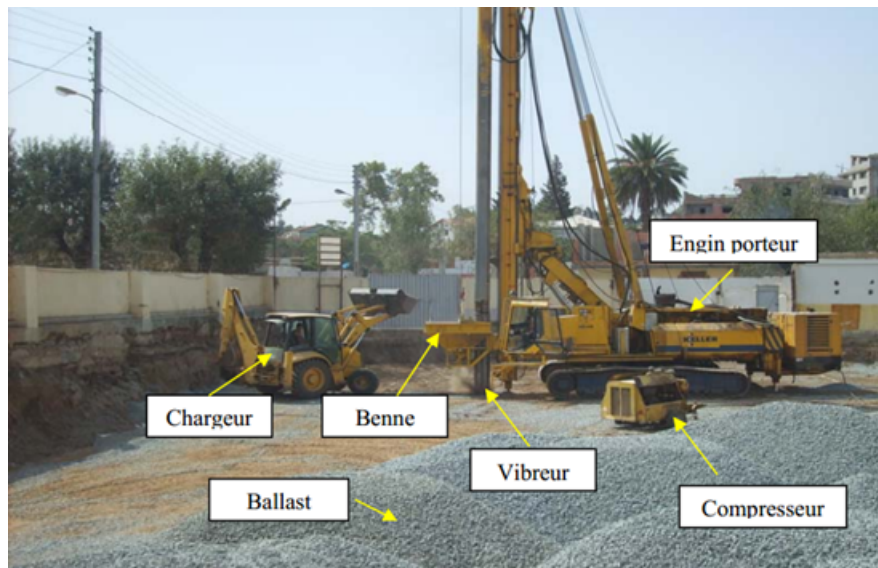


FIGURE 3.3: Exemple de mise en œuvre par voie sèche, (site : mosquée de Boudouaou)

### Fonçage :

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.

### Compactage :

Lorsque la profondeur finale est atteinte, le vibreur est légèrement remonté par passe de 50 cm environ et le matériau d'apport se met en place dans l'espace ainsi formé, puis 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 (Figure 3.5).

### Finition :

La colonne est exécutée ainsi, par passes successives, jusqu'au niveau prévu. 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.



FIGURE 3.4: Une colonne de ballast après la finition .

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.

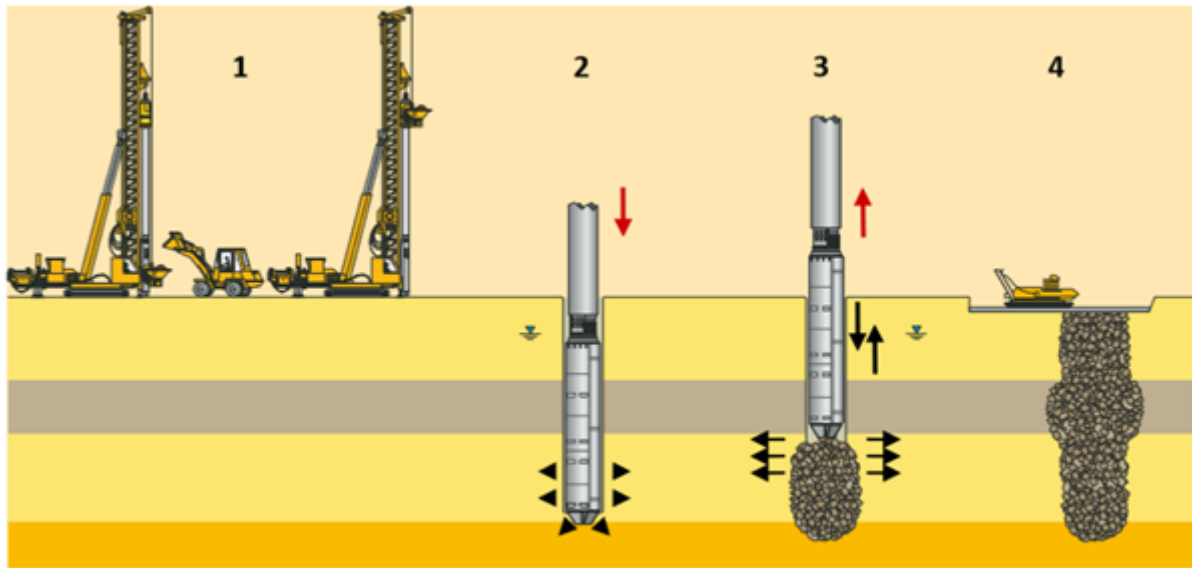


FIGURE 3.5: Etapes de mise en oeuvre des colonnes ballastées

### 3.6.2 La mise en œuvre 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.

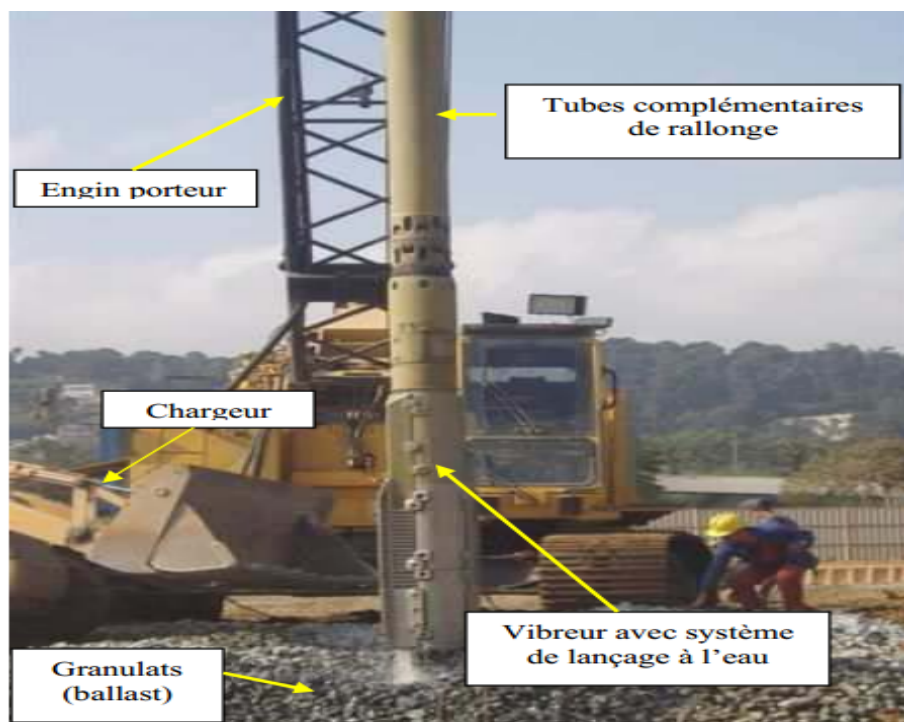


FIGURE 3.6: Exemple de mise en œuvre par voie humide.

On peut citer les étapes d'exécution suivantes :

- Mise en station de la grue : le vibreur est amené à la verticale du point centrale de la colonne implanté.
- 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 3.7)).



FIGURE 3.7: Phénomène de liquéfaction local (Site : barrage Kissir- Jijel).

Le vibreur descend dans le sol sous l'effet de son propre poids, la vitesse de descente est variable d'un sol à l'autre où elle est relativement rapide dans les sols sableux et limoneux par rapport aux terrains argileux.

- Lorsque la profondeur de traitement requise est atteinte (identifiée par l'enregistreur en temps réel), on remonte progressivement le vibreur pour bien nettoyer l'espace annulaire autour du vibreur.
- Les matériaux d'apport sont alors introduits dans le trou à l'aide d'un chargeur pendant que l'alimentation permanente en eau assure que les matériaux atteignent bien la base du vibreur.
- 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.

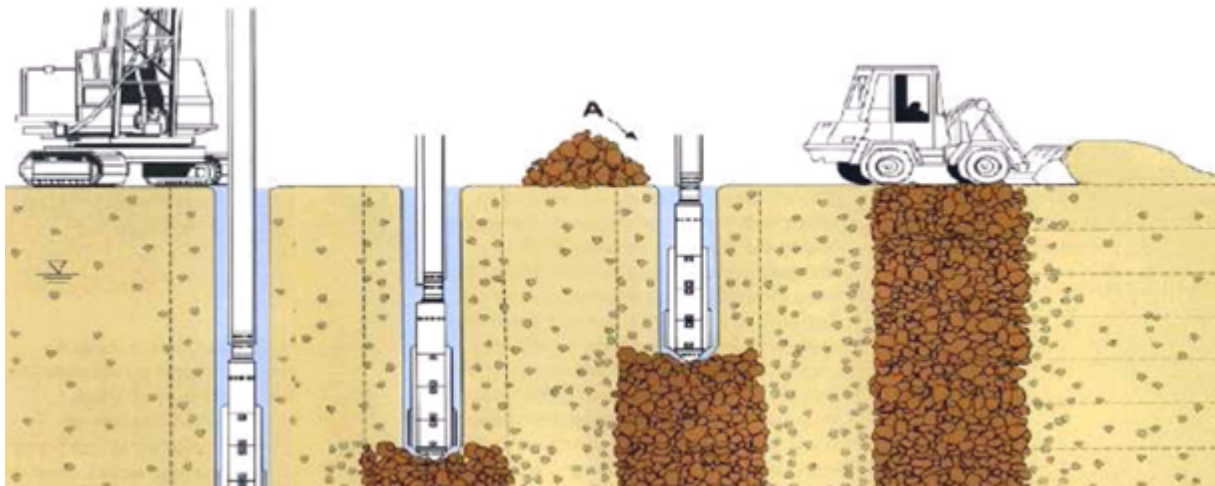


FIGURE 3.8: Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide.

### 3.7 Modèles de comportement d'un réseau de colonnes isolées sous charge statique verticale :

#### 3.7.1 Définition du réseau de colonnes ballastées :

En pratique, les colonnes ballastées sont généralement disposées :

- selon un maillage triangulaire.
- selon un maillage hexagonal.
- selon un maillage carré.

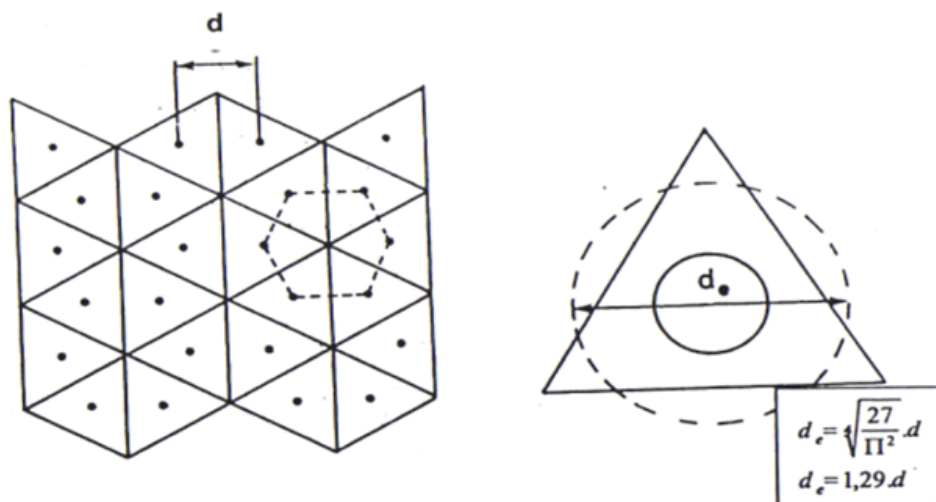


FIGURE 3.9: maille triangulaire.

Les colonnes en pierre doivent être installées de préférence dans un arrangement hexagonal (Figure 3.10) qui donne l'emballage le plus dense bien qu'un arrangement carré le quel également utilisé (Figure 3.11). [7, 8, 9]

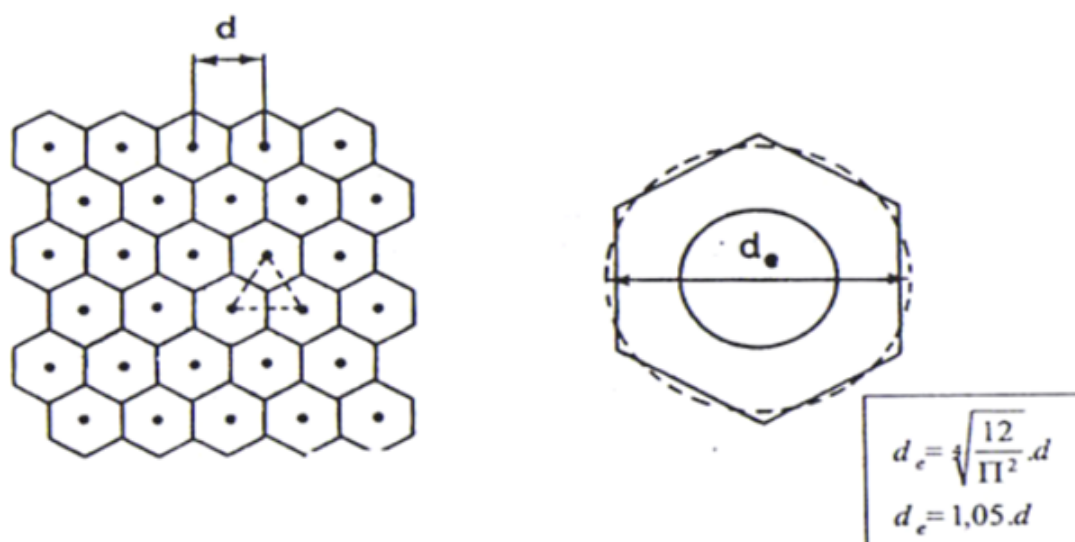


FIGURE 3.10: maille hexagonal.

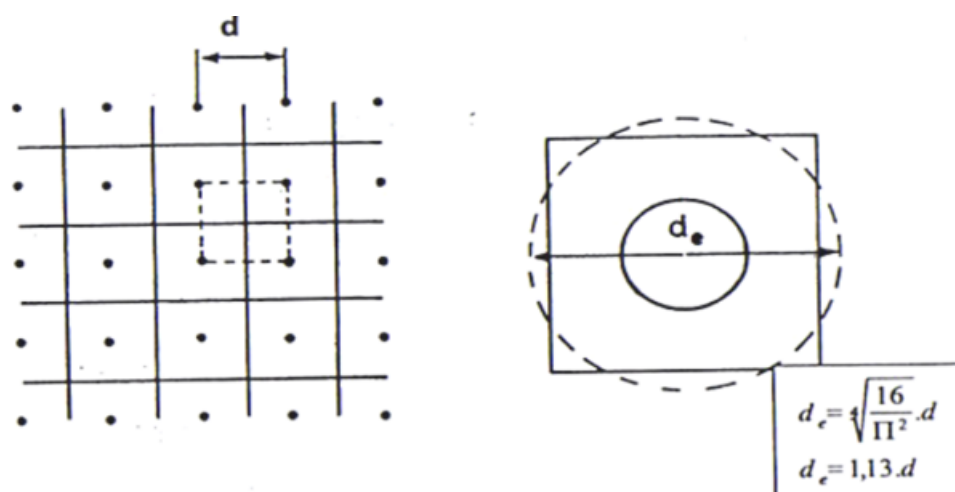


FIGURE 3.11: maille carré.

### 3.7.2 Diamètre équivalent :

Pour la commodité des calculs et afin de respecter les conditions réelles de colonnes sur chantier (Colonnes cylindriques), les zones d'influence des colonnes sont généralement réduites à des domaines cylindriques équivalents(Figure 3.12).[7, 8, 12]

Ainsi, pour un espacement d'entre colonnes, l'équivalence entre la section de la maille et le cylindre équivalent de diamètre ( $D_e$ ) conduit à :

pour un maillage triangulaire :  $D_e = 1.29 S$

pour un maillage hexagonale :  $D_e = 1.05 S$

pour un maillage carré :  $D_e = 1.13 S$

Avec :  $S$  = Espacement entre les colonnes ballastées.

Le cylindre équivalent résultant d'un sol composite avec un diamètre ( $D_e$ ) entourant le sol tributaire et une seule colonne est connu sous le nom de cellule unitaire.



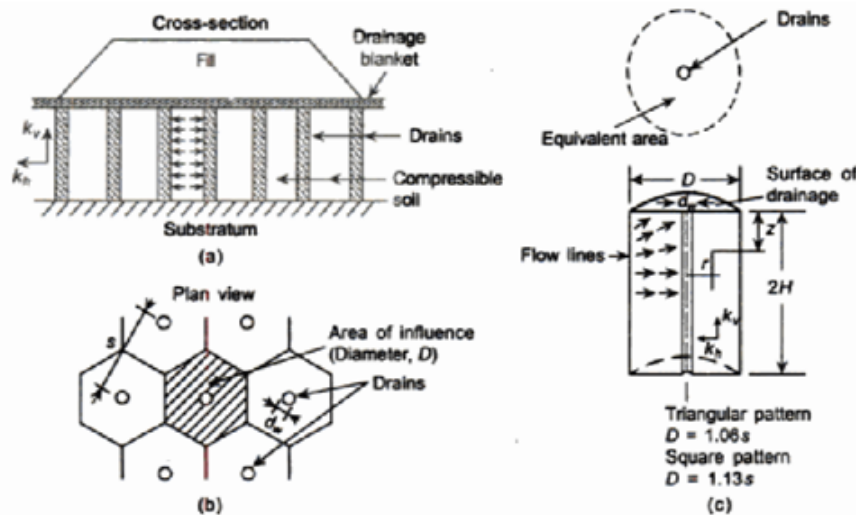


FIGURE 3.12: Réseau de colonnes ballastées : domaine d'influence de la colonne et caractéristiques des colonnes.

### 3.7.3 Profondeur de la colonne ballastée :

La colonne est installée sous les fondations jusqu'à la profondeur des strates compressibles dans la zone d'influence dans le sous-sol car elle seule supporte les charges verticales, les colonnes fonctionnent comme voie de drainage pour dissiper la pression excessive de l'eau des pores.

### 3.7.4 Rapport de remplacement ( $a_s$ ) :

Pour une analyse de la stabilité du tassement, le sol composite représentant une surface chargée infiniment large peut être modélisé comme une cellule unitaire comprenant la colonne et le sol tributaire. Pour quantifier la quantité de sol remplacée par la pierre, le terme rapport de remplacement  $a_s$  est donné par : [7, 8]

$$a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{A_s + A_g} \quad (3.1)$$

Avec :

$A_s$  = Aire de colonne ballastée.

$A_g$  = Aire du sol tributaire à la colonne.

$A$  = Aire totale de cellule unitaire.

Le rapport de remplacement de surface peut également être exprimé comme suit :

$$a_s = 0.907 \left( \frac{D}{S} \right)^2 \quad (3.2)$$

Où, la constante 0.907 est en fonction du maille utilisé qui, dans ce cas, est le hexagonale couramment utilisé.

### 3.8 Mode de rupture d'une colonne de ballast :

Les mécanismes de rupture d'une colonne ballastée isolée dans un massif du sol sous la charge axiale limite ( $\sigma_{clim}$ ) correspondent aux trois configurations schématiques de la figure 3.13 :

- Rupture par expansion latérale ( Critère souvent de dimensionnement).
- Rupture par poinçonnement ( Colonnes flottantes).
- Rupture par cisaillement généralisé ( Cas des colonnes courtes, rupture rare).

Le mécanisme de rupture d'une seule colonne chargée sur sa surface dépend de manière significative de la longueur de la colonne.

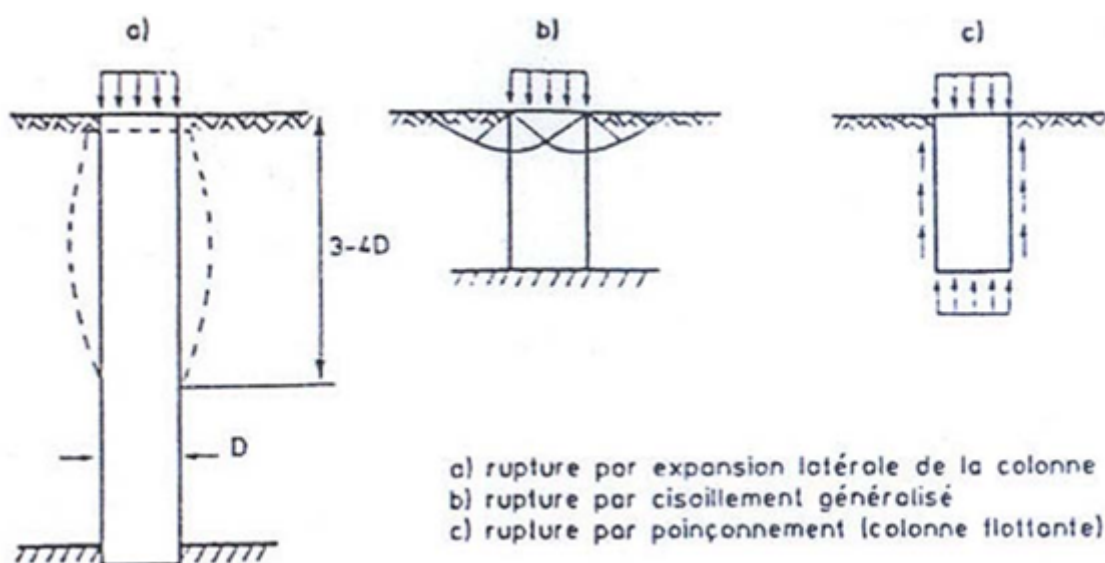


FIGURE 3.13: Mécanismes de rupture d'une colonne ballastée isolée.

#### 3.8.1 Rupture par expansion latérale :

L'analyse de la rupture par expansion latérale repose sur l'analogie entre la colonne ballastée et une éprouvette du même matériau granulaire soumise à une pression axiale due à la fondation et à une contrainte de confinement égale à la résistance latérale des couches du sol.

Si l'on admet que la colonne est en état de rupture triaxiale drainée (DTU 13.2) illustrée dans la figure 3.14, la contrainte verticale effective de rupture en tête de colonne ( $\sigma'_{clim}$ ) s'écrit :

$$\sigma'_{clim} = \sigma'_{hlim} \tan^2[\pi/4 + \varphi/2] \quad (3.3)$$

Avec :

$\varphi$  = Angle de frottement interne de ballast.  
 $\sigma'_{hlim}$  = Contrainte effective maximale du sol.

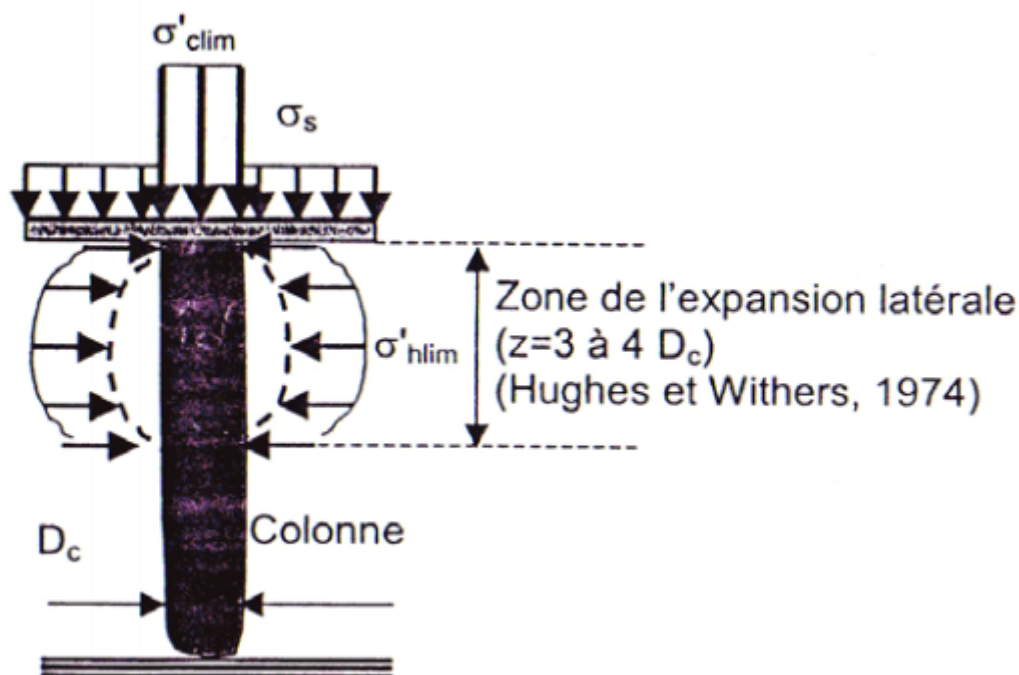


FIGURE 3.14: Rupture par expansion latérale d'une colonne ballastée isolée sous charge axiale en tête.[7]

La valeur de l'étreinte latérale résulte du rapport géotechnique, elle est déterminée à partir d'essais de laboratoire ( Essais triaxiaux) ou d'essais in situ ( Pressiomètre, pénétromètre statique, etc....).

Par analogie avec la sonde pressiométrique Ménard, l'étreinte latérale peut être exprimée sous la forme :

$$\sigma'_{hlim} = P_l - u \quad (3.4)$$

$P_l$  = Pression limite.

$u$  = Pression interstitielle à la périphérie de la colonne.

### 3.8.2 Rupture par poinçonnement du sol :

Pour les colonnes flottantes comme indiqué sur la figure 3.13(c), le poinçonnement a lieu lorsque la résistance du sol sous la pointe de la colonne ne peut pas équilibrer la contrainte verticale ( $\sigma_v(z)$ ) qui se transmet dans la colonne.[10]

### 3.8.3 Rupture par cisaillement généralisé :

Cependant, une colonne plus courte que la longueur critique est susceptible de rompre par une rupture par cisaillement généralisé (une rupture rare) si elle porte sur une base rigide et les caractéristiques de la colonne sont relativement proches de celles du sol (Figure 3.13(b)).[10]

« La rupture par cisaillement généralisé peut être étudiée lorsque les caractéristiques de la colonne sont relativement proches de celles du sol. Ce cas est peu fréquent (Soyez, 1985). »



## 3.9 Contrôle des colonnes ballastées :

### 3.9.1 Avant la réalisation :

On doit contrôler les matériaux qui arrivent sur chantier (Nature, granulométrie, etc...) en effectuant un certain nombre d'essais (analyse granulométrique, Los Angeles, Micro-Deval, etc....).

### 3.9.2 Pendant la réalisation :

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 :

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

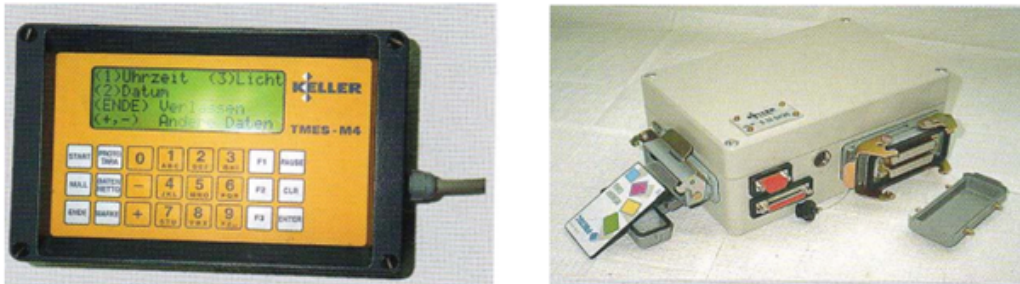


FIGURE 3.15: Clavier et unité centrale de l'appareil de mesure M4 (Document de Keller®)

Pour chaque colonne ballastée réalisée, un enregistrement 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 durée de réalisation d'une colonne.

### 3.9.3 Après la réalisation :

En plus des essais de chargement réalisés sur quelques colonnes, on peut mener des essais sur la tête des colonnes pour vérifier leur compacité et continuité comme : L'essai de pénétration au cône (CPT) et l'essai de pénétration standard (SPT).

### 3.10 Conclusion :

Le traitement des sols par colonnes ballastées consiste à incorporer dans le sol un matériau granulaire sans cohésion afin d'obtenir un milieu « composite » ayant des caractéristiques globales meilleures que le sol non traité.

Cette technique est réalisée pour traiter les problèmes de tassement des couches compressibles par :

1. la densification des sols in situ.
2. l'augmentation des pressions latéral in situ.
3. le renforcement de la masse du sol avec des colonnes plus rigides.
4. Augmentation du drainage d'excès de pressions d'eau des pores causées par les tremblement de terre des sols in situ.

Les colonnes de ballastes ont été largement utilisées car elle est le choix le plus efficace et économique dans de nombreuses situations, à condition que la répartition granulométrique des sols à améliorer se situe dans la gamme de cette technique.

Le rendement élevé des colonnes ballastées est bien adaptées aux traitements anti-liquéfaction des sols en apportant des effets combinés de drainage et d'amélioration de la résistance au cisaillement du sol renforcé.

## Chapitre 04 :

Dimensionnement des colonnes  
ballastées par la méthode de Priebe.

# Chapitre 4

## Dimensionnement des colonnes ballastées par la méthode de Priebe

### 4.1 Introduction :

La technique des colonnes ballastées consiste à réaliser des colonnes de grands diamètres en matériaux d'apport grenus au moyen de vibreurs spéciaux. En phase de conception, la capacité portante du milieu sol/colonnes ne peut être appréciée par des méthodes de dimensionnement simples, comme par exemple des sondages. Par contre, il est possible, en théorie, de comprendre de manière assez correcte le comportement d'un réseau de colonnes ballastées.

Ce chapitre décrit les bases de la méthode de dimensionnement des colonnes ballastées qui ont été développées et publiées il y a une quarantaine d'années par Heinz J. PRIEBE, 1976, à partir de bases théoriques d'essais de laboratoire sur modèles réduits afin de proposer des courbes empiriques concernant la capacité portante des colonnes et la réduction des tassements apportés par celle-ci.

Cette méthode est fiable et peut être adaptée, grâce à la prise en compte séparée des différents paramètres. Il est possible aussi de l'appliquer, en pratique, a tous les cas.

### 4.2 Principe de base :

Il convient de noter que la méthode de dimensionnement présentée ici ne se rapporte qu'à l'effet d'amélioration engendré par la mise en place des colonnes ballastées dans le sol de fondation, dont on admet que les caractéristiques propres demeurent inchangées après traitement.

Pour cela, la méthode consiste d'abord à déterminer une valeur ou plutôt un facteur d'amélioration du sol après réalisation des colonnes ballastées. C'est par ce facteur que, par exemple, le module d'élasticité du sol non traité s'améliore, ou inversement que diminue le tassement estimé dans le sol avant traitement. Et par la suite, toutes les étapes ultérieures de dimensionnement présentées dans cette méthode se réfèrent à cette valeur.[12]

### 4.3 Hypothèses simplificatrices :

Le système sol/colonnes est relativement complexe et ne peut être précisément traité par le calcul que dans le cas d'une charge infinie sur un maillage infini de colonnes ballastées. La résolution de ce cas limite passe par l'introduction de l'hypothèse d'une maille unitaire, composée d'une colonne ballastée de section  $A_c$  et du sol environnant de section totale  $A$  (Principe de la cellule unitaire).

Par ailleurs, on introduit les hypothèses (les conditions idéales) suivantes :

- Le sol situé sous la base de la colonne ballastée est incompressible,
- Le matériau d'apport est intrinsèquement incompressible,
- Le poids volumique de la colonne et du sol peut être négligé.
- Le pied de la colonne ne peut s'enfoncer et un tassement de la surface ne peut être que la conséquence d'une déformation radiale de la colonne ballastée, constante sur toute la hauteur de la colonne.

L'amélioration du sol obtenue dans ces conditions grâce à la présence des colonnes ballastées est ensuite calculée en partant de l'hypothèse que, dès le départ, les colonnes ballastées subissent des déformations selon des plans de cisaillement bien déterminés, alors que le sol environnant a un comportement élastique. Par ailleurs, pendant la réalisation de la colonne ballastée, le sol est déjà comprimé à tel point qu'au départ son contrainte latérale qui correspond à la pression des terres sous-jacentes, ce qui définit un facteur de pression des terres  $K=1$ . [12]

### 4.4 Facteur d'amélioration :

Avec les hypothèses précédentes, le facteur initial d'amélioration  $n_0$  est exprimé par :

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \left( \frac{0.5 + f(v_s, A_c/A)}{K_a f(v_s, A_c/A)} - 1 \right) \quad (4.1)$$

où

$$f(v_s, A_c/A) = \frac{(1 - v_s)(1 - A_c/A)}{1 - 2v_s + A_c/A} \quad (4.2)$$

et

$$K_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_c}{2}\right) \quad (4.3)$$

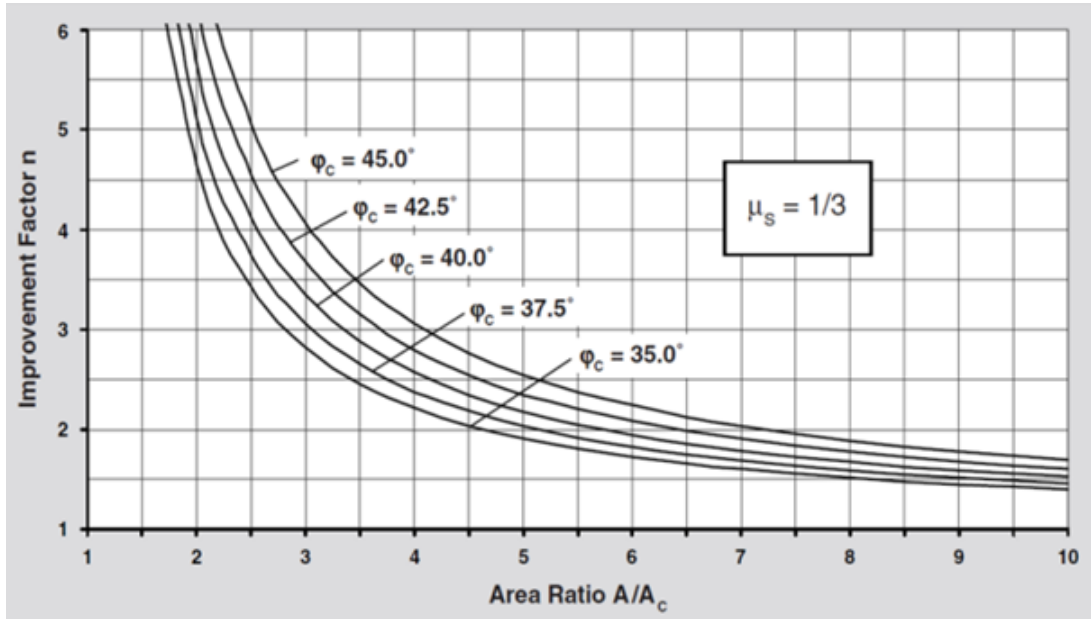
A court terme d'événement sismique, il paraît plus réaliste de considérer la déformation du sol sous un volume constant, à calculer avec  $\nu_s = 1/3$  valeur couramment utilisée dans la pratique pour calculer l'état final qui simplifie la formule du facteur d'amélioration  $n_0$  et le résultat s'exprime par :

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \left[ \frac{5 - A_c/A}{4K_{ac}(1 - A_c/A)} \right] \quad (4.4)$$

et

$$K_{ac} = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi_c}{2}\right) \quad (4.5)$$

La relation entre le facteur d'amélioration  $n_0$ , le rapport des surfaces  $A_c/A$  et la valeur de l'angle de frottement interne du matériau d'apport ( $\phi_c$ ) introduite dans la formule (4.4), conduit aux courbes représentées sur la figure 4.1 :


 FIGURE 4.1: Facteur d'amélioration ( $n_0$ ) en fonction du rapport des sections ( $A/A_c$ ).

## 4.5 Prise en compte de la compressibilité du matériau constitutif de la colonne ballastée :

Les matériaux de la colonne ballastée, même bien compactes, restent légèrement compressibles. De ce fait, le tassement qui se produit lors du chargement de la colonne n'est pas donc exclusivement à sa déformation radiale de la colonne.

Le facteur d'amélioration effectif ne peut en aucun cas augmenter jusqu'à l'infini, comme pour la valeur théorique calculée pour une substitution totale par un matériau incompressible, ou le rapport des surfaces devient  $A/A_c = 1$ . Au mieux, ce facteur est fonction du rapport des modules de déformation du matériau compacte de la colonne ballastée et du sol ambiant.

Comme pour la colonne ballastée, il est ici fait référence pour le sol à un module de déformation qui serait déterminé au moyen d'un œdomètre de grandes dimensions. Malheureusement, on continue toujours à faire des sondages dans les colonnes ballastées et à tirer des conclusions erronées à partir de résultats souvent très approximatifs.

D'une manière approchée, on peut prendre en compte la compressibilité du matériau de la colonne ballastée au moyen d'un facteur d'amélioration réduit  $n_1$ , que l'on détermine par une relation analogue à l'équation (4.4), en ajoutant au rapport inverse effectif des surfaces  $A_c/A$  le facteur correctif fictif ( $\Delta(A/A_c)$ ) :

$$n_1 = 1 + \frac{A_c}{A} \left[ \frac{0.5 + f(v_s, \bar{A}_c/A)}{K_{acf}(v_s, A_c/A)} - 1 \right] \quad (4.6)$$

Où :

$$\frac{\bar{A}_c}{A} = \frac{1}{A/A_c + \Delta(A/A_c)} \quad (4.7)$$

Avec :

$$\Delta(A/A_c) = \frac{1}{(A_c/A)_1} - 1 \quad (4.8)$$

Le facteur correctif fictif  $\Delta(A/A_c)$  peut être déterminée directement à partir des abaques de la figure 4.2 en fonction des rapports des modules des colonnes et du sol ( $E_c/E_s$ ).

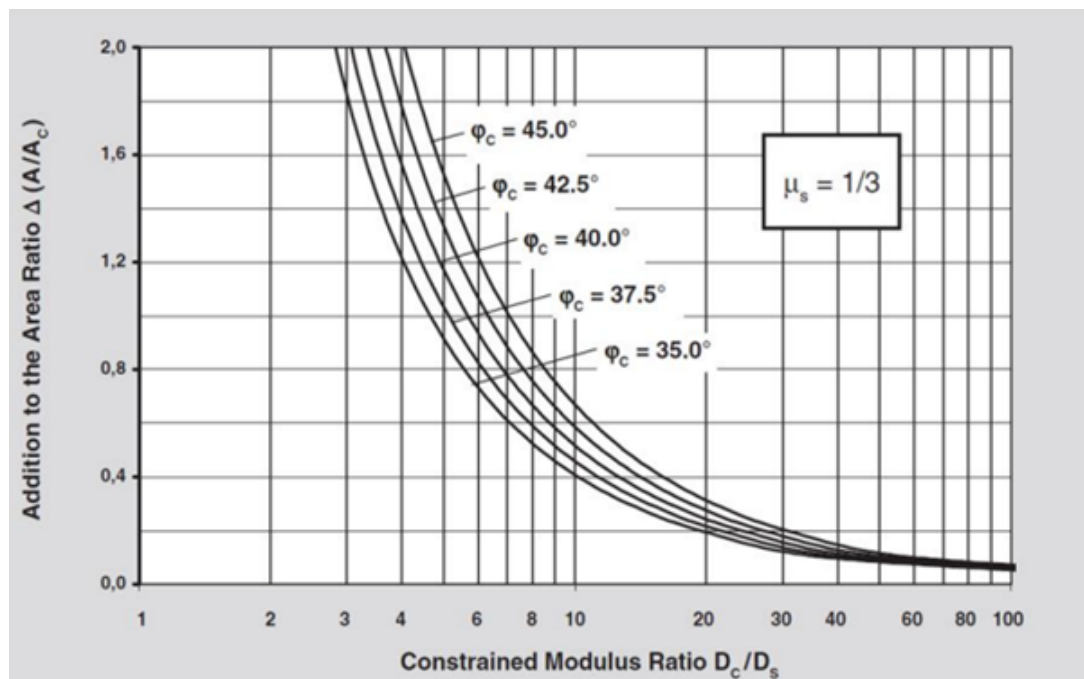


FIGURE 4.2: Prise en compte de la compressibilité du matériau de la colonne ballastée.

## 4.6 Prise en compte du poids des terres sus-jacentes :

L'hypothèse consistant à négliger les poids volumiques du sol et de la colonne ballastée signifie que la différence de contrainte initiale conduisant à la déformation radiale de la colonne ballastée ne résulte que de la répartition de la contrainte sous la fondation ( $q$ ) entre la colonne et le sol, et que cette différence est constante sur toute la hauteur de la colonne. Mais s'ajoutent aux charges extérieures les poids propres respectifs croissant avec la profondeur de la colonne ( $P_c$ ) et du sol ( $P_s$ ), qui peuvent d'ailleurs être bien supérieurs aux surcharges extérieures.

En prenant en compte ces charges supplémentaires, on constate que la différence de contraintes initiale diminue de manière asymptotique avec la profondeur et que la déformation radiale de la colonne ballastée diminue en conséquence.

On peut aussi dire, d'une autre manière, que, lorsque la contrainte due au poids des terres sus-jacentes augmente, l'étreinte latérale de la colonne ballastée croît aussi, et la colonne ballastée peut en conséquence reprendre une charge plus importante.

La relation entre la différence de contrainte et le facteur d'amélioration est de type linéaire. On peut donc déterminer un facteur de profondeur ( $f_z$ ) qui est le rapport de la différence de contraintes initiale à la contrainte calculée à la profondeur considérée, soit :

$$f_z = \frac{1}{1 + \frac{K_{0c} - p_s/p_c p_c}{K_{0c} q_c}} \quad (4.9)$$

Ce qui permet de déterminer un facteur d'amélioration final ( $n_2$ ) prenant en compte le poids des terres et exprimé par :

$$n_2 = f_z * n_1 \quad (4.10)$$

Par exemple, à la profondeur ou la différence de contraintes est de 50 % de la valeur initiale, le facteur de profondeur ( $f_z$ ) est de 2.

La valeur de ( $f_z$ ) peut être calculée de manière approchée en admettant une diminution linéaire de la différence des contraintes, ainsi qu'il résulte :

$$f_z = \frac{1}{1 + \frac{K_{ac} - 1}{K_{ac}} \frac{(\gamma_s \Delta z)}{q_c}} \quad (4.11)$$

Par souci de simplification, les abaques de la figure 4.3 tiennent compte d'un poids volumique identique pour la colonne ballastée et pour le sol. Il est recommandé alors de prendre dans les calculs le poids volumique du sol  $\gamma_s$ , qui constitue la valeur la plus faible et permet de se situer de la cote de la sécurité.

Ou encore :

$$f_z = \frac{1}{1 - y \frac{(\gamma_s \Delta z)}{q}} \quad (4.12)$$

Relation dans laquelle le coefficient d'influence de la profondeur ( $y$ ) peut être déterminé à partir de l'abaque de la figure 4.3.

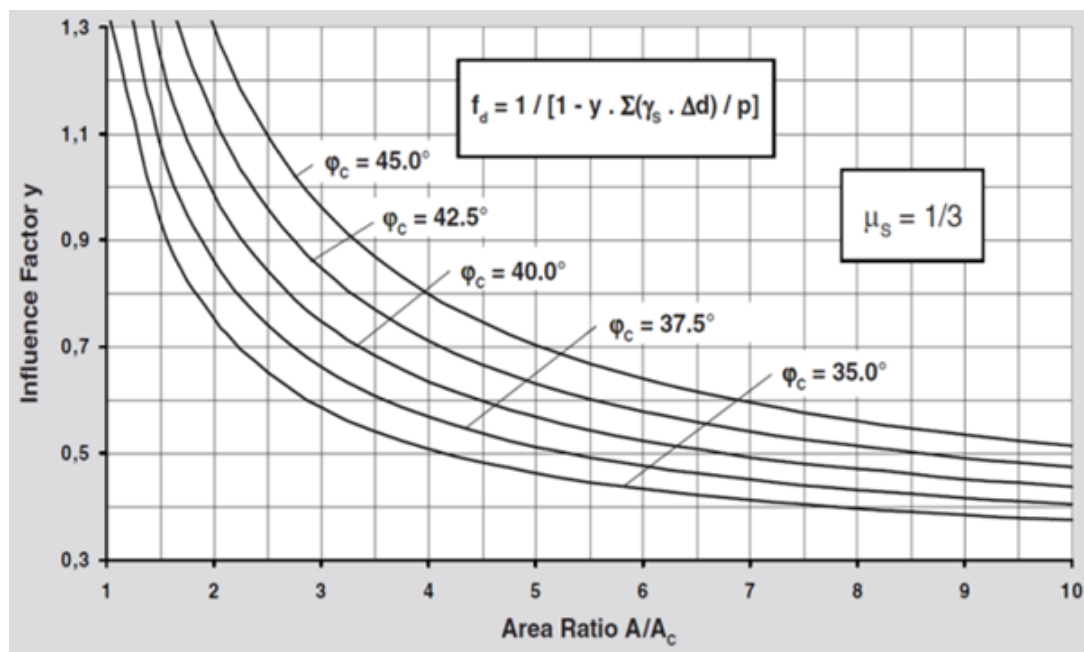


FIGURE 4.3: Détermination du facteur de profondeur.

## 4.7 Détermination de la résistance au cisaillement :

Alors que, sous une sollicitation de cisaillement, des éléments plus rigides se rompent probablement les uns après les autres, les colonnes ballastées se déforment jusqu'à ce



qu'une partie de la contrainte de cisaillement soit transférée à la colonne ballastée voisine. Par exemple, une rupture circulaire ne pourra se produire que si la capacité portante totale d'un groupe de colonnes ballastées est dépassée. Les colonnes ballastées reprennent dans ce cas une plus grande part de charge représentée par le coefficient de proportionnalité ( $m$ ), qui dépend du rapport des surfaces corrigé  $A_c/A$  et du facteur d'amélioration  $n$ , soit :

$$m = \frac{n - 1 + A_c/A}{n} \quad (4.13)$$

Dans la présente méthode, par souci de simplification, la réduction du volume du sol due à la déformation radiale de la colonne ballastée n'est pas prise en compte. En particulier, dans le cas où la section des colonnes ballastées est importante dans le rapport des surfaces, le terrain reprend une charge plus importante que celle évaluée par le calcul afin de ne pas surestimer la résistance au cisaillement due à la présence des colonnes ballastées et préalablement calculée en fonction de la charge appliquée sur la colonne ballastée et sur le sol, il convient de réduire le coefficient de proportionnalité de la charge supportée par les colonnes ballastées. On peut pour cela proposer le calcul approche de  $m'$  par la relation suivante :

$$m' = \frac{n - 1}{n} \quad (4.14)$$

L'abaque de la figure 4.4 représente, en trait plein, le facteur de proportionnalité de charge ( $m'$ ) et, en pointilles, le facteur non corrigé ( $m$ ).

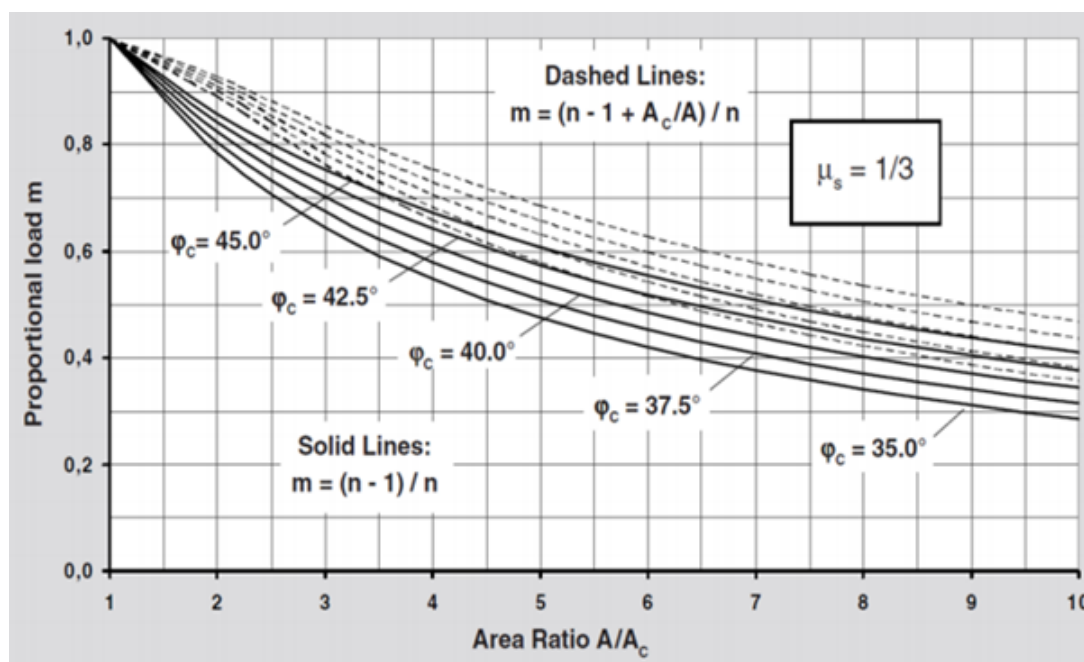


FIGURE 4.4: Coefficients de proportionnalité ( $m$ ) et ( $m'$ ) de la charge reprise par les colonnes ballastées en fonction des rapports de surface.

## 4.8 Paramètres du sol :

### 4.8.1 Angle de frottement :

En fonction de la part de la charge totale reprise respectivement par le sol et par les colonnes ballastées, on peut déterminer à partir des angles de frottement internes respectifs de la colonne et du sol la résistance au cisaillement équivalente pour le milieu sol/colonne ballastée, la relation proposée est la suivante :

$$\tan \phi = m' \tan \phi_c + (1 - m') \tan \phi_s \quad (4.15)$$

### 4.8.2 Cohesion :

La cohésion équivalente de l'ensemble sol/colonnes est exprimée en fonction du rapport des surfaces par la relation :

$$c = \left(1 - \frac{\bar{A}_c}{A}\right) c_s \quad (4.16)$$

## 4.9 Tassements de semelles filantes et isolées :

Le dimensionnement des colonnes ballastées pour une semelle filante ou isolée par une méthode directe n'est pas encore possible. Mais, une approche de dimensionnement peut être obtenue à partir du cas limite d'une surface chargée infiniment sur un maillage infini.

Le tassement total ( $w$ ), pour le cas limite dans des conditions homogènes, est très simple à déterminer à partir de la description ci-dessus, soit :

$$w = q \frac{z}{E_s n_2} \quad (4.17)$$

A partir de cette valeur et à l'aide des abaques des figures : 4.5 et 4.6, on peut déterminer le tassement de semelles isolées ou filantes reposant sur des groupes de colonnes ballastées.

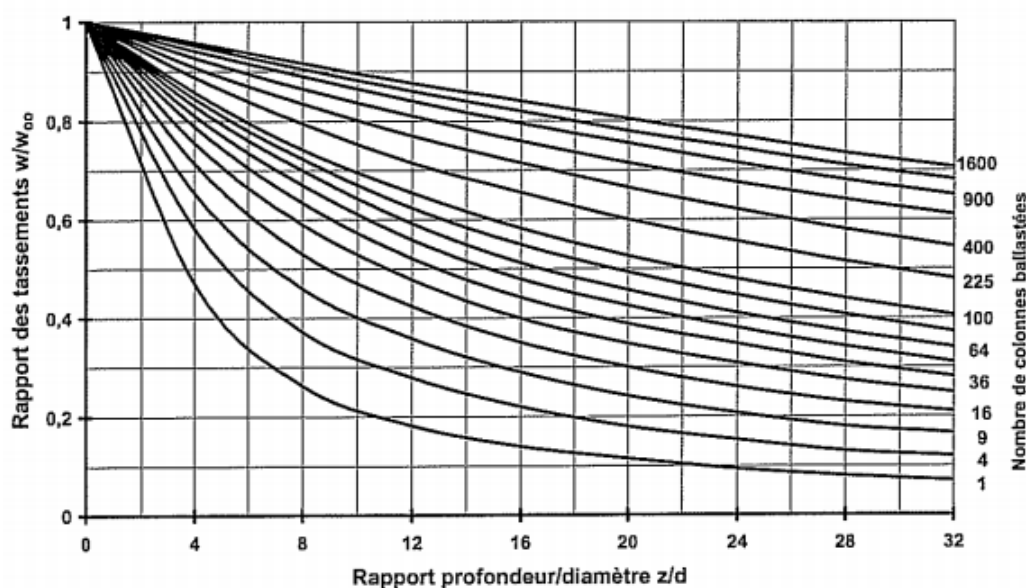


FIGURE 4.5: Tassements des semelles isolées.

Ces abaques, où le diamètre de la colonne ballastée ( $D_c$ ) est l'un des paramètres caractéristiques, ont été développés à travers une multitude de calculs, en tenant compte d'une part de la diffusion de la contrainte et, d'autre part, d'une capacité portante réduite pour les colonnes de rive de chaque groupe considéré.

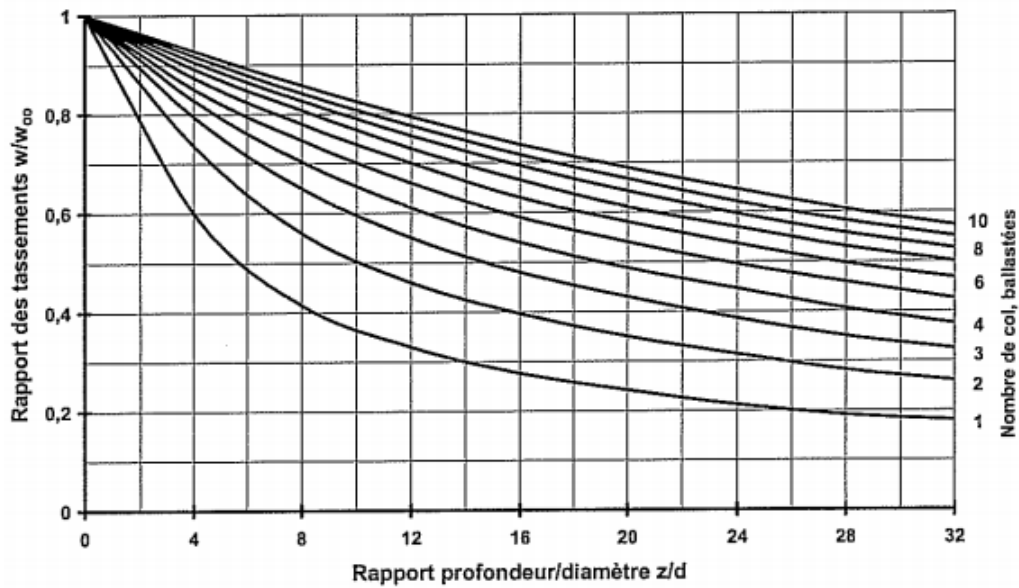


FIGURE 4.6: Tassements des semelles filantes.

## **4.10 Conclusion :**

Dans ce chapitre, l'objectif était d'expliquer les différents paramètres qui interviennent dans le dimensionnement des colonnes ballastées par la méthode de Priebe.

La mise en œuvre du procédé des colonnes ballastées, introduit à la fin des années 1950, ne s'est appuyée pendant longtemps que sur l'expérience des entreprises qui le réalisaient. Ce n'est qu'au milieu des années 1970 qu'ont été jetées les premières bases du calcul et les fondements de la méthode de dimensionnement décrite ci-avant datent de cette époque.

Cette approche consiste à déterminer un facteur d'amélioration du sol, et par la suite, toutes les étapes ultérieures de dimensionnement présentées dans cette méthode se réfèrent à cette valeur.

les bases de la méthode de dimensionnement des colonnes ballastées qui ont été développées par Heinz J. PRIEBE a apporté les preuves de son efficacité par rapport à la complexité du problème posé, elle présente les avantages d'une relative simplicité d'utilisation, et de couvrir complètement tous les cas pratiques rencontrés.

# Conclusion Générale

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 géo-mécaniques. Parmi ces techniques : Les colonnes ballastées connues pour leur aptitude à la déformation de façon considérable sous l'action d'un chargement.

L'amélioration de sols par colonnes ballastées est une technique de fondation particulièrement bien adaptée aux zones sismiques car elles offrent au sol d'assise une certaine souplesse, d'une part, et éliminent le risque de liquéfaction des sols d'autre part.

L'effet stabilisateur repose sur la résistance au cisaillement des colonnes ballastées, qui reprennent une grande partie des surcharges que du poids propre du sol, aussi sur leur aptitude à dissiper instantanément ; du moins dans leur environnement immédiat ; les pressions interstitielles, ce qui maintient la capacité portante de la colonne ballastée en conservant l'étreinte latérale et empêche la migration de fines dans les vides intérieurs de la colonne.

Le renforcement par colonnes de ballastes permet d'atteindre généralement les buts suivants :

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

Le développement de la technique des colonnes ballastées est lié aux performances du procédé, qui allie rapidité d'exécution et, par conséquent, le coût de revient sera relativement bas, et pour les colonnes mises en œuvre par voie sèche, propreté du site qui facilite largement la coordination des travaux sur site entre divers corps d'état.

# Bibliographie

- [1] R. W. Boulanger I. M. IDRIS. *Soil liquefaction during earthquakes*. Second monograph series, Engineering monographs on miscellaneous earthquake engineering topics, MNO-12. Earthquake engineering research institute (EERI), 2008. ISBN : 978-1-932884-36-4.
- [2] K. KUMAR. *Basic geotechnical earthquake engineering*. New age international, 2008. ISBN : 978-81-224-2620-5.
- [3] S. L. KRAMER. *Geotechnical earthquake engineering*. 1<sup>st</sup>. International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics. Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey, 1996. ISBN : 0-13-374943-6.
- [4] K. Been M. JEFFERIES. *Soil liquefaction, A critical state approach*. Taylor Francis e-Library, 2006. ISBN : 0-419-16170-8.
- [5] T. Arakawa IWASAKI T. Kimata et K. TOKIDA. « Estimation procedure of liquefaction potential and its application to earthquake resistant design ». In : 651 (1983), p. 239.
- [6] Jagabandhu DIXIT, DM DEWAIKAR et JANGID. « Assessment of liquefaction potential index for Mumbai city ». In : *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12.9 (2012), p. 2759–2768.
- [7] I. ZIGHMI. « Etude numérique de l'influence des paramètres géotechniques sur le comportement des sols renforcés par colonnes ballastées ». Mém.de mast. Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou, 2011.
- [8] S. PATHARIYA. « Stone column: theory applications ». Mém.de mast. Dharmsinh Desai University, India, 2010.
- [9] A. MANTELIER. « Etude et conduite de travaux en renforcement de sol ». Mém.de mast. Ecole d'ingénieurs de l'Université Grenoble Alpes (UGA), 2010.
- [10] French STANDARD. « Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et ouvrages sensibles au tassement ». In : *Revue Française de Géotechnique* 111 (2005), p. 3–16.
- [11] AFNOR DTU. « 13.2 (1992) ». In : *Foundations Profondes pour le Bâtiment* (), p. 11–212.
- [12] H.J PRIEBE. « The design of vibro replacement ». In : *Ground engineering* 28.10 (1995), p. 31.