République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Dr. Yahia Farès de MEDEA

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie de la Matière

Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de master II

Option : géotechnique

Thème

Analyse du comportement d'une colonne ballastée par logiciel PLAXIS

Encadré par :

Dr. AMAR BOUZID

Présenté par :

❖BENAYAD Abdelkader.

❖BOUCHNEFA Redha.

Promotion 2013

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nous remercions nos très chers parents pour leurs soutiens et Leurs patiences.

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à notre Encadreur Dr .AMMAR BOUZIDE pour son précieux temps Qu'il a consacré à notre écoute, à notre orientation et correction tout Au long de notre projet.

Nous tenons à remercier : le président et les membres de jury pour avoir accepter de juger notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à touts les enseignants du département de Génie civil de l'université de Médéa, et à touts les enseignants qui ont participé à notre formation.

En fin nous remercions tous ceux qui ont contribué de loin ou de Prés à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde

Après mon DIEU pour leurs sacrifices :

A Mes chers parents que dieu les gardes et préserve.

A Mes frères et Ma sœur

A toute la famille ***« Bouchenafa»*** *sans exception.*

A tous Mes amis intimes.

A Tous mes collègues de la 2eme année master géotechnique.



Bouchenafa

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde

Après mon DIEU pour leurs sacrifices :

A Mes chers parents que dieu les gardes et préserve.

A Mes frères et Mes sœurs

A toute la famille ***« Benayad et Benachour»*** *sans exception.*

A tous Mes amis intimes.

A Tous mes collègues de la 2eme année master géotechnique.

Benayad



ملخص:

في بحثنا،و من أجل الحصول على أطروحة الماستر في الجيوتقنية ناقشنا التأكيد على أهمية تربة محسنة بتقنية الأعمدة المرصوصة بحجارة السكك الحديدية.

في الشطر الأول لهذه الدراسة نعرض جملة من المعلومات التي تعرف هذه التقنية و مجالات استعمالاتها. كما نقدم في الشطر الثاني محاكاة تصميم الأساسيات القاعدية التي تصف السيرة الميكانيكية للتربة

في هذه الدراسة اعتمدنا على النمذجة الرقمية لتجربة تحت تأثير قوى على عينة مصغرة مكونة من تربة محسنة بعمود مرصوص بحجارة السكة الحديدية. النمذجة الرقمية تمت بواسطة طريقة العناصر المتناهية و ذلك باستعمال برنامج (plaxis) مع استعمالنا لقانون سيرة التصرف المرن-اللدن mohr-coulomb و élastique

الكلمات المفاتيح : طرق تحسين التربة, عمود مرصوص بحجارة السكك الحديدية, محاكاة تصميم , نمذجة رقمية, قانون سيرة التصرف mohr-coulomb, برنامج PLAXIS .

Summary:

The following work for a Geotechnical Master's thesis demonstrates the importance of the numerical study; in question of a reinforced soil with a stone column, a bibliographic overview about the ground reinforcement technique by the stone columns is presented first.

Than we exhibit the basic principles describing the basic principles describing the behavior of stone columns is presented, through the mechanism of the behavior and design of a column ballasted

The study is made through numerical modeling of a stone column containing a soil sample (clay and sand) with stone column with the help of PLAXIS software which is a geotechnical analysis software based on the finite element method using the elastoplastic behavior model of Mohr-Coulomb.

Key words: soil improvement, stone columns, Simulation design, the behavior law of Mohr-Coulomb, PLAXIS.

Résumé :

Dans notre travail de recherche, en vue de l'obtention d'un mémoire de master en géotechnique, il a été question de mettre l'accent sur l'importance d'une étude numérique du comportement d'un sol renforcé par colonne ballastée. Une synthèse bibliographique sur la technique de renforcement des sols par colonnes ballastées est d'abords présentée.

Ensuite, on présente les principes de bases décrivant le comportement des colonnes ballastées, en passant par le mécanisme du comportement et dimensionnement d'une colonne ballastées

L'étude est faite par le biais de la modélisation numérique d'une colonne ballastée contenant un échantillon de sol (argiles et sables) avec colonne ballastée et sans colonne ballastée à laide du logiciel PLAXIS qui est un code de calcul géotechnique utilisant la méthode des éléments finis en utilisant le modèle de comportement élastique et élastoplastique de Mohr - Coulomb.

Mots clés : amélioration des sols, colonne ballastée, dimensionnement, Simulation, loi de comportement Mohr – Coulomb, PLAXIS.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE 6

Chapitre I: Synthèse bibliographique

I.1. Techniques d'amélioration des sols : 9

I.2. Méthode d'amélioration de sol par colonnes ballastées : 11

I.2.1. Définition : 11

I.2.2. Les principaux effets de la mise en place d'une colonne ballastée : 11

I.2.3 le rôle : 12

I.2.4 Méthodes d'exécutions : 13

I.2.4.1 Les colonnes ballastées par voie sèche : 13

I.2.4.2 Les colonnes ballastées par voie humide : 14

I.2.4.3 Les Colonne ballastée pilonnée : 15

I.2.5 Matériel d'exécution : 16

I.2.6. Domaines d'application : 20

I.2.6.1. Ouvrages : 20

I.2.6.2. Conditions géotechniques : 20

I.2.6.3. Type des sols : 21

I.2.7. Caractéristiques des colonnes ballastées : 23

I.2.7.1. La longueur : 23

I.2.7.2 Le diamètre : 23

I.2.7.3 Maillage : 24

I.2.8 Choix des matériaux : 24

I.2.8.1 Matériaux constitutifs des colonnes : 24

Sommaire

Chapitre II : Mécanisme du comportement et dimensionnement des colonnes ballastées

II.1 introduction :.....28
II.2 Principes généraux de fonctionnement :.....29
II.3 Colonne isolée :.....30
II.3.1 Mécanismes de rupture :.....30
II.3. 2 Comportement d'une colonne ballastée isolée sous chargement statique vertical :.....31
II.3.3 Réseau de colonnes ballastées et Principe de la cellule unitaire :.....33
II.3.4 Méthodes de dimensionnement :.....34
II.3.4.1 Rappel des paramètres intervenant dans le dimensionnement :.....35
II.3.4.2 Dimensionnement des colonnes ballastées par des méthodes empiriques :.....35
II.3.4.3 Dimensionnement des colonnes ballastées par des méthodes analytiques :.....37
II.4 Dimensionnement d'un réseau de colonnes ballastées :.....42
II.5 Principe de calcule :.....45
II.6 Conclusion :.....47

Chapitre III: Modélisation d'une colonne ballastée avec logiciel PLAXIS

III.1 Introduction :.....49
III.2 Le programme de calcul :.....49
III.3 Caractéristiques générales des calculs :.....51
III.4 Procédures d'application du chargement :.....52
III.5 Paramètres de contrôle du calcul :.....52
III.5.1. Les pas additionnels (Additional steps) :.....53
III.6 : Le programme courbe (curves) :.....53
III.7 Le calcul :.....53
III.7.1. jeux des données :.....53

III.7.2. Paramètre des matériaux : 55
III.7.3. pour l'argile sans colonnes ballastées : 56
III.7.4 Pour l'argile avec colonne ballastée : 60
III.7.5. Pour le sable sans colonne : 64
III.7.6. Pour le sable avec colonne : 67
III.8 Conclusion : 71
CONCLUSION GENERALE 72
BIBLIOGRAPHIE....73

Liste des figures :

FIGURE I- 1 : SCHEMA GENERAL DE L'APPLICATION DES TECHNIQUES D'AMELIORATION DES SOLS. LIMITES ET DOMAINE DE VALIDITE [DHOUIB ET AL. 2004C] 10
FIGURE I- 2 : PRINCIPE DE REALISATION D'UNE COLONNE BALLASTEE 12
FIGURE I- 3 : LA MISE EN ŒUVRE DES COLONNES BALLASTEES PAR VOIE SECHE (DOCUMENT KELLER) 14
FIGURE I- 4 : TECHNIQUE DE REALISATION DES COLONNES BALLASTEES PAR VOIE HUMIDE 14
FIGURE I- 5 : PHENOMENE DE LIQUEFACTION LOCAL (SITE : BARRAGE KISSIR JIJEL) 15
FIGURE I- 6 : PRINCIPE DE REALISATION D'UNE COLONNE BALLASTEE PILONNEE. [SEBASTIEN CORNEILLE, 2007] 16
FIGURE I- 7 : PORTEUR SUR CHENILLES EQUIPE D'UN VIBREUR A SAS [DOC. KELLER] 17
FIGURE I- 8 : ENGIN PORTEUR (GRUE A FLECHE TREILLIS) 18
FIGURE I- 9 : VIBREURS [DOC. KELLER] 19
FIGURE I- 10 : TECHNIQUES DES COLONNES BALLASTEES VIBREES OU DU VIBROCOMPACTAGE SELON LES CLASSES GRANULOMETRIQUES DES SOLS [S CORNEILLE 2007] 21
FIGURE I- 11 : COMPACTIBILITE D'UN SOL PULVERULENT EN FONCTION DE LA RESISTANCE EN POINTE ET DU FROTTEMENT LATERAL [MASSARSCH, 1991 B] 22

FIGURE II- 1 : TYPES DE RUPTURE D'UNE COLONNE ISOLEE CHARGEES EN TETE EXECUTEE DANS UNE COUCHE COMPRESSIBLE HOMOGENE [DATYE, 1982] 30
FIGURE II- 2 : MECANISMES DE RUPTURE DES COLONNES BALLASTEES ISOLEES DANS LES SOLS NON HOMOGENES [BARKSDALE ET BACHUS, 1983] 31
FIGURE II- 3 : REPORT DES CHARGES SUR LES COLONNES DANS LE CAS D'UN RADIER RIGIDE ET D'UNE FONDATION SOUPLE [EGGESTAD, 1983] 32
FIGURE II- 4 : INTERACTION SOL-COLONNE : REPARTITION DES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT LE LONG DE LA COLONNE BALLASTEE (COURTE) ET EFFET DE POINTE [EGGESTAD, 1983] 33

Sommaire

FIGURE II- 5 : PRINCIPE DE LA CELLULE UNITAIRE : REPARTITION DES CONTRAINTES EN SURFACE A LONG TERME [GHIONNA ET JAMIOLKOWSKI, 1981] 34
FIGURE II- 6 : DETERMINATION DE L'ESPACEMENT DES COLONNES EN FONCTION DE LA RESISTANCE DU SOL AUTOUR DE LA COLONNE (GREENWOOD, 1970) 36
FIGURE II- 7 : DETERMINATION DE LA CAPACITE PORTANTE ET DU DIAMETRE EFFECTIF EN FONCTION DE L'ETREINTE LATERALE DU SOL ENCAISSANT (THORBURN, 1975) 36
FIGURE II- 8 : DETERMINATION PRATIQUE DE Δ (BRAUNS, 1978B) 39
FIGURE II- 9 : DEFINITION DES LONGUEURS LMIN ET LMAX D'UNE COLONNE BALLASTEE VIS-A-VIS DE LA RUPTURE PAR POINÇONNEMENT (BRAUNS 1980) 40
FIGURE II- 10 : DETERMINATION LES VALEURS DE I_p EN FONCTION DE K ET DU RAPPORT $\boldsymbol{Ld}$ 42
FIGURE II- 11 : REDUCTION DU PROBLEME POUR L'ETUDE DES RESEAUX DE COLONNES BALLASTEES [BALAAM ET POULOS, 1983] 44

FIGURE III- 1 : FENETRE PRINCIPALE DU PROGRAMME DE CALCUL. 49
FIGURE III- 2 : ONGLET *GENERAL* DE LA FENETRE DE CALCUL. 52
FIGURE III- 3 : ONGLET *PARAMETRES* DE LA FENETRE DE CALCUL 53
FIGURE III- 4 : CARACTERISTIQUES GENERALES DU MODELE. **FIGURE III- 5 :** TAILLE DU MAILLAGE. 54
FIGURE III- 6 : COORDONNEES. **FIGURE III- 7 :** PREMIERE VUE. 54
FIGURE III- 8 : MODELE UTILISE POUR LE CALCUL. 55
FIGURE III- 9 : FENETRE DES CARACTERISTIQUES GENERALES RELATIVE A LA COUCHE DE SOL (ARGILE). 56
FIGURE III- 10 : MAILLAGE DU PROBLEME (ARGILE SANS COLONNE). 57
FIGURE III- 11 : CONTRAINTES INITIALE (ARGILE SANS COLONNE). 58
FIGURE III- 12 : REPRESENTATION DU MAILLAGE DEFORME POUR L'ARGILE SANS COLONNE. 59
FIGURE III- 13 : LA COURBE CHARGEMENT-DEPLACEMENT POUR L'ARGILE SANS COLONNE. 59
FIGURE III- 14 : LA COURBE CONTRAINTE-DEFORMATION POUR L'ARGILE SANS COLONNE. 60
FIGURE III- 15 : MAILLAGE DU PROBLEME (ARGILE AVEC COLONNE). 61
FIGURE III- 16 : LES CONDITIONS INITIALES (ARGILE AVEC COLONNE). 61
FIGURE III- 17 : REPRESENTATION DU MAILLAGE DEFORME POUR LE SABLE. 62
FIGURE III- 18 : LE DEPLACEMENT VERTICAL. 63
FIGURE III- 19 : LA COURBE CHARGEMENT-DEPLACEMENT. 63
FIGURE III- 20 : LA COURBE CONTRAINTE-DEFORMATION. 63
FIGURE III- 21 : LA COMPARAISON ENTRE ARGILE AVEC COLONNE ET SANS COLONNE. 64
FIGURE III- 22 : FENETRE DES CARACTERISTIQUES GENERALES RELATIVE A LA COUCHE DE SOL (SABLE). 64
FIGURE III- 23 : LES CONDITIONS INITIALES. 65
FIGURE III- 24 : REPRESENTATION DU MAILLAGE DEFORME POUR LE SABLE. 65
FIGURE III- 25 : LE DEPLACEMENT VERTICAL POUR LE SABLE. 66
FIGURE III- 26 : LA COURBE CHARGEMENT-DEPLACEMENT. 66
FIGURE III- 27 : LA COURBE CONTRAINTE-DEFORMATION. 67

FIGURE III- 28 : MAILLAGE DU PROBLEME.....67
FIGURE III- 29 : LES CONDITIONS INITIALES. 68
FIGURE III- 30 : REPRESENTATION DU MAILLAGE DEFORME POUR LE SABLE. 69
FIGURE III- 31 : LE DEPLACEMENT VERTICAL POUR LE SABLE. 69
FIGURE III- 32 : LA COURBE CHARGEMENT-DEPLACEMENT. 70
FIGURE III- 33 : LA COURBE CONTRAINTE-DEFORMATION.....70
FIGURE III- 34 : LA COURBE CHARGEMENT-DEPLACEMENT. 71

Liste des tableaux :

TABLEAU I- 1 : CHAMP D'APPLICATION DES COLONNES BALLASTEES : NATURE ET RESISTANCE DES SOLS (ETREINTE LATERALE) [DHOUIB ET BLONDEAU 2005] 22
TABLEAU I- 2 : CARACTERISTIQUES DU BALLAST POUR COLONNES BALLASTEES [DHOUIB ET BLONDEAU 2005].....25

TABLEAU II- 1 : DEFINITION DU COEFFICIENT MULTIPLICATEUR *K* SELON DIVERS AUTEURS 38

TABLEAU III- 1 : LES PROPRIETES MECANIQUES DES MATERIAUX.....56

INTRODUCTION GENERALE

De façon générale, Le sol est généralement un matériau hétérogène avec des caractéristiques très variables. Les principaux problèmes liés aux sols se manifestent par une capacité portante faible, des déformations (tassement absolu ou différentiel) importants sous charges statiques, ou séisme surtout pour les sols sableux lâches et saturés

La technique d'amélioration par colonnes ballastées est souvent employée en génie civil dans le cas des ouvrages situés sur des sols mous, tels que les remblais, les fondations des réservoirs et les ouvrages ayant des charges moyennes

La technique la plus courante pour la réalisation des colonnes ballastées est le procédé KELLER. La pièce essentielle est constituée par un vibreur radial placé à la pointe du tube qui sert de support et assisté par un jet d'eau pour les sols cohérents, a l'aide d'un fluide de lançage (air ou eau) afin de compacter le ballast. Les vibrations entrainent une liquéfaction du sol et par conséquence la dissipation des surpressions interstitielles s'effectue et engendre la densification, donc il s'agit d'un réarrangement des grains de sol dans un état plus compact.

Les colonnes ballastées apportent bien des avantages par rapport à d'autres solutions. Comme elles sont réalisées avec un matériau naturel dépourvu de liant Parmi les avantages du traitement d'un sol par colonnes ballastées la réduction du risque de liquéfaction ; les colonnes sont considérées comme éléments drainants permettant la dissipation des pressions interstitielles. Le traitement d'un sol par colonne ballastée a pour effets qui consiste à:

- l'augmentation de la capacité portance,
- la réduction des tassements,
- l'homogénéisation des caractéristiques géotechniques,
- l'augmentation de la vitesse de consolidation par la création d'éléments drainants,
- l'augmentation des caractéristiques équivalentes du massif de sol traité (la résistance au cisaillement horizontal, l'angle de frottement interne et les paramètres de déformation).

Le but de ce mémoire est l'étude du comportement des colonnes ballastées, à l'aide du logiciel PLAXIS®2D qui est un code de calcul géotechnique utilisant la méthode des éléments finis.

Ce mémoire est organisé suivant :

a) Une introduction générale.
b) Un premier chapitre renferme la synthèse bibliographique, on étudiera de plus prés la technique d'amélioration de sol par colonnes ballastées : ces modes d'exécution différents modes de mise en œuvre, ces modes d'exécution.

c) Un second chapitre décrit mécanisme de comportement et dimensionnement des colonnes ballastées

d) Un troisième chapitre est consacré à l'étude d'une colonne modélisé par PLAXIS, une discussion y est dressée pour l'analyse de comportement de ce type de traitement du sol étudié.

e) Une conclusion générale.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

Les colonnes ballastées sont un procédé d'amélioration des sols compressibles permettant de répondre, dans des proportions variées, à plusieurs objectifs (Augmentation de la capacité portante, diminution des tassements totaux et différentiels, augmentation de la résistance au cisaillement, et diminution des risques induits par la liquéfaction).

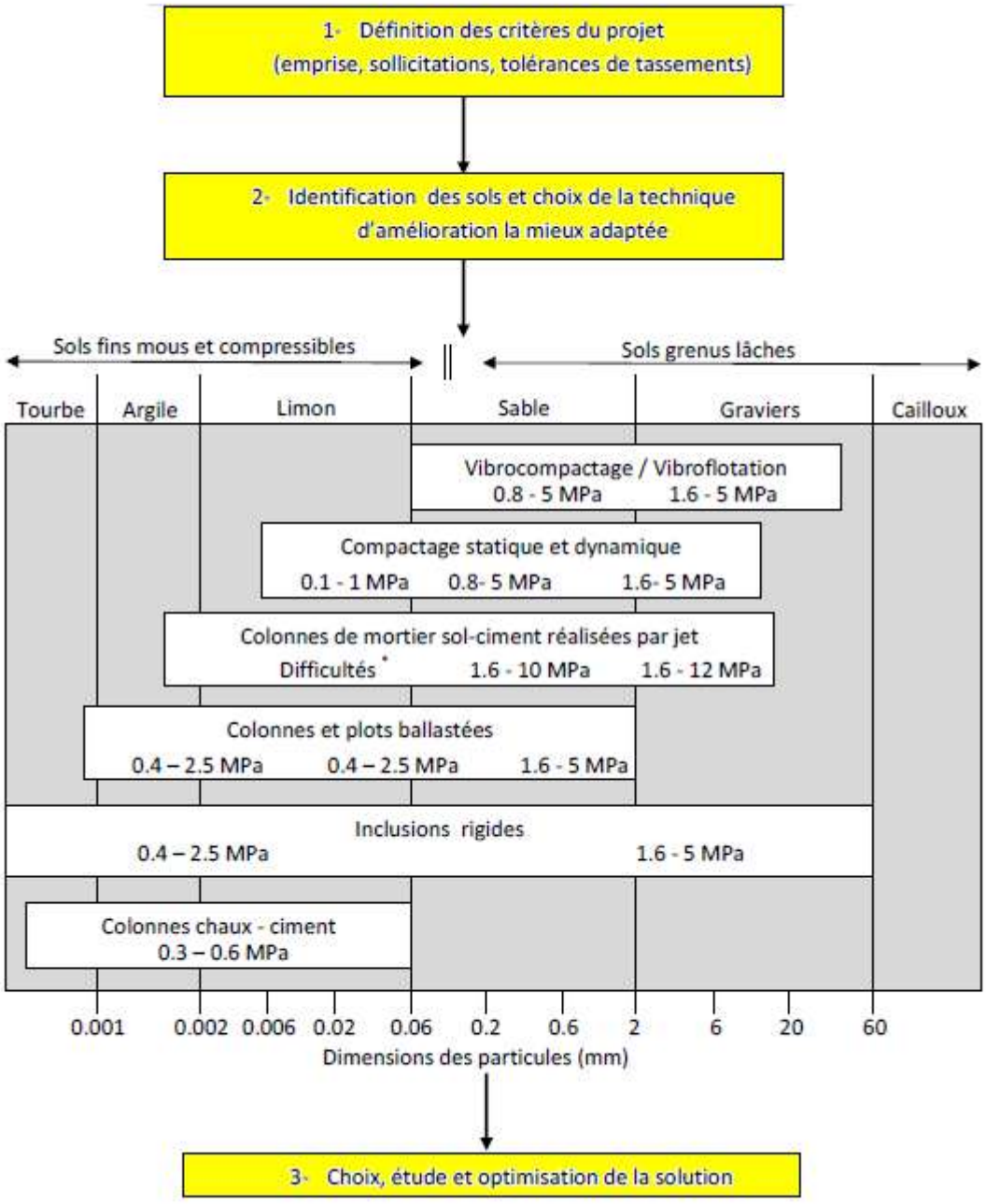
Les colonnes ballastées sont actuellement massivement employées dans la zone portuaire où les sols en place sont des sables vaseux. Cette technique, une fois maîtrisée, peut être la solution des problèmes posés par la médiocrité des sols le long de notre littoral. Les calculs ont montré que c'est le procédé le plus rationnel pour limiter les tassements du sol sous le poids des réservoirs de pétrole et autres ouvrages portuaires. Elles contribuent également à la diminution du potentiel de liquéfaction

I.1. Techniques d'amélioration des sols :

Le sol initial, ou à l'état non amélioré, est identifié essentiellement par sa courbe granulométrique qui demeure un facteur essentiel en vue de lui faire subir une technique d'amélioration donnée. En effet, compte tenu des deux grandes classes de sols bien connus, à savoir pulvérulents ou fins, on comprend naturellement qu'il existe une différence entre les techniques d'amélioration appropriées à chacune de ces classes. Par ailleurs, en plus, sachant qu'il existe une bonne majorité de sols appartenant à la catégorie de sols intermédiaires, d'autres dérivées de techniques peuvent être envisagées. En effet, la figure 1.0 illustre la différence nette entre les techniques exécutables dans les sols fins, d'une part, et dans les sols grenus, d'autre part. Alors que pour les sols intermédiaires les possibilités d'amélioration ne sont diversifiées.

Dans la pratique, en fonction du projet en vue d'être exécuté, on peut faire recours à l'exécution de deux techniques différentes d'amélioration des sols. La photo 1 illustre le cas d'un ouvrage d'art en Belgique pour lequel les culées jouent le rôle de soutènement d'un massif en terre armée qui repose sur une couche d'alluvions compressibles renforcée par des colonnes ballastées.

Il faut également souligner, sur le plan économique, l'importance des techniques d'amélioration des sols comme étant une solution alternative à d'autres modes de fondation plus coûteux. A titre d'exemples, le renforcement par colonnes et le renforcement par micro pieux représentent deux techniques dont l'usage est devenu bien pratiqué à l'échelle internationale. En raison, d'une part, de leurs exécutions relativement rapides, et, d'autre part, des circonstances actuelles concernant le coût de plus en plus cher, en particulier, de l'acier le renforcement par colonnes et le clouage représentent deux opportunités à saisir pour remplacer le mode de fondation sur pieux. Une telle opération est bien entendu possible en particulier dans le cas d'ouvrages transmettant un chargement quasi uniforme sollicitant le sol sur une profondeur ne dépassant les vingt mètres.



* utilisation de grande énergie ou double-jet.

Figure I- 1 : Schéma général de l'application des techniques d'amélioration des sols. Limites et domaine de validité [Dhouib et al. 2004c]

I.2. Méthode d'amélioration de sol par colonnes ballastées :

I.2.1. Définition :

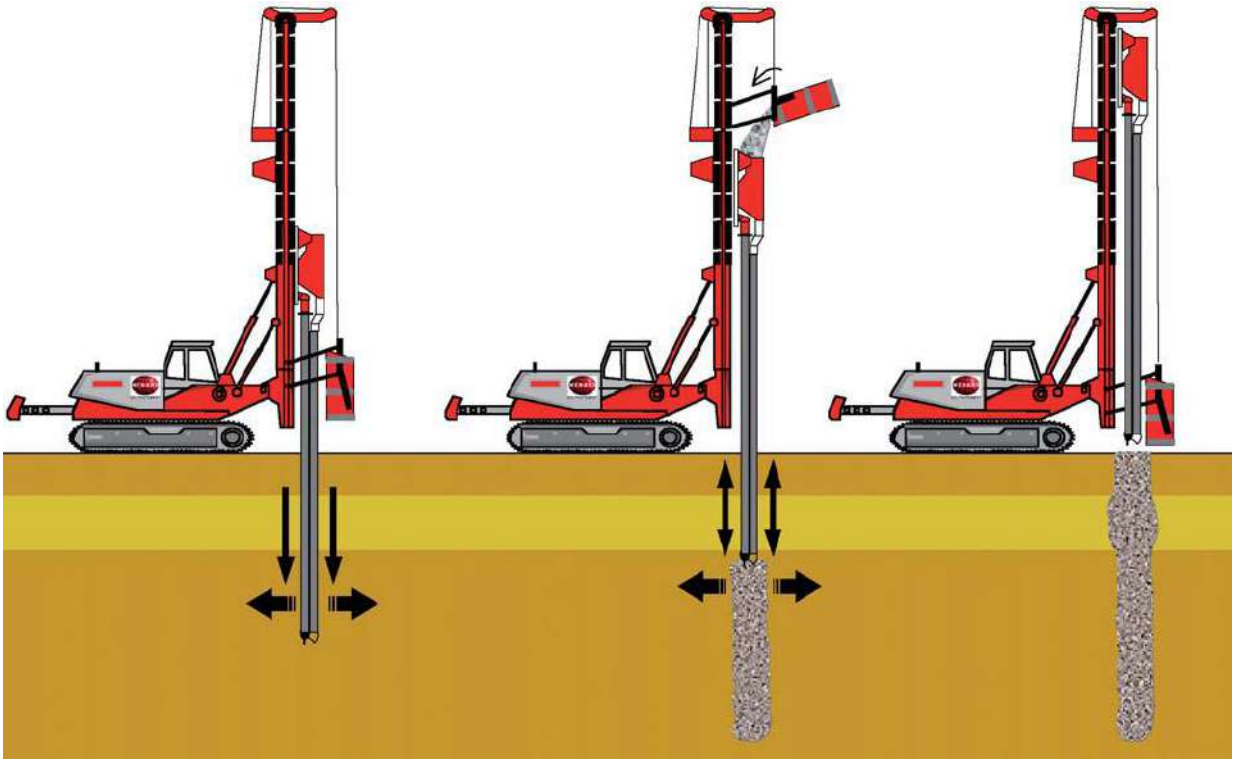
La technique des Colonnes Ballastées consiste, à l'aide d'une aiguille vibrante, à incorporer dans le terrain des matériaux granulaires compactés de manière constitué des inclusions souples, présentant des caractéristiques mécaniques élevées et un fort caractère drainant. Sous les ouvrages à surcharge répartie (remblais, radiers, dallages...)

Les colonnes ballastées sont disposées suivant un maillage régulier et sont coiffées d'un matelas de repartitionnes contraintes. Elles permettent ainsi d'homogénéiser et de diminuer l'amplitude globale des tassements sous l'ouvrage. Les Colonnes Ballastées peuvent également être disposée sen groupes sous les charges isolées (semelles de fondations) ou en files (semelles filantes, murs de soutènement...). Elles permettent dans ce cas d'accroître la capacité portante du terrain tout en contrôlant les tassements des ouvrages. 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, tourbes...) dan lesquels l'étreinte latérale autour des colonnes n'est pas garantie à long terme.

I.2.2. Les principaux effets de la mise en place d'une colonne ballastée :

Le traitement d'un sol par colonnes ballastées conjugue les actions suivantes :

- amélioration de la portance ;
- réduction des tassements ;
- homogénéisation des caractéristiques géotechniques ;
- augmentation de la vitesse de consolidation par la création d'éléments drainants ;
- augmentation des caractéristiques équivalentes du massif de sol traite
  (La résistance au cisaillement horizontal, l'angle de frottement interne et les paramètres de déformations) ;



Fonçage avec lançage à l'air *Incorporation de matériaux et compactage du ballast* *Colonne terminée*

Figure I- 2 : Principe de réalisation d'une colonne ballastée

I.2.3 le rôle :

Les colonnes ballastées utilisées pour améliorer en place tous types de sols médiocres (de nature sableux lâches à cohérents molles), alors le dimensionnement et l'utilisation des colonnes ballastées dépendent de la nature du sol ainsi que du type d'ouvrage à réaliser. Cette partie a pour objet le recensement des utilisations possibles de la méthode des colonnes ballastées.

Les utilisations les plus fréquentes des traitements par colonnes ballastées concernent des ouvrages ou ils existent des dallages et radiers recevant des charges surfaciques et susceptibles d'accepter des tassements (halls de stockage, bâtiments industriels et commerciaux, silos et réservoir de toute nature, ouvrages hydrauliques étanches (réservoir, station d'épuration)

On les retrouve également sous d'autres types d'ouvrages dans la mesure où les déformations résiduelles du sol traite sont compatibles avec la structure de l'ouvrage sous exploitation et prescriptions techniques associées.

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

Les colonnes ballastées ne doivent pas être utilise dans certains terrains tels que les décharges d'ordures ménagères, les tourbes. C'est-a-dire les sols présentant des risques de pertes dans le temps des caractéristiques volumétriques et/ou mécaniques définis par la norme XP 94-047.

Remarque en zone sismique, il est possible d'utiliser les colonnes en zones sismiques ou elles peuvent contribuer à la diminution du potentiel de liquéfaction des sols.

Les colonnes ballastées peuvent être utilisées dans tout type de sol. Leur hauteur usuelle est comprise entre 2m et 20m tandis que leur diamètre, dépendant de la résistance mécanique visée, est compris entre 0,8 et 1,2m.

I.2.4 Méthodes d'exécutions :

Il existe un grand nombre de méthodes d'exécutions des colonnes ballastées, qui dépendent de la nature du sol dans lequel elles sont implantées :

I.2.4.1 Les colonnes ballastées par voie sèche :

Les étapes d'exécution des colonnes par voie sèche, dite encore par vibro-refoulement (vibrodisplacement) sont les suivantes :

- auto-foncer le vibreur directement dans le sol par refoulement jusqu'à la profondeur désignée ;
- remonter progressivement le vibreur tout en laissant descendre graviter et par pression d'air, le ballast approvisionné par chargeur dans une benne coulissant le long du mât ;
- compacter le ballast par passes successives de l'ordre de 0.5 m jusqu'à la finition de la colonne. La *Figure I.3* illustre les phases successives de la mise en œuvre des colonnes ballastées par voie sèche.

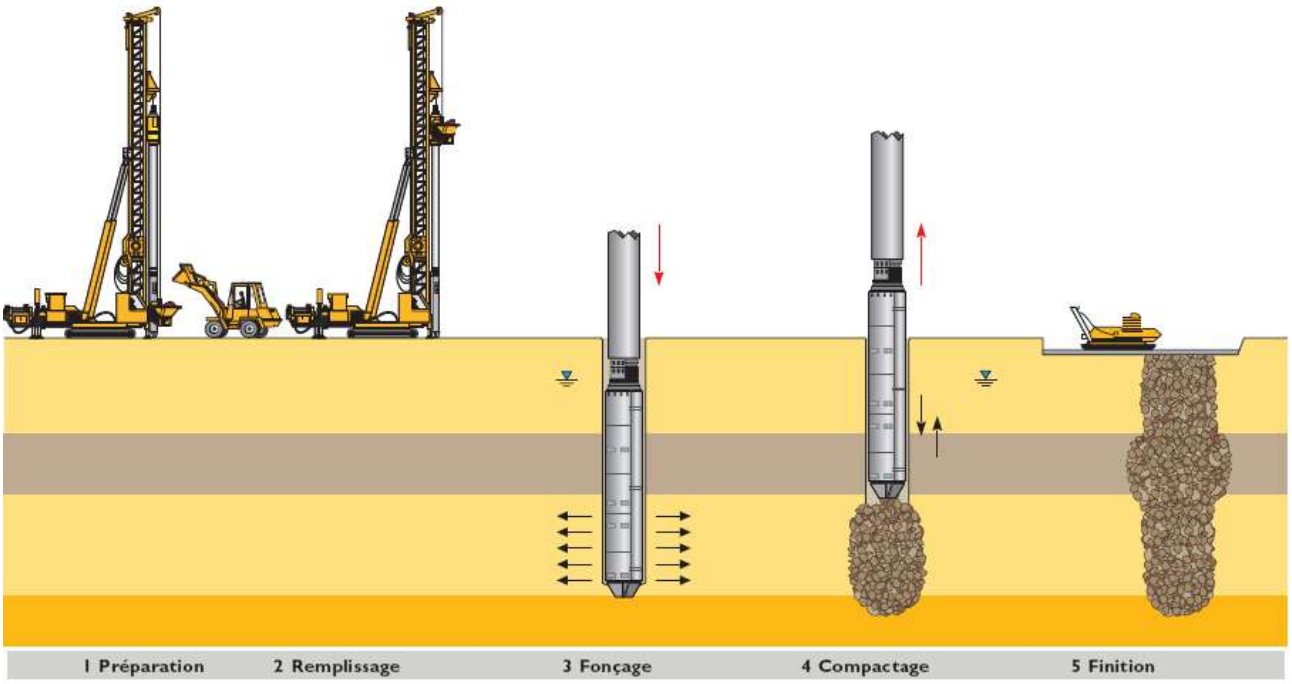


Figure I- 3 : la mise en œuvre des colonnes ballastées par voie sèche (document Keller)

I.2.4.2 Les colonnes ballastées par voie humide :

Le procède est le même que celui présente précédemment, la différence repose sur le fait que le fluide de lançage est ici de l'eau.

La mise en place de colonne ballastée par voir humide est utilisée lorsque le sol est pulvérulent et que la stabilité des parois n'est pas assurée. Dans les cas contraire c'est la méthode par voie sèche qui est utilisée.

Il est possible de procéder à un remplissage complémentaire de coulis bentonite ciment simultanément a la mise en place du ballast a l'aide d'un tube latéral afin de maintenir les parois.

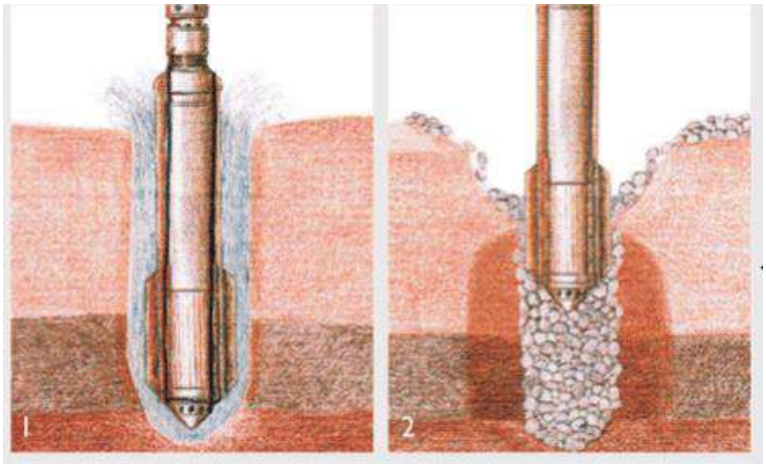


Figure I- 4 : Technique de réalisation des colonnes ballastées par voie humide



Figure I- 5 : Phénomène de liquéfaction local (site : barrage Kissir Jijel)

I.2.4.3 Les Colonne ballastée pilonnée :

Elle est obtenue par battage d'un tube obture a sa base jusqu'a la profondeur recherchée. Le matériau est introduit par petites quantités en tète de tube et compacte au fur et a mesure par pilonnage en pied. Le tube est remonte petit a petit de sorte que le volume incorpore, toujours supérieur au gabarit du tube, est conforme au diamètre de calcul. Le diamètre du tube est choisi selon les caractéristiques du sol et de la colonne.

Le poids du pilon est adapte a ce tube. L'énergie est modulée en faisant varier la hauteur de chute.

L'intérêt de cette méthode est le maintient des parois de la cavité par le tube. Cependant le battage du tube suppose que le sol ne soit par trop compressible (ex : argile sensible) et que le chantier ne soit pas une zone fortement urbanisée. (vibration, nuisance,…).

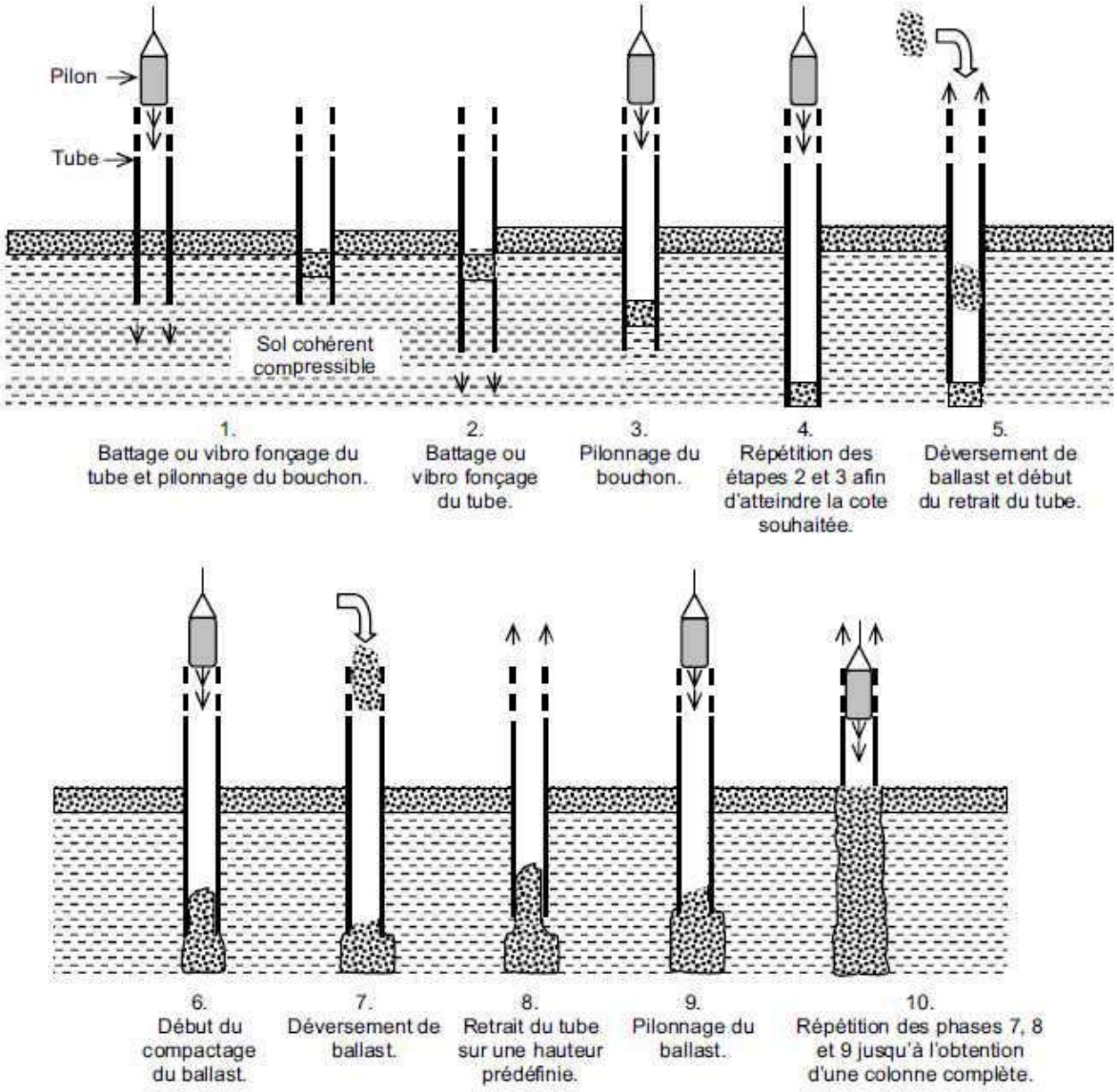


Figure I- 6 : Principe de réalisation d'une colonne ballastée pilonnée. [Sebastien Corneille, 2007]

Plot ballastées pilonné: les colonnes sont obtenus par l'excavation de sol sur des profondeurs de 8 des rayons de 2-3m et par compaction dynamique du ballast par une charge de 15-20tonnes tombant en chute libre de manière répétée.

I.2.5 Matériel d'exécution :

En général les colonnes ballastées sont réalisées par l'utilisation :

- des vibreurs spécifiques à basses fréquences suspendus à des grues ou montés sur porteurs dans le cas de faibles profondeurs (équipements KELLER),
- Vibreurs à sas montés sur des châssis porteurs, qui comporte à son extrémité supérieure, un sas et une trémie pour les matériaux d'apport (équipements KELLER).



Figure I- 7 : Porteur sur chenilles équipé d'un vibreur à sas [doc. KELLER]

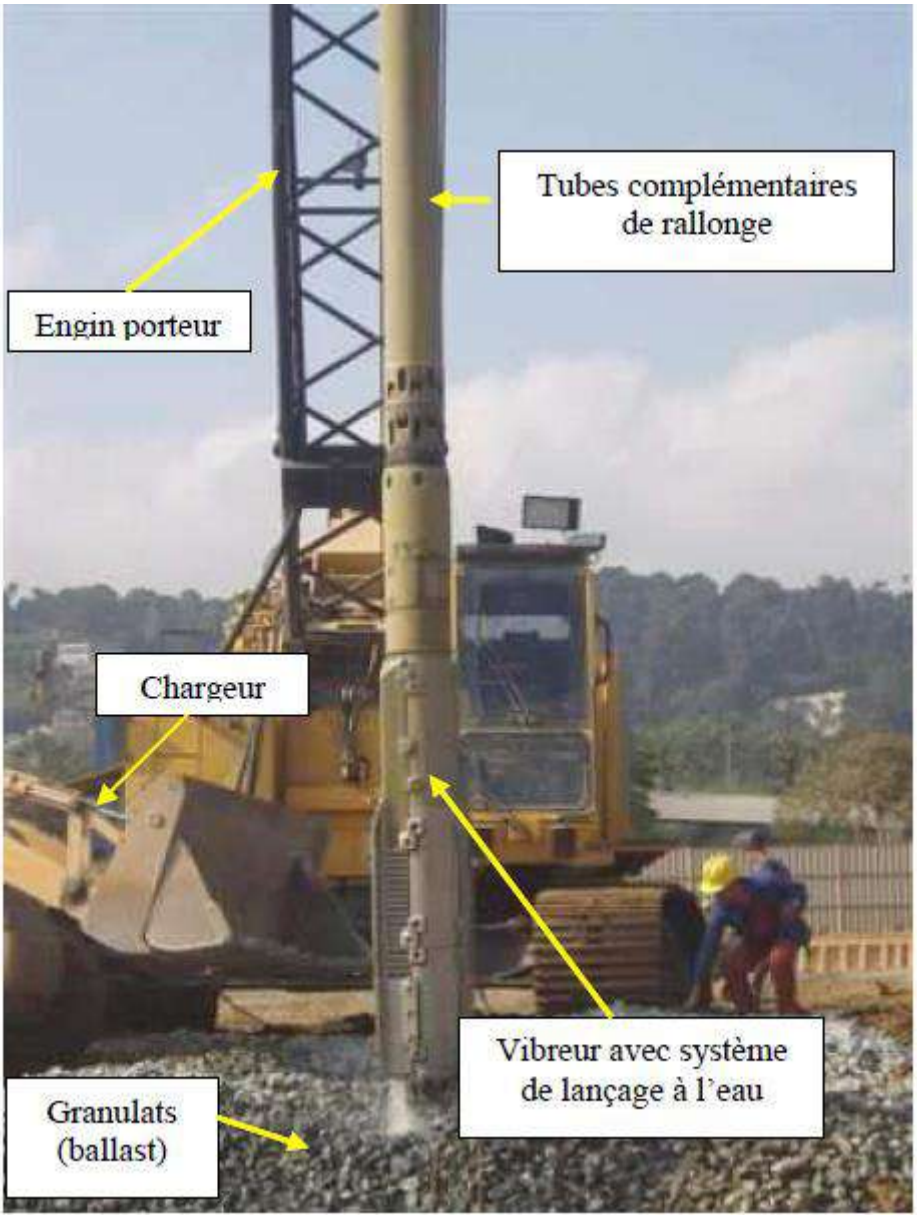


Figure I- 8 : Engin porteur (grue à flèche treillis)



Figure I- 9 : Vibreurs [doc. KELLER]

- **Vibreurs**

La pointe du vibreur ne doit pas être remontée au-dessus du matériau d'apport en place. La fréquence utilisée est généralement comprise entre 15 et 60 Hz. Le type et la puissance du vibreur influent sur la qualité de la colonne. Il existe plusieurs types de vibreurs, qui se différencient par leur fréquence et par leur mode de fonctionnement : électrique ou hydraulique. D'après les informations disponibles dans la littérature et recueillies auprès des entreprises spécialisées, les avantages et les inconvénients majeurs des deux types de vibreurs sont :

- Le risque de pollution crée par le vibreur hydraulique,
- Le problème de sécurité posé par le vibreur électrique.

A cela s'ajoutent des avantages et des inconvénients plutôt mineurs relatifs aux poids et aux dimensions des vibreurs et des pièces annexes (flexibles et câbles) ainsi qu'à la variabilité de la fréquence (fréquence fixe ou variable avec variateur ou non de fréquence) et à la puissance de chaque type de vibreur.

I.2.6. Domaines d'application :

I.2.6.1. Ouvrages :

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

- remblai 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 décantation, installations annexes) ;
- pistes d'aéroport ;
- stabilisation des talus

I.2.6.2. Conditions géotechniques :

Priebe (1991) indique une zone centrale hachurée pour laquelle il précise que si le pourcentage de fines d'un sol est inférieur à 5% et si sa courbe de distribution est entièrement à droite de la zone hachurée, alors le sol sera généralement facilement compactable. Par ailleurs, lorsque la zone hachurée est traversée par la courbe de distribution ou si le sol est entièrement constitué de particules fines, alors le dimensionnement doit être entièrement basé sur l'effet de renforcement des colonnes ballastées mises en place. Degen (1998) précise que les sols pour lesquels les colonnes sont préconisées (argiles et limons), ne sont pas compactable, et que celles-ci sont donc une solution alternative de fondation dans ces types de sols.

La figure I.10 indique les champs d'application des techniques de vibrocompactage et colonnes ballastées selon la granulométrie, ainsi selon les paramètres mécaniques. La classification des sols adoptée et celle de Massachusets Institute of Technology (Costet et Sanglerat, 1981).

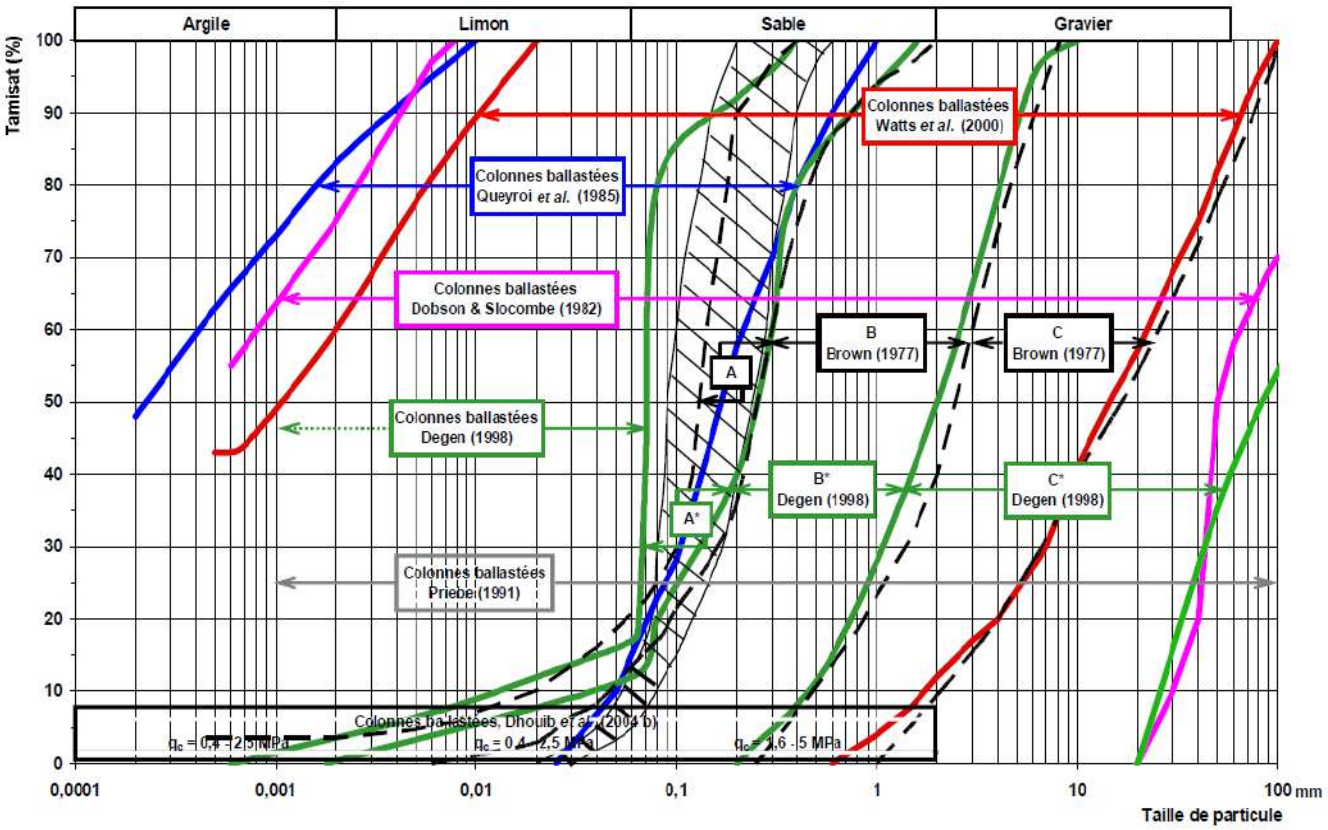


Figure I- 10 : Techniques des colonnes ballastées vibrées ou du vibrocompactage selon les classes granulométriques des sols [S Corneille 2007]

Légende :

A : Sols difficilement compactables par l'effet de la vibration uniquement.

B : Le vibrocompactage est le plus adapté à ce fuseau (sables lâches sous la nappe).

C : La pénétration du vibreur est difficile à cause de la taille des particules les plus grossières.

A* : Ces sols sont aptes au vibrocompactage mais le temps nécessaire pour la compaction est nettement plus important que pour B*.

B* : Le vibrocompactage est le plus adapté à ce fuseau car les sols ont moins de 12% de particules inférieures à 80 µm.

C* : Ces sols sont facilement compactables. La limite supérieure est définie par le fait que la quantité de blocs empêche la pénétration du vibreur.

I.2.6.3 Type des sols :

Dans le cas des sols pulvérulents la figure I-11 présente, slon Massarsch, (1991 b), la densification des sols pulvérulents en fonction des résultats d'essais de pénétration statique (cone penetration test) la distinction des trois zones se fait de la manière suivante :

Zone 1 : Sol compactable par simple vibration : vibroflottation.

Zone 2 : Sol de faible compactibilité : colonne ballastée.

Zone 3 : Sol non compactable par simple vibration : colonne ballastée.

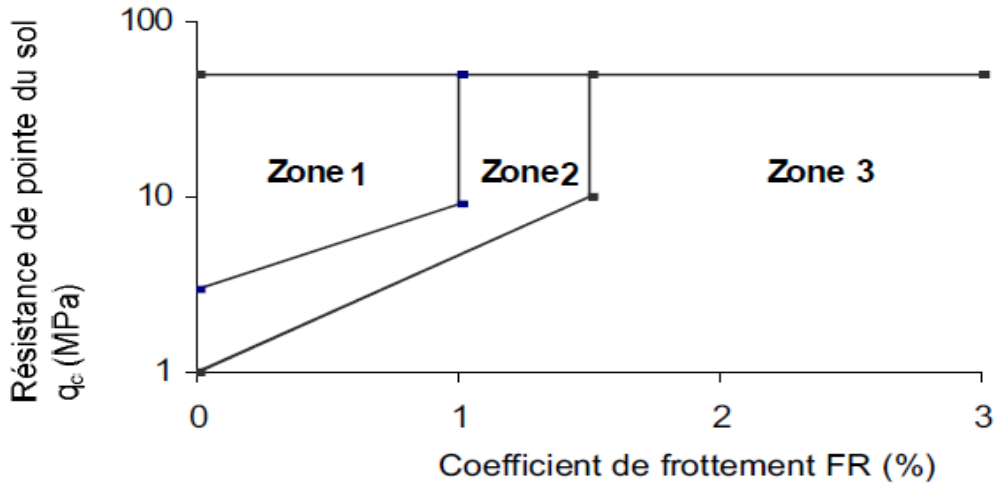


Figure I- 11 : Compactibilité d'un sol pulvérulent en fonction de la résistance en pointe et du frottement latéral [Massarsch, 1991 b]

Le coefficient de frottement *FR* (de l'anglais *Friction Ratio*) montré dans la figure I.11 est défini par la relation :

$$\boldsymbol{FR} = \frac{f_s}{q_c} \qquad \text{(I.1)}$$

Avec :

f_s : Frottement latéral ;

q_c : Résistance de pointe (résultats d'essais de pénétration statique).

Le tableau 1.1 détaille les sols concernés par l'amélioration par colonnes ballastées et les résistances latérales (ou étreinte latérale) que peut offrir le sol pour la stabilité de la colonne.

Tableau I- 1 : Champ d'application des colonnes ballastées : Nature et résistance des sols (étreinte latérale) [Dhouib et Blondeau 2005]

Sols	Faisabilité	Etreinte latérale (1)				Remarques
		p_1 (KPa)	q_c (MPa)	N_{SPT} (coups)	C_u (KPa) (2)	
Argile	Oui	150 - 400	0,6 – 1,2	4 – 6	25 – 50	-
Limon	Oui	150 – 400	0,6 – 1,2	4 – 6	25 – 50	-
Sable fin lâche	Oui	150 – 400	0,6 – 1,2	4 – 6	-	-
Tourbe	Non	-	-	-	-	Matériau évolutif
Autres sols organique	Non (3)	-	-	-	-	Matériau évolutif
Remblai inerte	Oui (4)	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 ; les « Recommandations pour le contrôle de la conception et de l'exécution des colonnes ballastées » du COPREC (2001) fixent une cohésion non drainée minimale de 40 kPa pour la faisabilité du traitement par colonnes ballastées , ce qui correspond à une pression limite nette p_l mesurée au pressiomètre Louis Ménard de 220 kPa, conformément aux corrélations usuelles,

(2) Dans la littérature nationale et internationale, il y a quelques cas où les cohésions non drainées des sols traités par colonnes ballastées sont plus faibles (de l'ordre de 10 à 15 kPa) mais il s'agit généralement de traitement sous remblais ou sous radiers souples,

(3) La possibilité du traitement par colonnes ballastées dépend de la teneur en matériaux organiques des sols mous ; lorsqu'elle dépasse 10 à15 % sur des hauteurs dépassent le demi-diamètre de la colonne, le sol ne peut être stable dans le temps, et les colonnes ballastées sont à exclure,

(4) Lorsque les remblais, même inertes, sont très hétérogènes (présence de blocs), la mise

En œuvre des colonnes peuvent être rendue difficile (pré-forage) ; de plus, l'hétérogénéité globale entre points traités peut générer des tassements différentiels qu'il convient d'analyser avec précision en fonction de la nature de la structure projetée et des tolérances imposées.

I.2.7. Caractéristiques des colonnes ballastées :

I.2.7.1. La 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 10 m, sans excéder 20 à 25 m.

I.2.7.2 Le diamètre :

Le diamètre des colonnes ballastées dépend :

- De l'outil utilisé et de l'adéquation de ce choix au terrain rencontré; Des terrains traversés et de leurs caractéristiques;
- De l'énergie totale dépensée (puissance mise en œuvre, poussée verticale éventuelle et temps passé).

Le diamètre de la colonne peut varier sur sa hauteur, en fonction des différences de résistance des couches traitées.

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.2.7.3 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.2.8 Choix des matériaux :

I.2.8.1 Matériaux constitutifs des colonnes :

Le matériau constitutif de la colonne est drainant. Âpres la norme NF P 11 – 212 (DTU 13.2) le matériau d'apport doit descendre jusqu'à la pointe du vibreur, soit par le forage lui-même, soit par l'espace annulaire maintenu entre le vibreur et le sol environnant, soit par tube latéral associé au vibreur. La granulométrie du matériau d'apport doit vérifier les trois conditions :

- $d_5 > 0.1$ mm
- $d_{30} > 10$ mm
- $d_{100} > 100$ mm ;

1. Le fuseau granulométrique résulte de la fonction essentielle que l'on veut conférer à la colonne ballastée ;
2. le rôle porteur est accru par un fort pourcentage de cailloux ;
3. Le matériau d'apport peut être un roulé ou un concassé en fonction des disponibilités locales.

La roche constituant les éléments du matériau d'apport a des caractéristiques mécaniques élevées et n'est pas délitable ni sujette à l'attrition. Ces propriétés sont déterminées par des essais adéquats. Si le critère adopté est la résistance à la compression simple : ($R_c > 25$ MPa)

Selon les « Recommandations pour le contrôle de la conception et de l'exécution des colonnes ballastées » du COPREC (2001) les diamètres D_{30} et D_{100} de cailloux d'apport sont plus importants pour la voie humide : $D_{30} > 40$ mm ; $D_{100} > 160$ mm

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 les suivantes :

- LA < 35
- MDE < 30
- LA + MDE < 60

Où :

LA : essai Los Angeles, norme NF P 18573

- MDE : essai Micro Deval, norme NF P 18572

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 8/40 ;
- Autres procédés : en termes de fuseau granulométrique, celui qui est le plus couramment utilisé est le fuseau 20/75.

Tableau I- 2 : Caractéristiques du ballast pour colonnes ballastées [Dhouib et Blondeau 2005]

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	< 20 – 30*	Essai «Micro – Deval» (Norme NF EN 1097-1)
LA + MDE	< 40 – 60*	-
Pourcentage de fines**	< 5 %	-

*valeur limites

**le critère de propreté au ses de la norme NFP 18591 représente le passant à inferieur à 5%

Avantages du procédé :

Les colonnes ballastées apportent bien des avantages par rapport à d'autres solutions.

Comme elles sont réalisées avec un matériau naturel dépourvu de liant, les lois de comportement mécanique sont les mêmes que pour le sol en place ; il en résulte une grande souplesse dans le fonctionnement mécanique, qui va permettre de réaliser les travaux de gros-œuvre aussi simplement que pour un bon sol : pas de problématique de recépage, reprise aisée des sollicitations horizontales

et des moments fléchissant, aucune création de point dur donc pas d'adaptation de ferraillage par rapport à un chantier réalisé traditionnellement avec des fondations superficielles.

En phase chantier, le risque de cisaillement accidentel de la tête de la colonne, dû à la circulation d'engins ou au creusement de tranchées, est supprimé avec la colonne ballastée. Aucune précaution particulière n'est à envisager pour les traitements aux liants : la colonne ballastée est malaxée sans aucune difficulté avec le sol et le liant.

Chapitre II

Mécanisme du comportement et dimensionnement des colonnes ballastées

II.1 introduction :

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

Les mécanismes de fonctionnement des colonnes ballastées dépendent :

- de la disposition des colonnes, colonnes isolée ou en groupe ;
- du mode de chargement, fondation rigide ou souple ;
- du type de colonne (ancrée ou flottante).
- de la nature du sol à amélioré ;
- du matériau employé.

II.2 Principes généraux de fonctionnement :

La colonne ballastée n'agit pas de manière indépendante du sol encaissant : ainsi, il est d'un usage courant de parler du complexe sol-colonne. L'ampleur des deux mouvements, horizontaux et verticaux, est fonction de nombreux paramètres dont le plus important est l'étreinte latérale offerte par le sol lui même, étreinte qui dépend de ses caractéristiques mécaniques. En effet, plus un sol ne sera compétent et moins la colonne va se déformer.

Sous l'effet d'un chargement, la colonne ballastée se déforme, à volume supposé constant, verticalement, phénomène connu sous le terme de tassement, mais en même temps horizontalement, dont le terme est l'expansion latérale, nommée Bulging en Englais . Dans un premier temps, le tassement est du à la compaction du matériau. Dés lors qu'une colonne s'expansé latéralement, le domaine des déformations élastiques est supposé dépassé et l'on entre donc dans celui des déformations plastiques est supposé dépassé et l'on entre transmet une partie des contraintes au sol environnant.

De sorte que deux colonnes se procurent mutuellement une étreinte latérale leur permettant de subir des déformations moins importantes. En effet, il a été remarqué que pour des colonnes disposées en groupes, les colonnes situées à l'intérieur sont confinées et ainsi rigidifiées par les colonnes environnantes (Barksdale et Bachus, 1983) .

Certains auteurs, Morgenthaler (1978), Vautrain(1980), Bachus et Barksdale(1984), etc. Ont remarqué qu'à l'application de la charge, cette dernière se répartissait pour moitié sur le sol et pour moitié sur la colonne. Puis, au fur et à mesure de la consolidation du sol, c'est-à- dire de la dissipation de l'excès de pression interstitielle par écoulement radial vers les colonnes, celles-ci reprennent une part plus importante, de l'ordre de 3à6 fois plus que le sol, de la contrainte totale.

Cependant, Balaam et Poulos (1983) indiquent que dans les sols argileux, à l'état initial du chargement, la contrainte verticale sur l'argile peut être supérieure à celle sur la colonne. Ceci se produit car le sol fin, en l'occurrence l'argile, est non drainé en début de chargement et se comporte ainsi comme un matériau incompressible qui peut être donc plus rigide que la colonne ballastée. La dissipation de l'excès des pressions interstitielles par écoulement radial jusqu'aux colonnes ballastées change la rigidité relative des colonnes ballastées et de l'argile pour finalement, en conditions drainées, faire en sorte que la contrainte verticale sur les colonnes ballastées soit supérieure à celle de l'argile.

Après cette brève description concernant le mode de fonctionnement général des colonnes ballastées, il convient de décrire les différentes dispositions ainsi que les mécanismes de rupture qui gèrent la capacité portante des colonnes ou du sol amélioré. Les colonnes ballastées peuvent être soit isolées, afin de reprendre une charge ponctuelle, soit disposées selon un maillage régulier et constituer ainsi une amélioration en masse, pour réduire les tassements et augmenter la capacité portante du sol compressible.

II.3 Colonne isolée :

II.3.1 Mécanismes de rupture :

Les modes de rupture décris ci-dessous concernent des colonnes mises en place dans une couche homogène de sol compressible. La figure II-1, permet de visualiser les trois modes de rupture d'une colonne ballastées.

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

Les deux premiers modes de rupture sont destinés aux colonnes dont la base repose sur un horizon raide et qui doivent être dimensionnés, selon leurs longueurs et supérieure à quatre fois leurs diamètres D. Le 3eme mode de rupture est destiné aux colonnes « flottantes », qui doivent vérifier une condition supplémentaire de « non poinçonnement ». à l'instar d'un pieu classique.

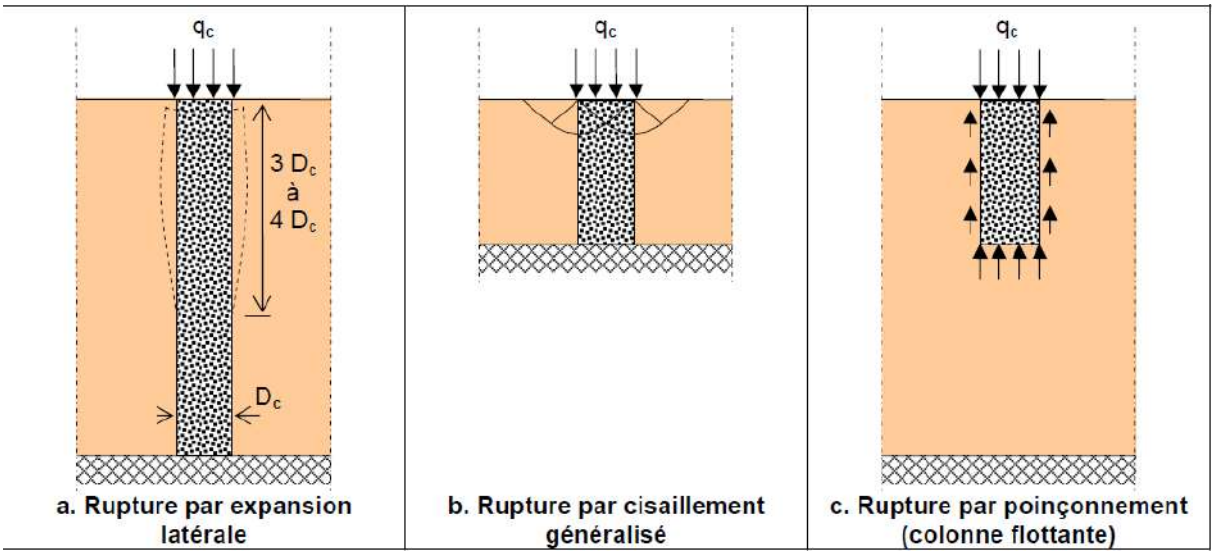


Figure II- 1 : Types de rupture d'une colonne isolée chargées en tête exécutée dans une couche compressible homogène [Datye, 1982]

Cependant, compte tenu de l'hétérogène des sols les modes de ruptures décrits ci-dessus peuvent varier, (figure II-2) (Baksdale et Bachus, 1983). En effet, une rupture par cisaillement se produira si une couche molle est présente en surface, alors qu'une couche très molle en profondeur, dont le rapport épaisseur de couche diamètre de la colonne est inférieur ou égal à 1, deux, une rupture par expansion latérale de la colonne se produira. Cette figure indique que la charge est uniquement appliquée sur la colonne et que, contrairement à la réalité, le diamètre de la colonne est indique sur toute sa longueur et ne varie pas en fonction de la résistance mécanique des couches.

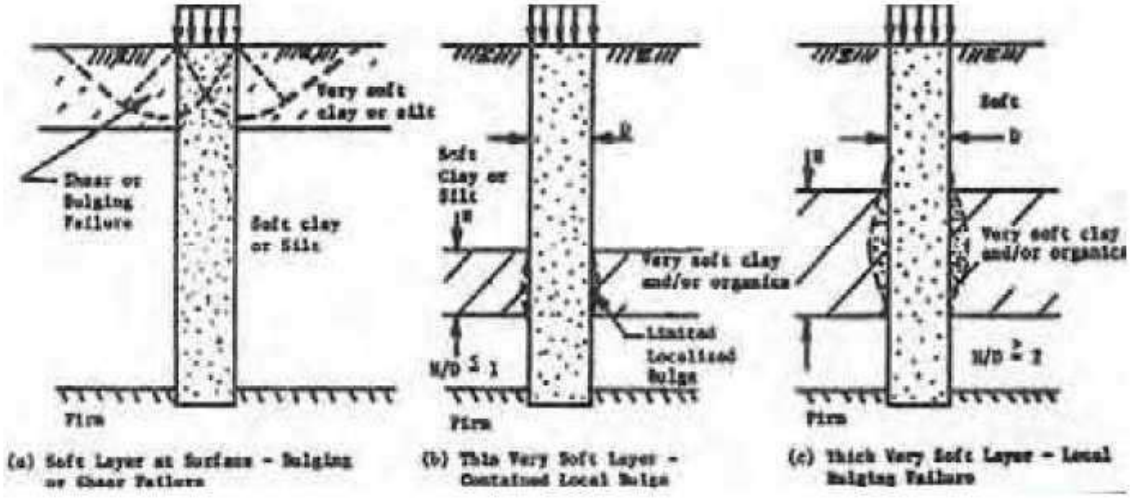


Figure II- 2 : Mécanismes de rupture des colonnes ballastées isolées dans les sols non homogènes [Barksdale et Bachus, 1983]

a) La couche molle est en surface → rupture par cisaillement

b) Une couche très molle en profondeur où le rapport $\frac{D}{H} \leq 1$ → légère expansion latérale

c) Une couche très molle en profondeur où : $\frac{D}{H} \geq 2$ → rupture par expansion latérale

Où :

H : Épaisseur de la couche

D : Diamètre de la colonne

II.3. 2 Comportement d'une colonne ballastée isolée sous chargement statique vertical :

Un paramètre fondamental de l'analyse traditionnelle de l'interaction « sol-structure » est la rigidité relative de la fondation par rapport à celle du sol qu'elle sollicite. Il est raisonnable de penser que ce facteur influe sur le comportement du domaine cylindrique défini précédemment. La figure II-3 donne une idée des mécanismes qui se développent dans le cas d'un radier rigide et d'une charge idéalement souple.

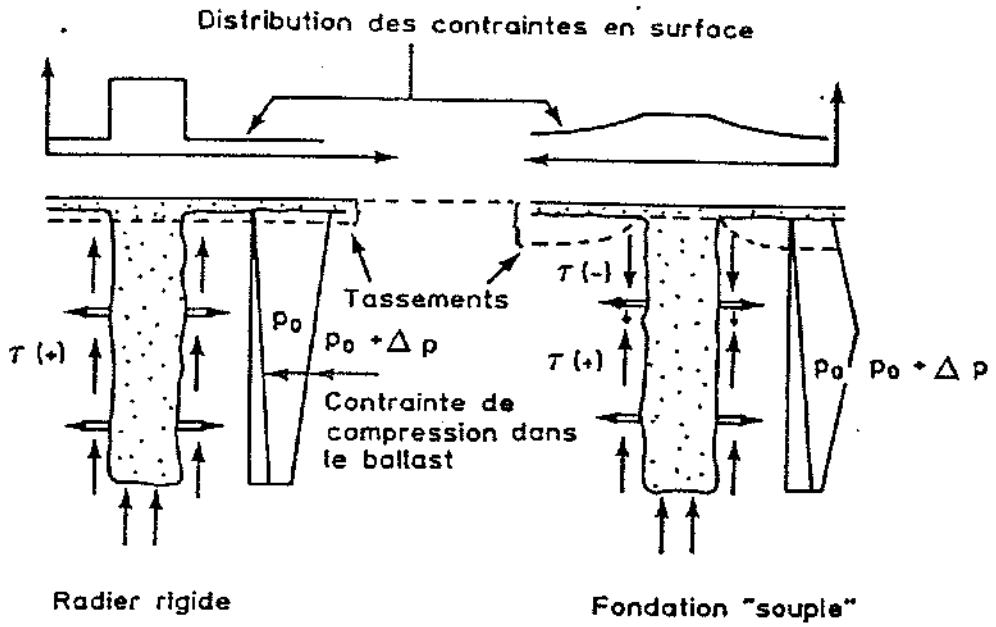


Figure II- 3 : Report des charges sur les colonnes dans le cas d'un radier rigide et d'une fondation souple [Eggestad, 1983]

Mode de déformation latérale :

Comme la (figure II.3) l'indique, la contrainte horizontale totale P_T qui confine le ballast résulte de la contrainte horizontale initiale P_0 qui règne dans le sol et de la contrainte de compression exercée dans le ballast ΔP :

$$P_T = P_0 + \Delta P \qquad \text{(II.1)}$$

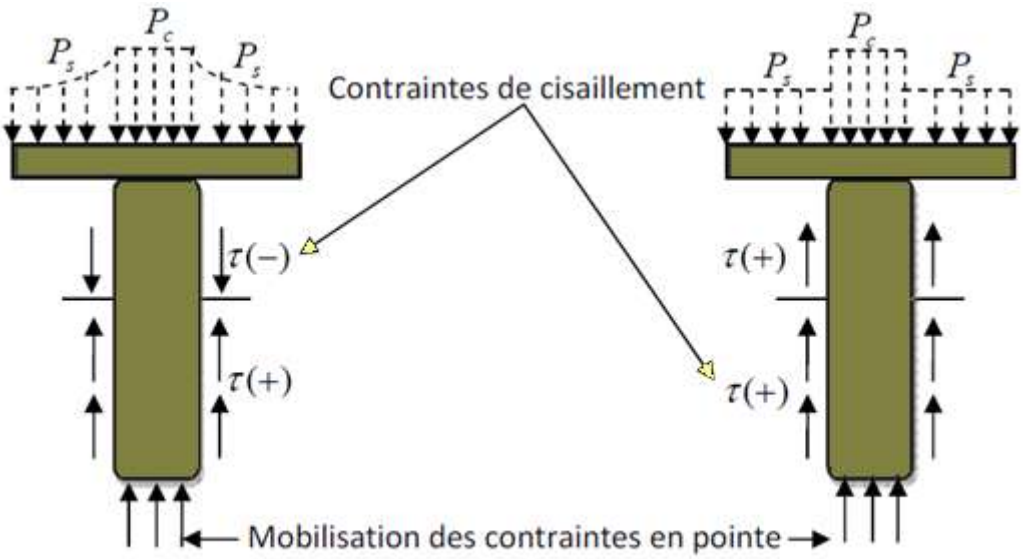
Dans le cas de la fondation rigide (figure II.3), la contrainte totale horizontale décroit linéairement en fonction de la profondeur alors que, dans le cas de la fondation souple (fig II.3), la contrainte totale horizontale augmente jusqu'à une profondeur caractéristique déterminée, puis diminue (effet de l'interaction sol-colonne).

- ***Interaction sol-colonne ballastée :***

L'interaction sol-colonne ballastée (figure II.4) dépend de la rigidité relative de la fondation et du sol d'assise. D'après Eggestad (1983), dans les cas des colonnes courtes (« flottantes ») :

- dans le cas de la fondation souple (figure II.4a), le tassement du sol est plus important que celui de la colonne et le sol a un effet d'entraînement sur le ballast sur une profondeur critique où les contraintes de cisaillement sont négatives (frottement « négatif », Combarieu, 1974 ; Belcotec, 1985).

- dans le cas de la fondation rigide (figure II.4b), les tassements en surface du sol et en tête de la colonne sont identiques ; les contraintes de cisaillement qui s'exercent à l'interface sol/ballast demeurent positives le long de la colonne et le sol a tendance à « freiner » le ballast (frottement « positif »).



a- sou une fondation souple b- sous une fondation rigide

Figure II- 4 : Interaction sol-colonne : répartition des contraintes de cisaillement le long de la colonne ballastée (courte) et effet de pointe [Eggestad, 1983]

Lorsque la colonne atteint un horizon rigide (substratum), les contraintes verticales peuvent être équilibrées principalement en pointe de la colonne. Les mécanismes d'interaction calés sur le mode de fonctionnement d'éléments de fondation profonde rigide (pieux, inclusions rigides, barettes,…etc.), ne sont pas directement applicables à l'interaction sol/colonne ballastée (même courte), qui dépend pour beaucoup de l'expansion latérale du ballast.

II.3.3 Réseau de colonnes ballastées et Principe de la cellule unitaire :

Les contrebutions dus à l'installation des colonnes ballastées sont essentiellement la substitution d'une partie du sol mou par un matériau de meilleures caractéristiques mécaniques et hydrauliques. La concentration sur la colonne des charges transmises par l'ouvrage correspond a un déchargement du sol autour de la colonne, n'est pas immédiate mais se développe au fur et à mesure de l'évolution de la consolidation primaire du sol autour de l'inclusion [B Soyez, 1985].Soit le domaine d'influence cylindrique (figure 1.5) caractérisé par les dimensions *H*, *A*, A_{col} :

Aire de la colonne : $A_{col} = \pi \boldsymbol{D_{col}^2 / 4}$

Aire totale : $A = \pi \ \boldsymbol{D_{ext}^2 / 4}$

$R_{col} = \boldsymbol{D}_{col} / 2$

$R_{ext} = \boldsymbol{D}_{ext} / 2$

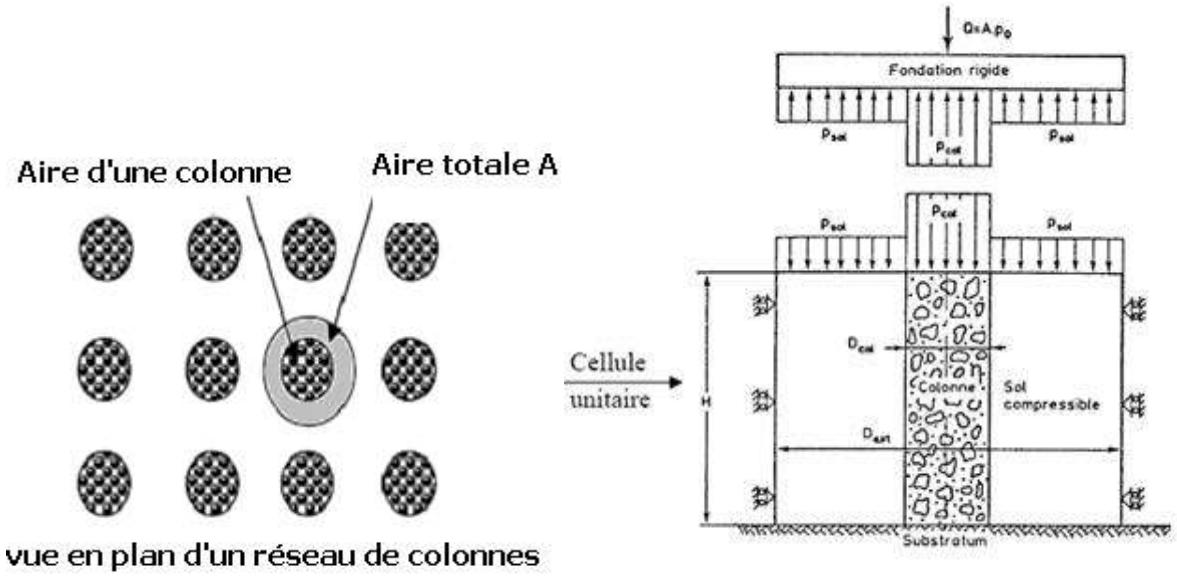


Figure II- 5 : Principe de la cellule unitaire : répartition des contraintes en surface à long terme [Ghionna et Jamiolkowski, 1981]

Le phénomène de concentration des charges sur la colonne est décrit par l'équation suivante :

$$P_0 A = P_{col} A_{col} + P_{sol} (A - A_{col}) \quad \text{(II.2)}$$

Dans laquelle :

P_0 : La contrainte verticale moyenne correspondant à la charge appliquée, uniformément distribuée sur toute la surface de la maille à l'instant initial

P_{sol} : La contrainte verticale appliquée sur le sol autour de la colonne à long terme

P_{col} : La contrainte verticale en tête de colonne à la fin de la consolidation du sol

II.3.4 Méthodes de dimensionnement :

Les théories de l'expansion radiale d'une cavité cylindrique sont à la base du dimensionnement d'une colonne ballastée isolée. Les méthodes de dimensionnement des colonnes ballastées ont été développées en tenant compte d'une colonne isolée ou d'un réseau infini de colonne, du type de fondation, du comportement mécanique des matériaux ainsi que de l'objectif visé (augmentation de

la capacité portante du sol, de sa résistance au cisaillement, de la stabilité globale ou réduction des tassements).

II.3.4.1 Rappel des paramètres intervenant dans le dimensionnement :

II.3.4.1.1 Paramètres à déterminer :

Le dimensionnement des colonnes ballastées est fondé sur le calcul des paramètres suivants :

- le taux d'incorporation a ;
- le rapport de concentration des contraintes n ; et
- le facteur de réduction des tassements β.

II.3.4.2 Dimensionnement des colonnes ballastées par des méthodes empiriques :

II.3.4.2.1 Détermination de l'espacement entre les colonnes :

En négligeant les tassements immédiats et les déplacements générés par les contraintes de cisaillement, Greenwood (1970) propose un abaque de prédimensionnement donnant le facteur de réduction des tassements (*1/β* en *%*) en fonction de l'espacement *d* des colonnes ballastées pour des plages de variation de la cohésion non drainée *Cu* des argiles encaissantes de 20 à 40 kPa (*Figure II .6*).

Pour qu'un sol puisse être considéré comme traité par des colonnes ballastées, et quelle que soit l'action recherchée, la maille de référence la plus grande doit être de 9 m2 d'une part, et, le taux de substitution doit être supérieur à 3 % d'autre part.

Pour une semelle filante comportant une seule rangée de colonnes et dépourvue de matelas de répartition, l'entraxe maximal sans justification spécifique est de 2.5 m.

La maille de référence minimale est de 2,4 m2. Pour les semelles filantes et les groupes de 2 à 5 colonnes, l'espacement entre axes de colonnes n'est pas inférieur à 1,5Ø et 1,20 m.

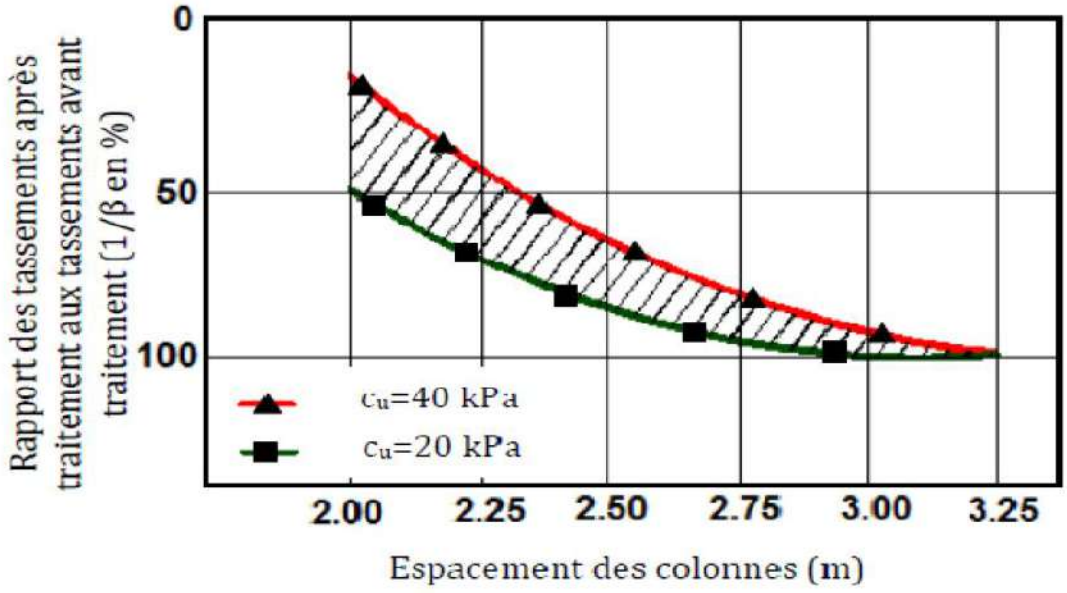


Figure II- 6 : Détermination de l'espacement des colonnes en fonction de la résistance du sol autour de la colonne (Greenwood, 1970)

II.3.4.2.2 Prévision de la capacité portante et du diamètre de la colonne :

En 1968, Thorburn et Mac Vicar avaient proposé une règle de dimensionnement graphique des colonnes ballastées, ils ont élaboré des abaques simples permettant la détermination du diamètre et la capacité portante de la colonne en fonction de la résistance du sol encaissant (*Figure II.7*).

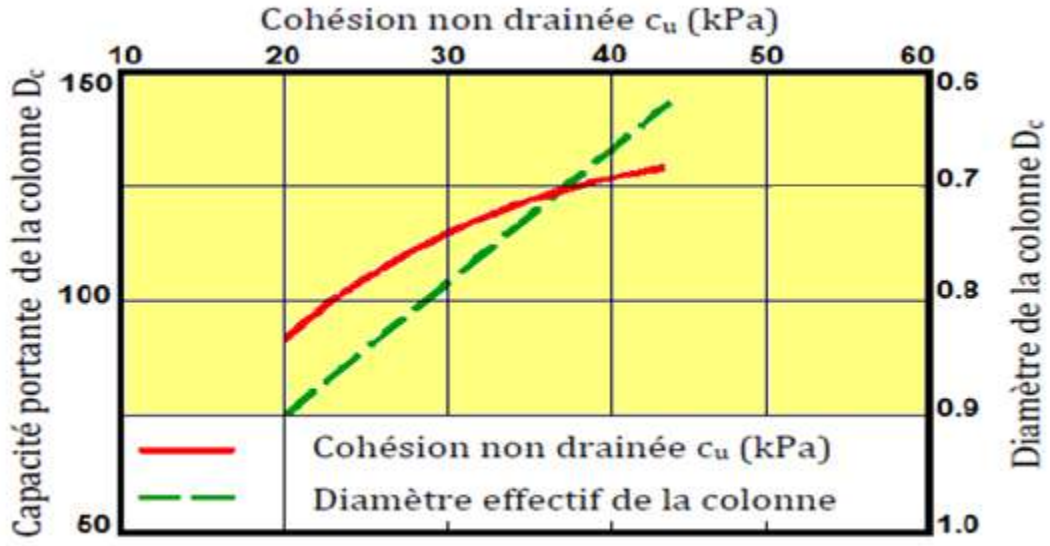


Figure II- 7 : Détermination de la capacité portante et du diamètre effectif en fonction de l'étreinte latérale du sol encaissant (Thorburn, 1975)

II.3.4.3 Dimensionnement des colonnes ballastées par des méthodes analytiques :

II.3.4.3.1 Dimensionnement des colonnes ballastées « isolées » chargées en tête :

a- Charge limite en tête d'une colonne ballastée :

Les colonnes dont la base repose sur un horizon raide doivent, selon que leur longueur est supérieure à quatre fois leur diamètre, être dimensionnées vis-à-vis d'une rupture par expansion latérale de la colonne.

La rupture par cisaillement généralisé doit être vérifiée pour les colonnes courtes reposant sur un horizon raide.

Les colonnes flottantes doivent quant à elles vérifier une condition supplémentaire de « non poinçonnement », à l'instar d'un pieu classique.

b- Mise en équation de la rupture pour expansion latérale :

Cette théorie repose sur une analogie entre la colonne et une éprouvette de matériau pulvérulent (de même angle de frottement φ_c que le ballast) subissant une compression triaxiale sous une contrainte de confinement égale à la résistance latérale maximale offerte par le sol entourant la colonne, à la profondeur ou ses caractéristiques mécaniques sont minimales.

Le caractère drainant du ballast fait que l'on raisonne en contraintes effectives à l'intérieur de la colonne, ce qui permet d'écrire :

$$\sigma'_{v\,lim} = tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{col}}{2}\right)\sigma'_{h\,max} =$$

$$K_{pcol}\sigma_{h\,max} \qquad \text{(II.3)}$$

$\sigma'_{v\,lim}$: la contrainte verticale agissant sur la colonne à l'instant de rupture.

K_{pcol} : le coefficient de butée du ballast.

σ'_{hmax}: La contrainte effective maximale que le sol peut supporter autour de la colonne.

L'expansion latérale de la colonne a été précisément confrontée à celle d'une sonde pressiomètrique, ce qui permet de poser :

$$\sigma_{hmax} = P_{lim} - u \qquad \text{(II.4)}$$

Avec :

P_{lim}: Pression limite du sol ambiant,

u : Pression interstitielle à la périphérie de la colonne.

Les différentes formulations proposées dans la littérature sont autant d'expressions analytiques possibles de la pression limite du sol ambiant, donc nous avons sous la forme générale :

$$\boldsymbol{p_{lim} = \left(\sigma'_{h_0} + u_0\right) + kc_u} \qquad \text{(II.5)}$$

Avec :

$\boldsymbol{\sigma'_{h_0}}$: Contrainte effective horizontale existant dans le sol avant la réalisation de la colonne ;

c_u : Résistance au cisaillement non drainé du sol ;

k : Coefficient multiplicateur

Le tableau II.1 permet de définir le coefficient multiplicateur *k* selon divers auteurs :

Tableau II- 1 : Définition du coefficient multiplicateur *k* selon divers auteurs

Expression de k	Auteurs	Remarques
$\boldsymbol{k = 1 + \ln \frac{E_{sol}}{2(1+\nu_{sol})c_u}}$	Hughes et Withers (1974)	Wroth et Hughes ont conseillé d'adopter k=4 au vu d'essais drainés réalisés avec le pressiomètre autoforeur de cambridge (camkmètre)
$\boldsymbol{k = (1 + \ln I_r)}$ $\boldsymbol{I_r = \frac{E_{sol}}{3c_u}}$	Brauns (1978 a)	Cette formule est déduite des travaux de Vesic sur l'expansion des cavités cylindriques dans les milieux cohérents, dans laquelle *I r* est un indice de rigidité d'un sol lors d'une sollicitation non drainée
k = 6,18	Nahrgang (1976)	Cette valeur est le résultat des essais de laboratoire sur modèle réduit de colonne

c- Mise en équation de la rupture par cisaillement généralisé :

Le paramètre fondamental de ce type de calculs est l'angle de frottement φ_{col} du matériau constitutif de la colonne [B Soyez, 1985]. Dans le cas d'un ballast, mis en place par un vibreur type Keller, une valeur prudente de 38° est couramment recommandée [Schulze, 1978].

Mise en équation de la rupture par cisaillement généralisé

D'après Brauns (1978 a, b et 1980) la mise en équation de la rupture par cisaillement généralisé est inspirée de la rupture axisymétrique d'un volume de matériau composite « sol-ballast » limité par une surface tronconique centrée sur l'axe de la colonne, cette contribution a pour but de pouvoir prendre en compte une surcharge *q* appliquée à la surface du sol, autour de la fondation placée en tête de la colonne .

$$h = 2R_{col}\tan\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi_{col}}{2}\right) \quad \text{(II.6)}$$

Caractérisation de la surface de rupture [Brauns, 1978 a]

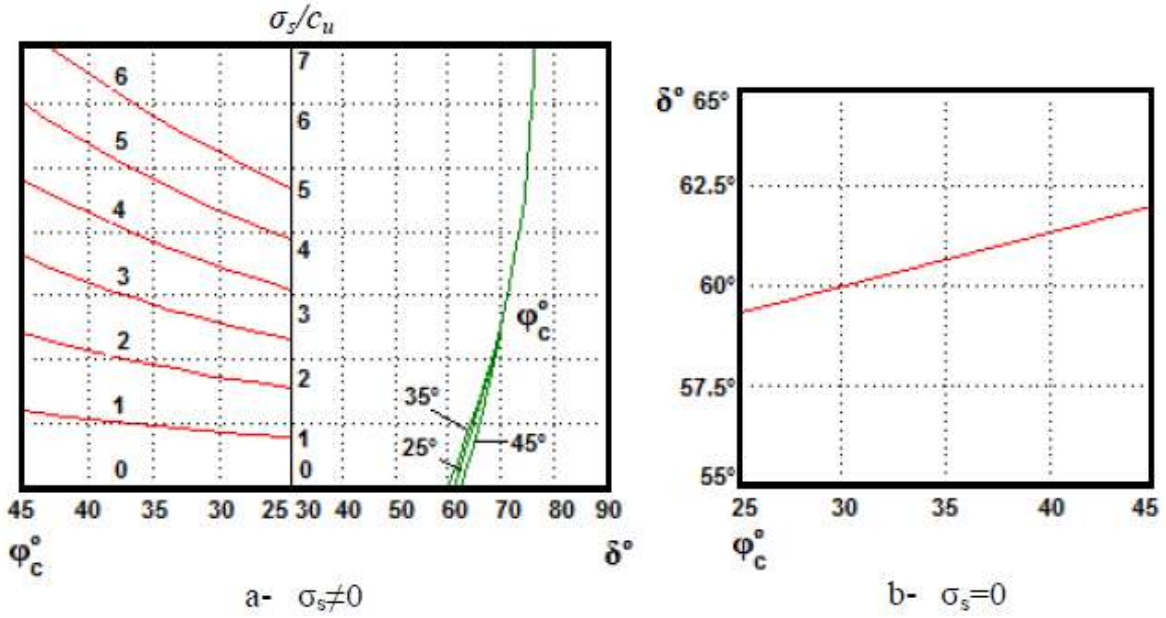


Figure II- 8 : Détermination pratique de δ (Brauns, 1978b)

Mise en équation de la rupture par poinçonnement d'une colonne flottante :

Hughes et al (1975) et Brauns (1980), ont considéré que la colonne travaillait comme un pieu rigide avec développement d'un effort de pointe et d'un frottement latéral positif. L'hypothèse faite que la résistance au cisaillement mobilisée sur la périphérie de la colonne est égale à la résistance au cisaillement non drainé c_u du sol. La cohésion non drainée c_u sera supposée constante sur toute l'épaisseur de la couche compressible.

Considérons la colonne ballastée (Y□,R_{col}) montrée dans la figure II.8, la contrainte verticale régnante à la profondeur *z* à l'intérieur de la colonne est :

$$\sigma_{v,z} = \sigma_{v,0} + z\left(□ - 2\frac{c_u}{R_{col}}\right) \quad \text{(II.7)}$$

Où :

$\sigma_{v,0}$: la contrainte verticale appliquée en tête.

Pour éviter le poinçonnement Il existe une longueur minimale (□L_{min}□□) de la colonne, qui peut déterminer en considérant que :

$\sigma_{v,Lmin} = \sigma^*$ □□□□□□□□□□en pointe mobilisable par la couche du sol, donc :

$\sigma_{v,Lmin} = 9\ c_u$ valeur admise dans les dimensionnements des pieux traditionnels.

Si l'on néglige le poids propre du ballast, L_{min} est donné par la relation :

$$L_{min} = \frac{1}{2}R_{col}\left(\frac{\sigma_{v,0}}{c_u} - 9\right) \quad \text{(II.8)}$$

Au même temps, il existe une longueur L_{max}, caractérisé par $\boldsymbol{\sigma_{v,Lmax}}$ =0 au-delà de laquelle le traitement sera inutile.

Si le poids propre du ballast est négligé, L_{max} est égal à :

$$L_{max} = \frac{1}{2} R_{col} \frac{\sigma_{v,0}}{c_u} \quad \square$$

(II.9)

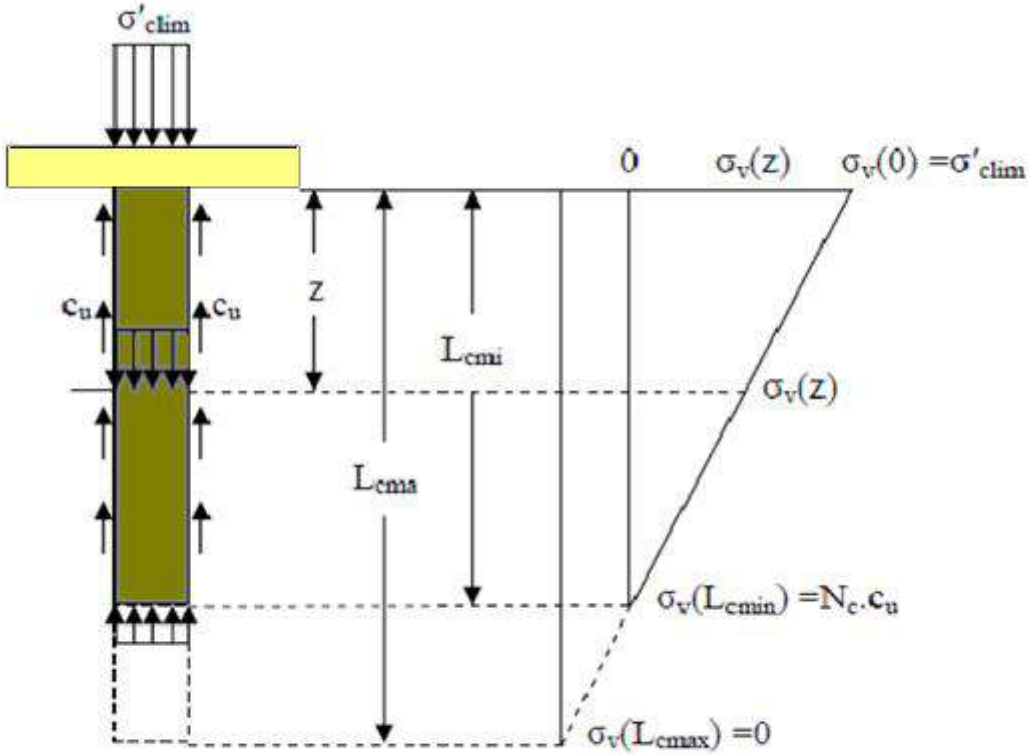


Figure II- 9 : Définition des longueurs Lmin et Lmax d'une colonne ballastée Vis-à-vis de la rupture par poinçonnement (Brauns 1980)

La profondeur de traitement sur le terrain, sera finalement déterminée en fonction de L_{min} et L_{max}.

II.3.4.3.2 Etude du tassement d'une colonne ballastée :

a- ***Application des travaux de Mettes et Poulos (1969)***

Pour estimer les tassements d'une colonne isolée chargée en tête, Greenwood et Kirsch (1983) ; Madhav (1982) et appliquent les travaux développés par Mattes et Poulos (1969) pour les pieux traditionnels, travaux dont l'originalité tient à ce qu'ils prennent en compte la compressibilité propre du pieu. Cette méthode admet que la charge ne s'applique pratiquement que sur l'inclusion,

et que les tassements immédiats pseudo-élastiques de celle-ci constituent la majeure partie de sa déformation finale.

La formule développée pour les pieux par Mattes et Poulos (1969) soit :

$$\boldsymbol{s} = \frac{\boldsymbol{p}}{\boldsymbol{L}.\boldsymbol{E_{sol}}}\, \boldsymbol{I_p} \qquad \text{(II.10)}$$

Où :

S : Le tassement en tête de la colonne,

L : Longueur de la colonne,

P : La charge appliquée a celle-ci,

E_{sol} : Le module d'élasticité de sol,

I_p: Facteur d'influence dépendant du facteur de rigidité relative k ,

$$\boldsymbol{k} = \frac{\boldsymbol{E_{col}}}{\boldsymbol{E_{sol}}} \qquad \text{(II.11)}$$

Où :

E_{col} : Le module d'élasticité de la colonne.

L'abaque indiqué dans la figure II.10 permet de déterminer les valeurs de I_p en fonction de k et du rapport $\frac{\boldsymbol{L}}{\boldsymbol{d}}$.

Dans ce cas de chargement, il convient de rappeler que la fondation ne s'applique pratiquement que sur l'inclusion, et que les tassements immédiats pseudo-élastiques de celle-ci constituent la majeure partie de sa déformation finale [Greenwood et Kirsch, 1983]. Les tassements immédiats et finals peuvent être évalués en introduisant les valeurs des modules drainés et non drainés du sol et de la colonne dans la formule développée par Mattes et Poulos.

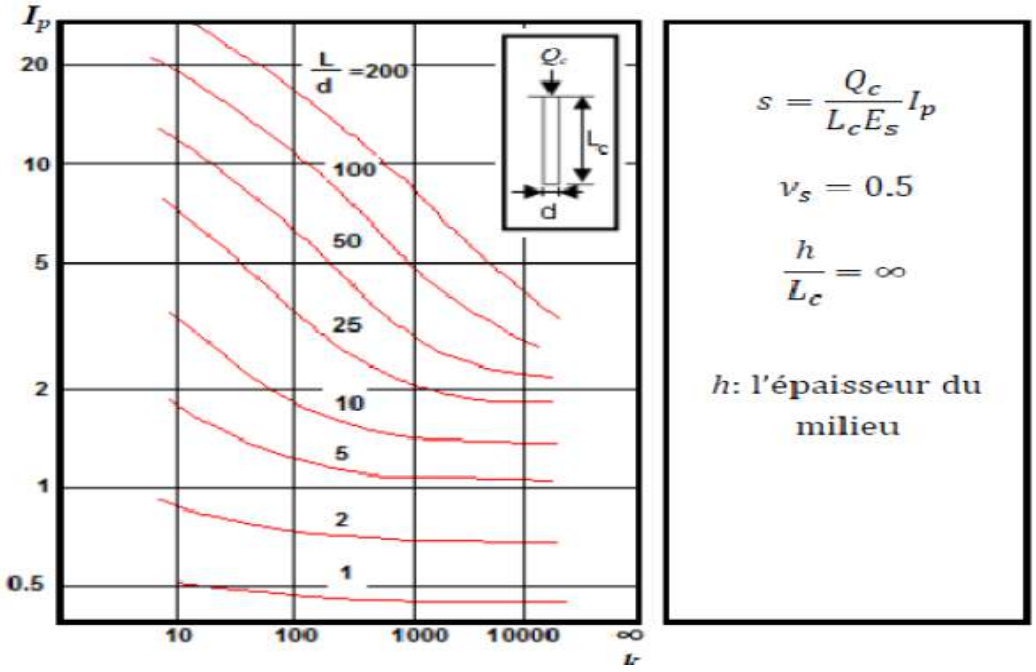


Figure II- 10 : détermination les valeurs de I_p en fonction de *k* et du rapport $\frac{L}{d}$.

II.4 Dimensionnement d'un réseau de colonnes ballastées :

En pratique, les colonnes ballastées sont disposées (figure II.11) :

a- selon un maillage triangulaire ;

b- selon un maillage carré ;

c- selon un maillage hexagonal.

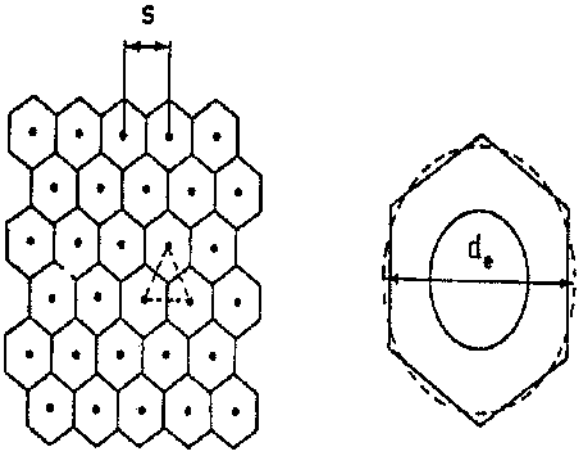
Pour un espacement *S* entre colonnes, l'équivalence entre la section de la maille et le cylindre équivalent de diamètre d_e conduit à :

- maille triangulaire (figure II.10 a) : $d_e = \left(\frac{12}{\pi^2}\right)^{1/4}$ S= 1.05 *S*.

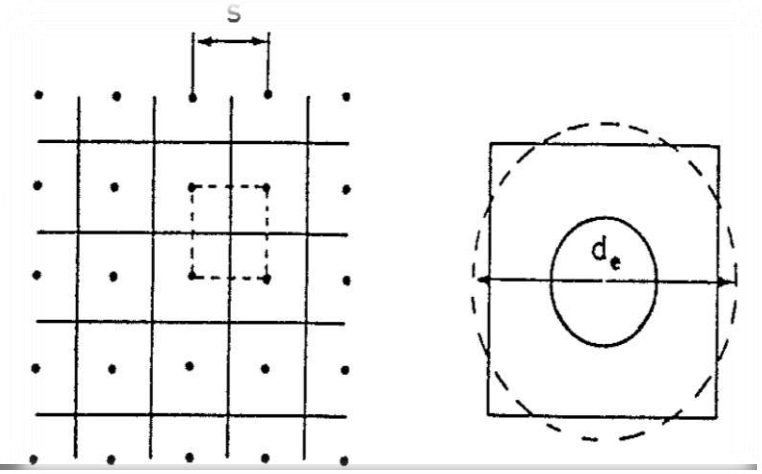
- maille carrée (figure II.10 b) : $d_e = \left(\frac{16}{\pi^2}\right)^{1/4}$ S= 1.13 *S*.

- maille hexagonale (figure II.10 c) : $d_e = \left(\frac{27}{\pi^2}\right)^{1/4}$ S= 1.29 *S*.

a- Maille triangulaire



b- Maille carrée



c- Maille hexagonale

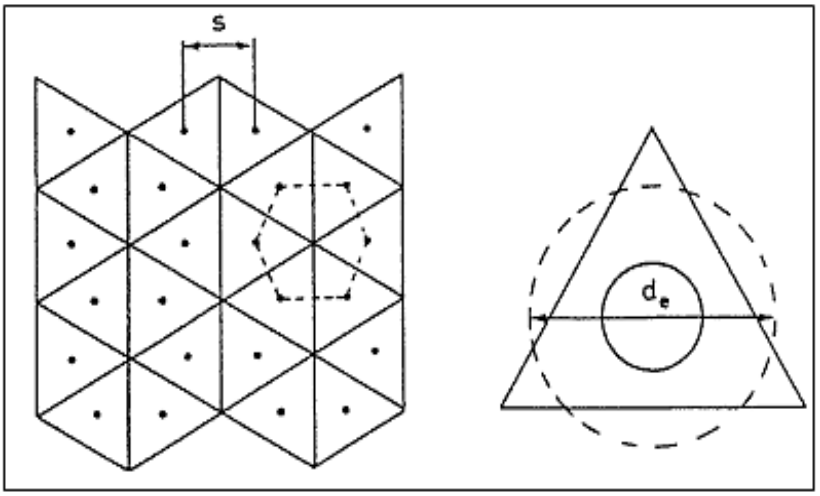


Figure II- 11 : Réduction du problème pour l'étude des réseaux de colonnes ballastées [Balaam et Poulos, 1983]

II.5 Principe de calcule :

Les colonnes ballastées permettent de réduire les tassements puisque elles s'avèrent plus rigide que le sol environnant. Lorsque la colonne est mise en charge, le rapport de rigidité entre elle et le sol environnant dépend considérablement de la réaction latéral du au sol environnant ; ce phénomène est résultat de la déformation latérale de la colonne. A la profondeur « z » cette latéral (du support cohésif) de cohésion « Cu » est exprimée comme :

En prenant un coefficient de pression passive égal à : $k_p = (\frac{\pi}{4} + \frac{\boldsymbol{\varphi'}}{2})$

On peut évaluer la pression verticale max. Dans la colonne :

Avec « Q » l'angle de frottement interne du matériau de la colonne ballastée

Le facteur d'amélioration << n0 >>, peut être déterminé à l'aide de :

$$N_0 = 1 + \frac{Ac}{A}\left[\frac{1}{A_{ac}\frac{1-A_c}{A}} - 1\right] \qquad \text{(II.12)}$$

Avec : $K_{ac} = A_{ac}\,\boldsymbol{tan^2}(\frac{\pi}{4} - \frac{\boldsymbol{\varphi_c}}{2})$

Ou :

A : l'aire de la maille de compactage ; Ac = section de la colonne ; c = angle de frottement interne du matériau de la colonne. Avec un coefficient de poisson pris égal à 0 ,5 .

Calculs :

La contrainte admissible à la base de la colonne peut etre estimée à l'aide de :

$$q_a = \frac{\boldsymbol{K_P}}{\boldsymbol{S_F}}(4c + \boldsymbol{\sigma}_r') \qquad \text{(II.13)}$$

Ou :

$K_p = \tan(45° + \boldsymbol{\varphi'}/2)$

$\boldsymbol{\varphi'}$= angle de frottement interne de pierre ;

C= soit la cohésion drainée (faible espacement de colonnes) soit la résistance au cisaillement non drainée Su pour un espacement supérieure à 2m ;

$\boldsymbol{\sigma}_r$'= contrainte radiale effective préssiomètrique (la prendre égale à 2c en cas d'absence de données préssiomètriques)

S_f = facteur de sécurité pris égal de 1,5 à 2 ;

La charge P_a admissible P_a sur la section moyenne de la colonne ($A_c = 0.7854D^2_{col}$) est donnée par : $P_a = q_a A_c$

Dans le cas général pa est prise égale à :

$$P_a = (c_s A_s + A_c C_p N_c)$$

Ou :

C_s = cohésion surfacique dans argile (drainée)

C_s = résistance surfacique ($\gamma z K \tan \delta$) dans le sable

C_p = cohésion à la base

A_s = périmètre moyen de la colonne.

Le calcul de A_s dépend du volume en place de la pierre V_c et de la profondeur initiale de la colonne L_c soit :

$$A_c L_c = 0,7854\ D^2_{col}\ L_c = V_c ;$$

Et : $D_{col} = \sqrt{\frac{V_c}{0,7854\ L_c}}$;

Alors ; $As = \pi . D_{col} . L_c$

N_c = facteur de portance ; pour les argiles :

- Si $L_c / D_{col} > 3 \rightarrow 5,14 < N_c < 9$

- Si $L_c / D_{col} < 3 \rightarrow N_c = 9$

La charge totale de la fondation sera égale à la totalité des transmise par chaque colonne.

En présence d'une couche molle on doit vérifier le gonflement et atteindre la couche

Résistante. La charge ultime au gonflement « Pult » est exprimée par :

$$Pult \leq \pi\, D_{col}\, L_c c_s$$

$$A_c = 0.785 D^2_{col}\,;$$

En résolvant par rapport à L_c on obtient :

$$L_c = \frac{Pult - 0{,}07\, d_p D^2_{col}}{\pi\, D_{col} C_s} \qquad \text{(II.15)}$$

II.6 Conclusion :

L'éventail des méthodes de calcul disponibles est actuellement suffisant pour permettre une évaluation correcte des divers paramètres nécessaires au dimensionnement d'un projet de renforcement par colonnes ballastées.

Chapitre III

Modélisation d’une colonne ballastée avec logiciel PLAXIS

III.1 Introduction :

On s'intéresse ici au comportement d'un sol renforcé par colonne ballastée. Nous avons modélisé à l'aide du logiciel PLAXIS des essais sur des échantillons de sol sans colonne et des échantillons constituant un sol renforcé par colonne dont le déviateur de contrainte est appliqué sous forme d'un chargement. Il s'agit d'une colonne de 15 m de longueur et de 1 m de diamètre fiché dans une fois de l'argile et une autre fois du sable.

III.2 Le programme de calcul :



Cette icône représente le programme de calcul (*Calculations*). Celui-ci contient les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis. Au début du programme de calcul, l'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs vont être définis. Il n'est pas nécessaire de choisir un projet quand on clique sur le bouton *Calculate* depuis la fenêtre des conditions initiales du programme d'entrée des données. Dans ce cas, le projet en cours est automatiquement sélectionné dans le programme de calcul. Après la sélection (automatique) d'un projet, la fenêtre principale du programme de calcul apparaît.

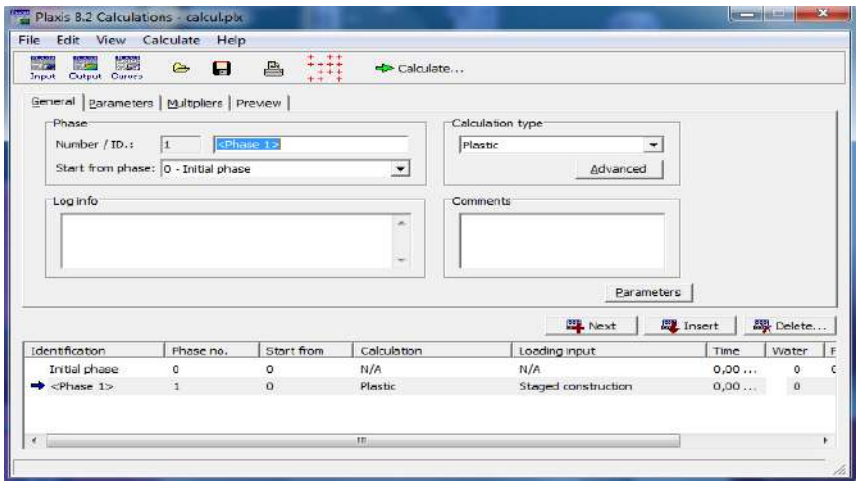


Figure III- 1 : Fenêtre principale du programme de calcul.

La fenêtre principale du programme de calcul comporte les points suivants :

- ***Le menu de calcul* :** Le menu de calcul permet l'accès à toutes les options du programme de calcul. La plupart des options sont également accessibles par des icônes situées dans la barre d'outils.

- ***La barre d'outils* :** La barre d'outils contient les icônes qui peuvent être utilisées comme raccourci pour les options du menu. La fonction associée à chaque icône est affichée dès que le pointeur de la souris est placé sur celle-ci.
- ***Les onglets (partie supérieure de la fenêtre) :*** *Les onglets permettent de définir et* pré visualiser une phase de calcul
- ***Liste des phases de calcul (partie inférieure de la fenêtre) :*** Cette liste donne une vue d'ensemble de toutes les phases de calcul d'un projet. Chaque ligne correspond à une phase particulière.

Quand la phase de calcul n'a pas encore été calculée, il n'y a aucun numéro de pas. Une phase de calcul sélectionnée pour être calculée est signalée par une flèche bleue (➡) en face de la ligne. Les phases de calcul calculées avec succès sont marquées d'une coche verte (✓), alors que celles pour lesquelles le calcul n'a pas pu être mené jusqu'au bout sont indiquées par une croix rouge (✗).

- **Définition d'une phase de calcul :**

Considérons un nouveau projet pour lequel aucune phase de calcul n'a encore été définie. Dans ce cas, la liste des calculs ne contient qu'une seule ligne référencée phase initiale (*Initial phase*) pour laquelle le numéro de phase est 0. Cette ligne représente la situation initiale du projet telle que définie par les conditions initiales du programme *Input*. La phase initiale est le point de départ pour les calculs ultérieurs. Pour introduire la première phase de calcul du projet en cours, il suffit d'appuyer sur le bouton *Next* situé au-dessus de la liste des phases ; une nouvelle ligne apparaît alors. L'option *Next phase* peut également être sélectionnée à partir du menu *Edit*. Lorsque le programme de calcul a été lancé à partir du menu des conditions initiales dans le programme d'entrée des données en cliquant sur le bouton *Calculate*, la première phase de calcul, non définie, a été automatiquement introduite.

Lorsqu'une nouvelle phase de calcul est introduite, celle-ci doit être définie. Les onglets *General*, *Parameters* et *Multipliers* dans la partie supérieure de la fenêtre principale, sont prévus à cet effet. En appuyant sur les touches *Enter* ou *Tab* du clavier après l'entrée de chaque paramètre, l'utilisateur est guidé vers chacun des autres paramètres.

La plupart d'entre eux ont une valeur par défaut, ce qui simplifie l'entrée des données.

En général, seuls quelques paramètres doivent être définis pour une phase de calcul.

Quand tous les paramètres ont été définis, l'utilisateur peut choisir de définir une autre phase de calcul ou de lancer le processus de calcul. L'introduction et la définition d'une autre phase de calcul se fait de la même manière que précédemment. Le processus de calcul se lance en cliquant sur le bouton *Calculate* de la barre d'outils ou en sélectionnant l'option *Current project* du menu *Calculate*. Il n'est pas nécessaire de définir toutes les phases de calcul avant le début du processus de calcul puisque le programme permet de définir de nouvelles phases de calcul après que les précédentes ont été calculées.

III.3 Caractéristiques générales des calculs :

Les données introduites à l'aide de l'onglet *General* permettent de définir les caractéristiques générales d'une phase de calcul (Figure III .1).

- ***Phase :***

Les divers éléments du groupe *Phase* peuvent être utilisés pour identifier une phase de calcul et pour déterminer l'ordre des phases de calcul en sélectionnant celle qui sera prise comme point de départ pour chaque étape de calcul. Donc on détermine deux phases de calcul, une avec déplacement et l'autre sans déplacement.

- ***Type de Calcul :***

Les choix faits dans les deux cases du groupe *Calculation type* déterminent le type de calcul utilisé, pour notre cas d'étude un calcul plastique (*Plastic*) doit être sélectionné pour réaliser une analyse en déformations élasto-plastiques pour laquelle il n'est pas nécessaire de prendre en compte la dissipation des surpressions interstitielles avec le temps.

- ***Comments et log info:***

La case *Log info* affiche les messages générés pendant le calcul aux éléments finis. La case *Comments* permet de stocker les informations relatives à une phase de calcul en particulier.

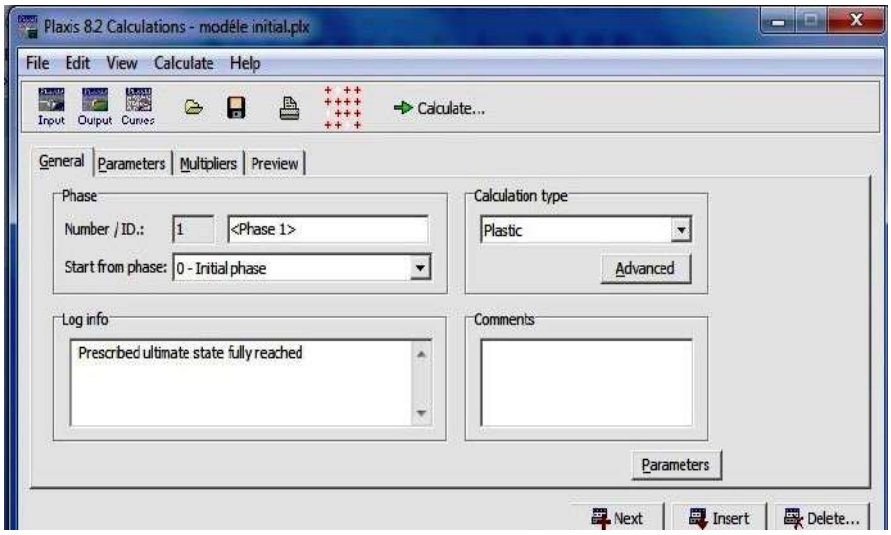


Figure III- 2 : Onglet *General* de la fenêtre de calcul.

III.4 Procédures d'application du chargement :

Quand la plasticité du sol est prise en compte dans un calcul aux éléments finis, les équations ne sont plus linéaires, ce qui signifie que chaque phase de calcul doit être résolue de manière itérative, par l'application de plusieurs pas de chargement. Un élément important de la procédure de résolution non linéaire est le choix de la taille des pas et du type d'algorithme à utiliser.

Dans PLAXIS, plusieurs procédures sont disponibles pour la résolution des problèmes de plasticité non linéaire. Toutes les procédures sont basées sur une sélection automatique de la taille des pas de calcul.

Les procédures d'application du chargement sont contrôlées par un certain nombre de paramètres de contrôle du calcul. Il existe un réglage par défaut pour la plupart des paramètres de contrôle, qui correspond à un bon compromis entre la robustesse, la précision et l'efficacité du calcul. Les utilisateurs peuvent influencer la procédure automatique de résolution en ajustant manuellement les paramètres de contrôle. Il est possible ainsi d'avoir un contrôle plus strict de la taille des pas de calcul et de la précision du calcul. Avant de s'intéresser aux paramètres de contrôle des calculs.

III.5 Paramètres de contrôle du calcul :

L'onglet *Paramèters* est employé pour définir les paramètres de contrôle d'une phase de calcul et de la procédure de résolution correspondante (Figure III.3).

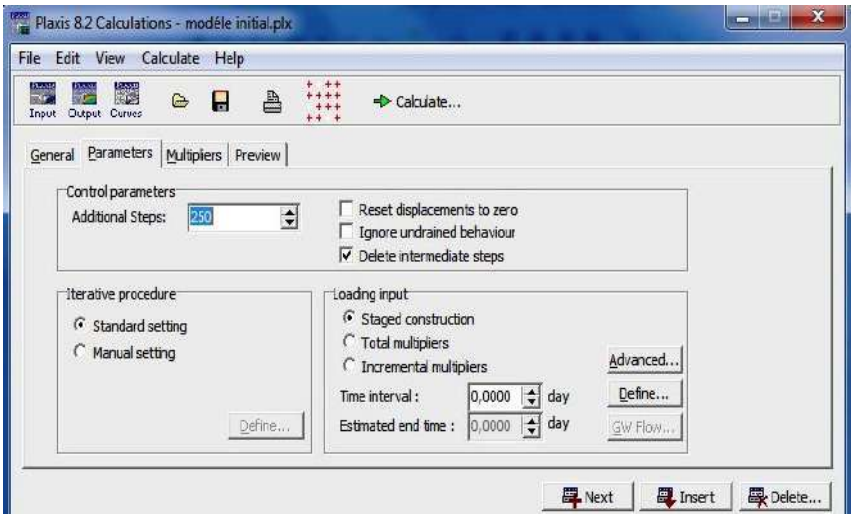


Figure III- 3 : Onglet *Paramètres* de la fenêtre de calcul.

III.5.1. Les pas additionnels (Additional steps) :

Ce paramètre précise le nombre maximum de pas de calcul (pas de chargements) réalisés dans une phase de calcul.

Par défaut, le paramètre *Additional steps* est fixé à 250, ce qui est généralement suffisant pour réaliser une phase de calcul. Cependant, ce nombre peut être changé dans l'intervalle 1 à 1000.

III.6 : Le programme courbe (curves) :



Cette icône représente le programme Curve . Ce programme contient toutes les options nécessaires pour générer des courbes charge-déplacement, Au début du programme Curves, il faut choisir entre ouvrir une courbe existante et en créer une nouvelle. Si New chart est sélectionné, la fenêtre 'curve generation' apparaît, dans laquelle les paramètres de génération de courbes sont réglés.

III.7 Le calcul :

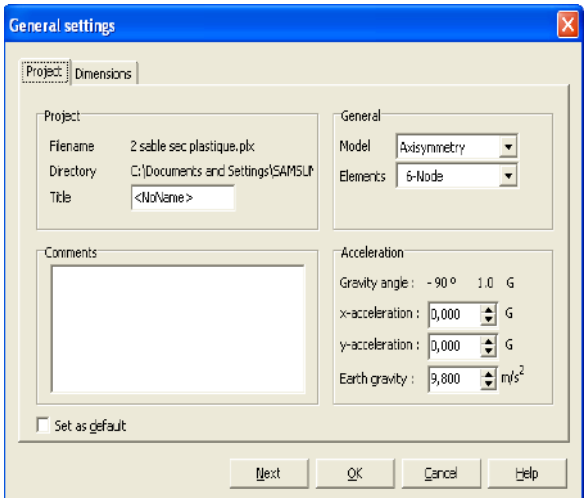
III.7.1. jeux des données :

Le modèle de référence est limité à un demi-espace. Il présente une extension latérale de 20 m, depuis l'axe de l'ouvrage et descend verticalement jusqu'à 20 m au-dessous de la surface du sol. On choisit dans le menu « general setting »

- Axysymetrie ;
- 06 Nœuds ;
- Maillage de 25*25 m.

On peut alors rentrer les différents points :

- La coordonnée x ;
- La coordonnée y.



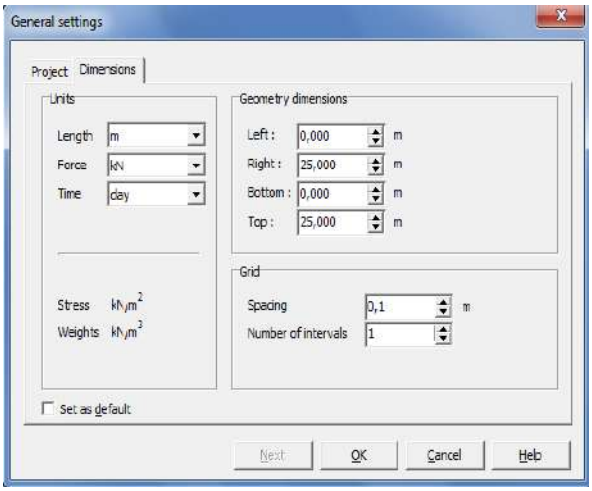
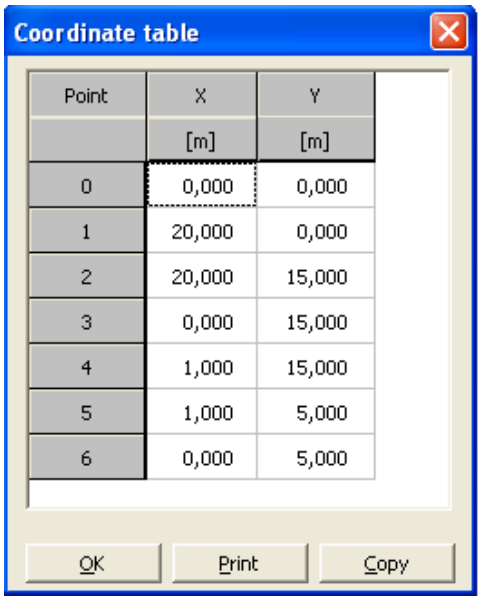


Figure III- 4 : caractéristiques générales du modèle. **Figure III- 5 :** taille du maillage.

Les coordonnées des différents points du modèle sont données ci dessous (figure III.6 et III.7) :



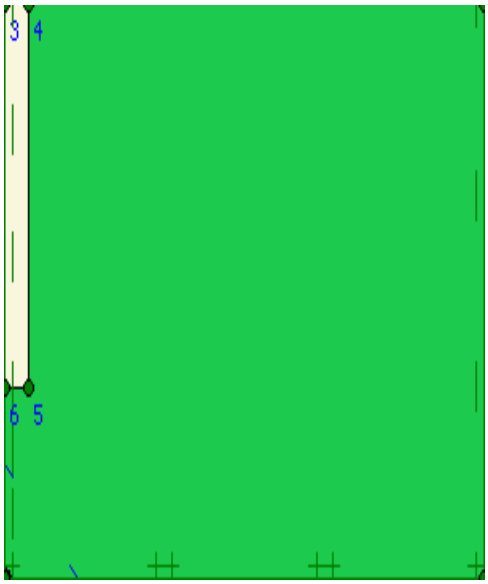


Figure III- 6 : coordonnées.

Figure III- 7 : première vue.

On applique :

- **Les conditions aux limites standards :**

Pour les conditions aux limites on applique « horizontal fixities » sur la limite gauche du modèle

Le chargement :

Deux systèmes de charge vont permettre de représenter la phase de consolidation puis la phase de cisaillement :

- Load A

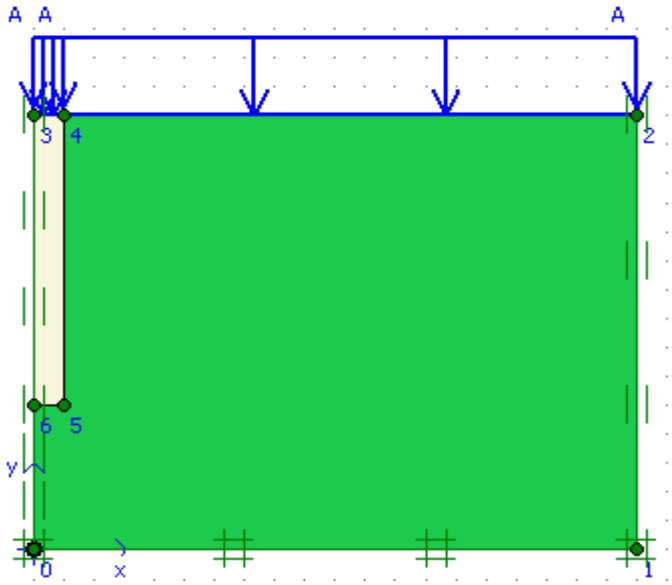


Figure III- 8 : Modèle utilisé pour le calcul.

III.7.2. Paramètre des matériaux :

- Le tableau suivant présente l'ensemble des propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans les modélisations :

Tableau III- 1 : les propriétés mécaniques des matériaux.

Paramètres	Argile saturée	Sable sec	Le ballast
γ_{sat} (KN/m^3)	20	20	19
γ_{Unsat} (KN/m^3)	16	18	17
φ °	1	31	21
C (KN/m²)	30	0,1	8
ψ°	0	1	0
E (KN/m²)	5.10E4	1,5.10E4	1,5.10E7
ν	0,35	0,3	0,30
Material type	Undrained	Drained	Drained

III.7.3. pour l'argile sans colonnes ballastées :

- **Saisie des paramètres :**

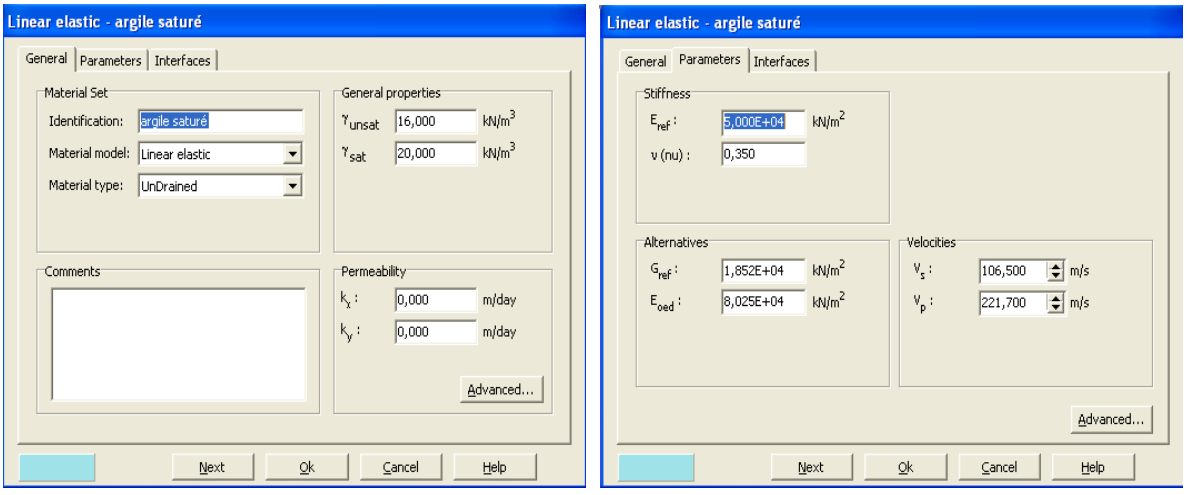


Figure III- 9 : fenêtre des caractéristiques générales relative à la couche de sol (argile).

- **Le Maillage :**

On peut alors lancer la génération automatique du maillage: on raffinera le modèle avec un maillage global ensuite dans la colonne avec (mesh cluster), (figure III.10).

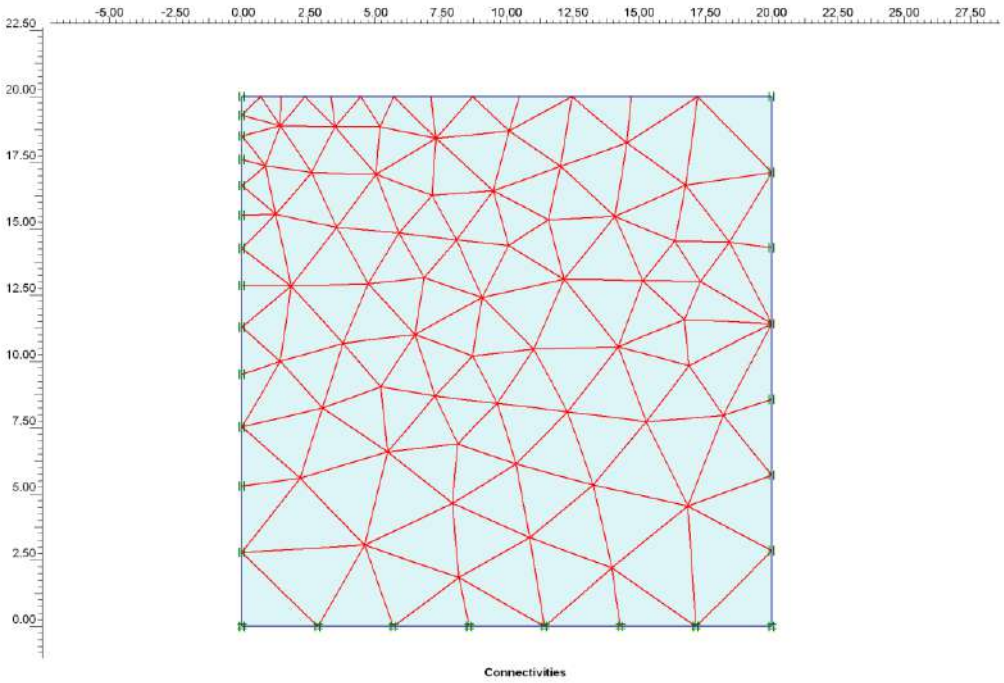


Figure III- 10 : Maillage du problème (argile sans colonne).

- **Conditions initiales :**

Validez le poids volumique de l'eau.

L'initialisation des contraintes de ce sol peut se faire en conditions K_0. Plaxis propose par défaut un K_0 selon la formule de jaky (K_0 = 1- sinφ') que l'opérateur peut modifier. Dans cette phase d'initialisation des contraintes, il faut placer le sol initial à la place du pieu avant de lancer le calcul. On obtient la figure ci-dessous (Figure III.11).

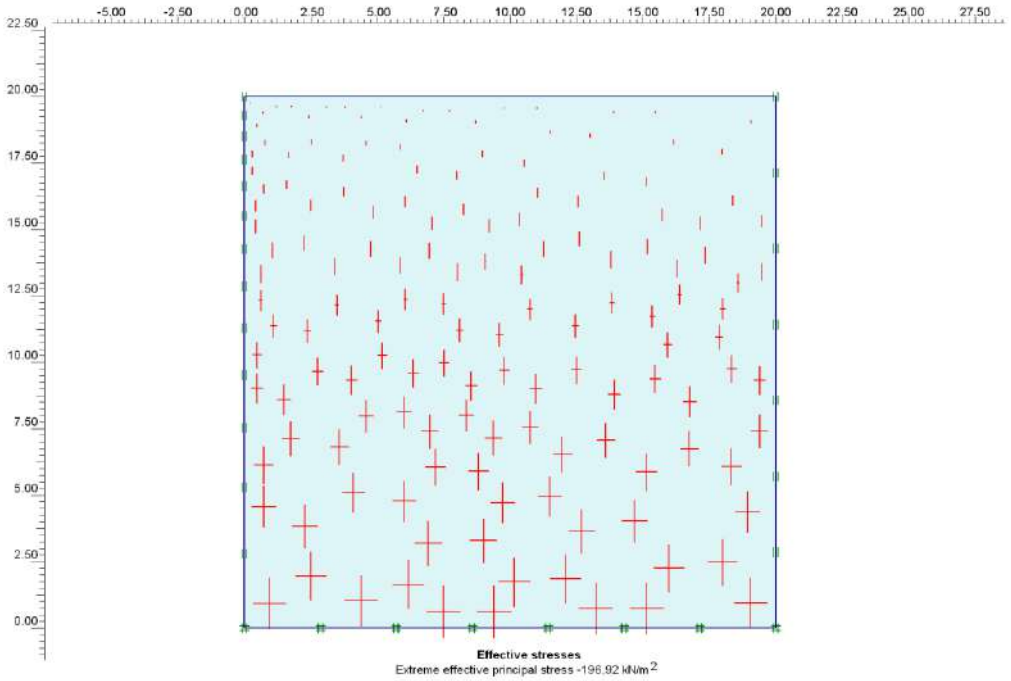


Figure III- 11 : contraintes initiale (argile sans colonne).

- **Le calcul :** le calcul est fait dans une seule phase comme suit :

Dans la fenêtre de calcul, on choisit les options suivantes :

- On applique un chargement isotrope (système load A=45 KN/m²),
- On prend les options (plastic).

 On clique sur cette icône pour choisir les points ou l'on veut visualiser les données, tant en déplacement (des nœuds) qu'en contraintes (des points de gauss). On propose de suivre le calcul dans le sol alors on choisit 2 points une dans la colonne et l'autre dans le sol puis on lance le calcul.

- **Les principaux résultats :**

  On s'intéressera à deux types de déformation :

1. Déformation de maillage.
2. Le déplacement vertical.

- La courbe de déplacement-chargement.
- La courbe de contrainte-déformation.

Nous allons donner les résultats de la dernière phase seulement.

1. La déformation de maillage :

On peut obtenir le maillage déformé sous chargement, l'état limite ultime est sûrement atteint.

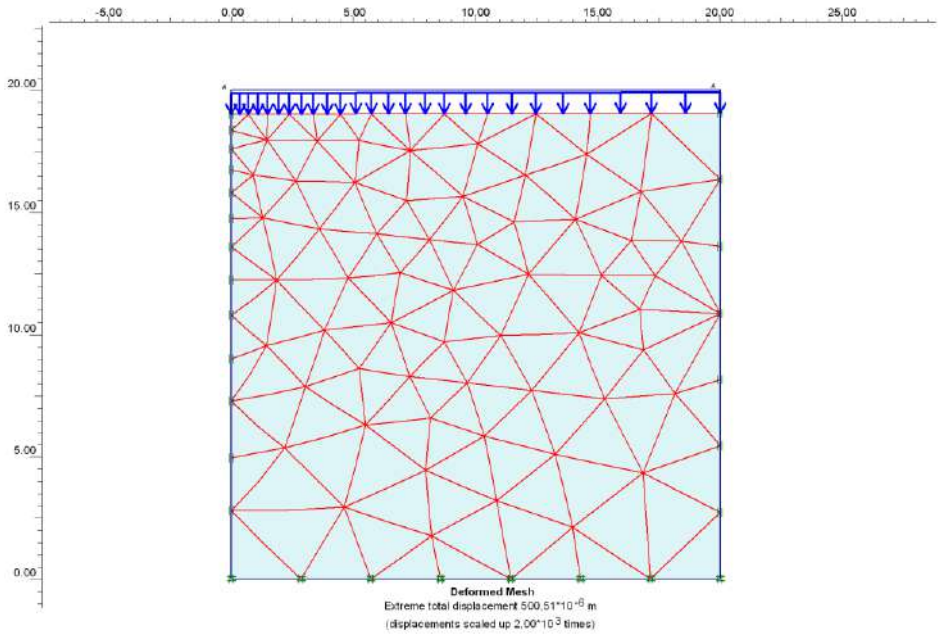


Figure III- 12 : représentation du maillage déformé pour l'argile sans colonne.

2. Déformation des éléments structuraux :

- La courbe déplacement-chargement :

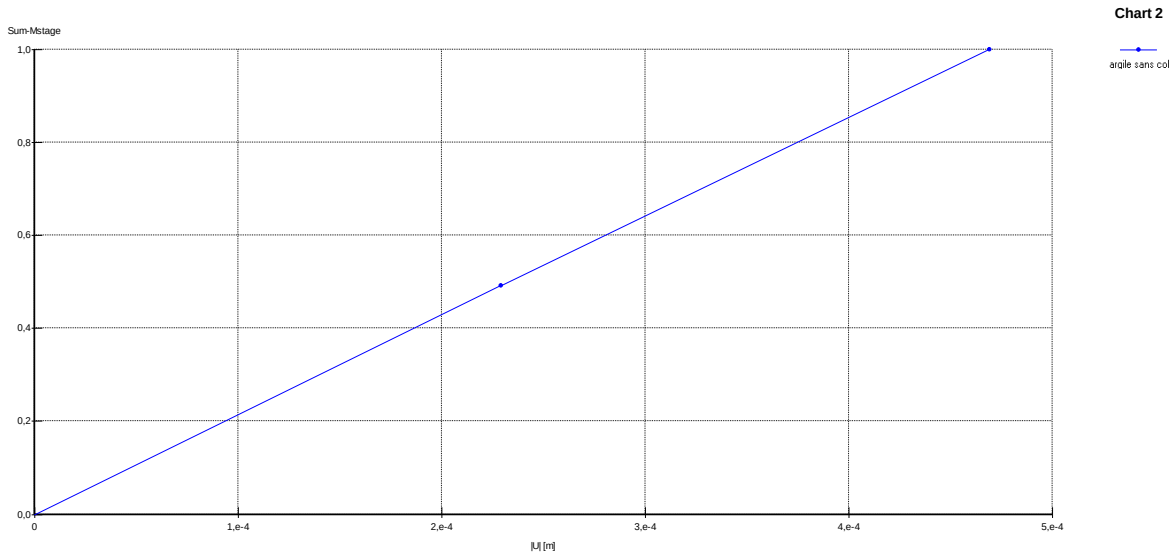


Figure III- 13 : la courbe chargement-déplacement pour l'argile sans colonne.

- La courbe contrainte-déformation :

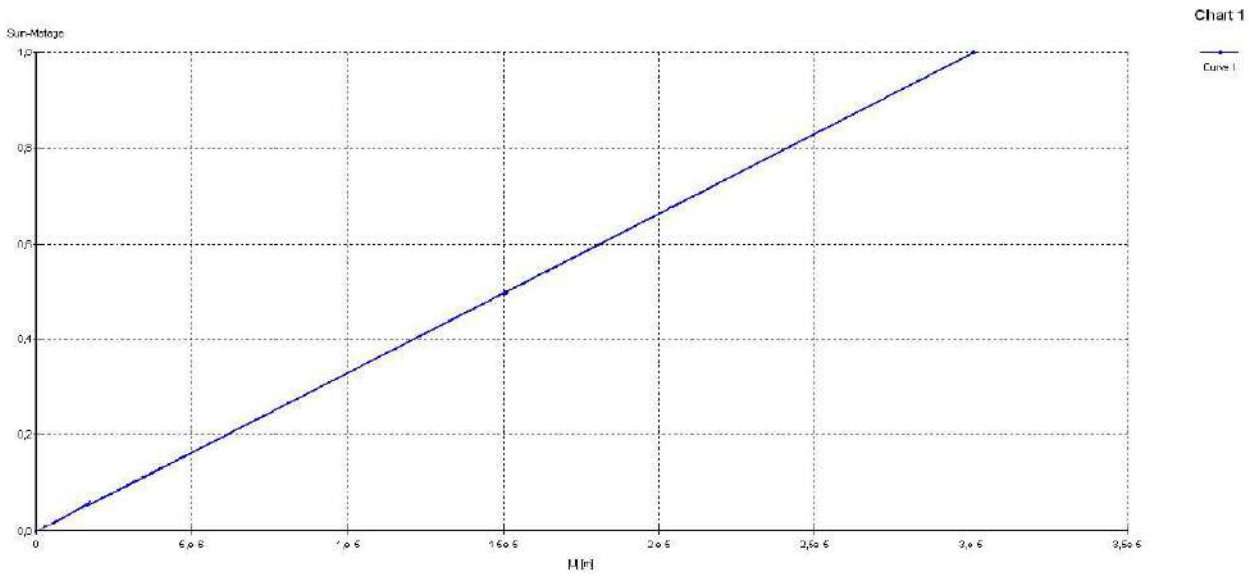


Figure III- 14 : la courbe contrainte-déformation pour l'argile sans colonne.

III.7.4 Pour l'argile avec colonne ballastée :

Le maillage :

On raffine le modèle à la même manière que le cas précédent.

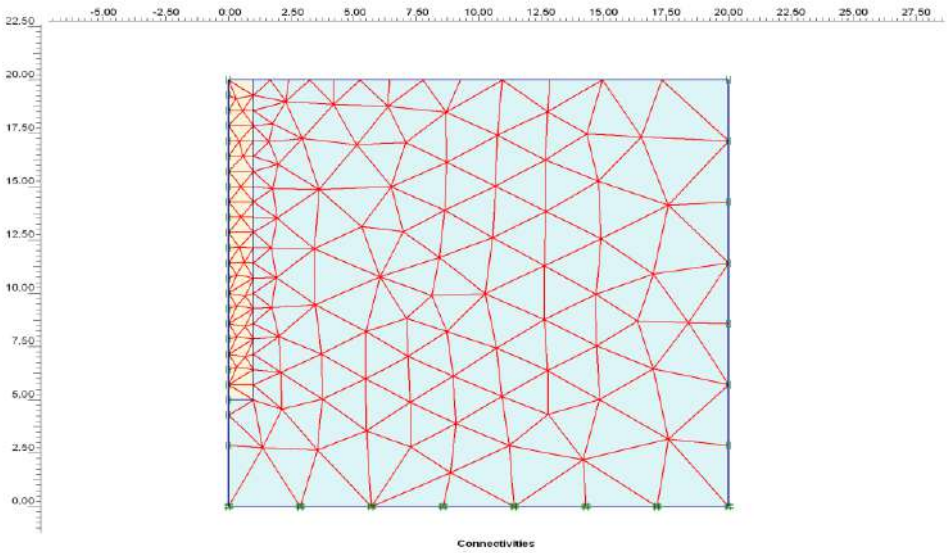


Figure III- 15 : Maillage du problème (argile avec colonne).

Les conditions initiales :

Avec les mêmes conditions initiales que l'argile on obtient la figure ci-dessous :

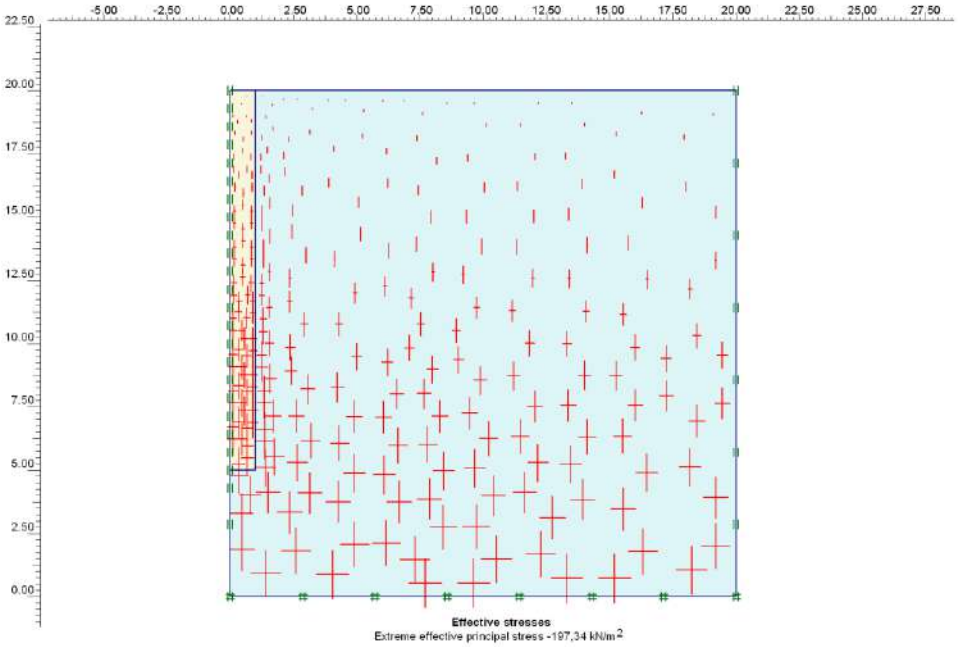


Figure III- 16 : les conditions initiales (argile avec colonne).

- **Le calcul :** on fait les mêmes étapes de calcul de l'argile pour le sable.
- **Le résultat :**
- La déformation de maillage :

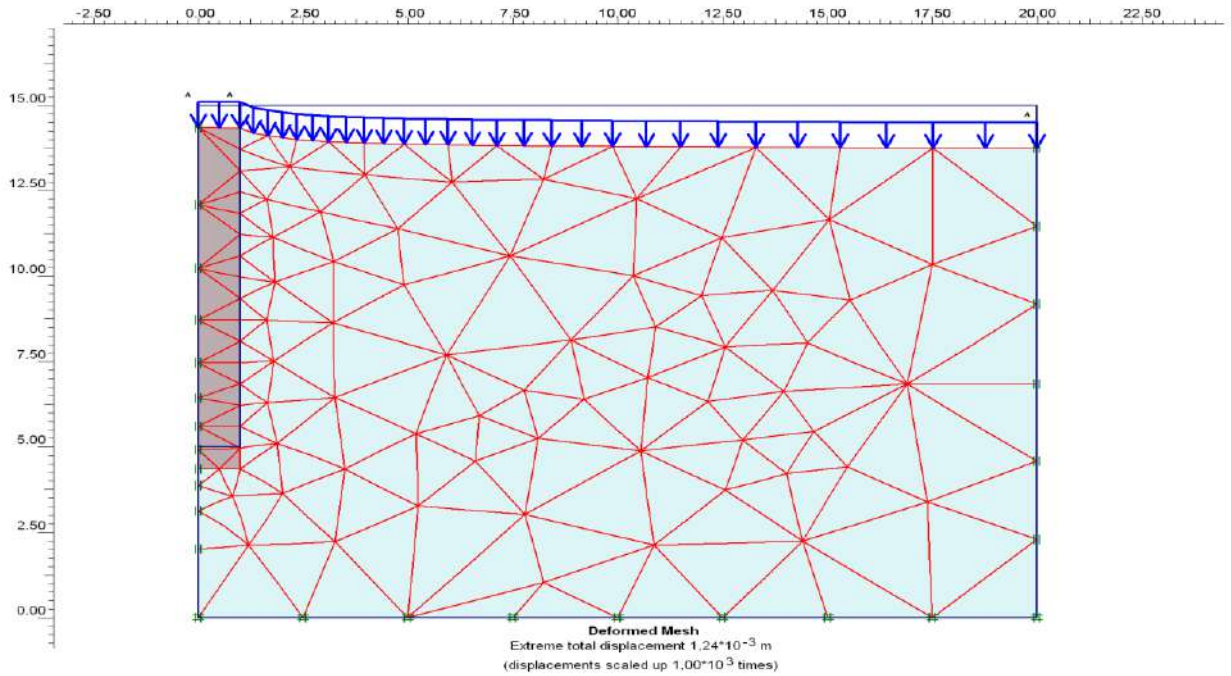


Figure III- 17 : représentation du maillage déformé.

- Le déplacement vertical :

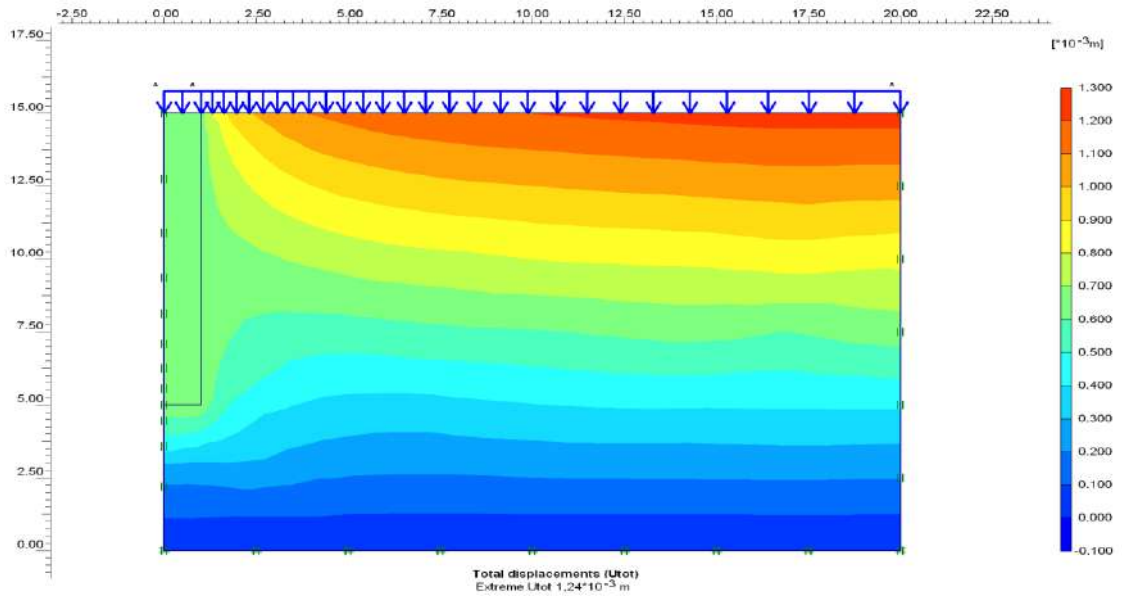


Figure III- 18 : le déplacement vertical.

- Déformation des éléments structuraux :

- La courbe déplacement-chargement :

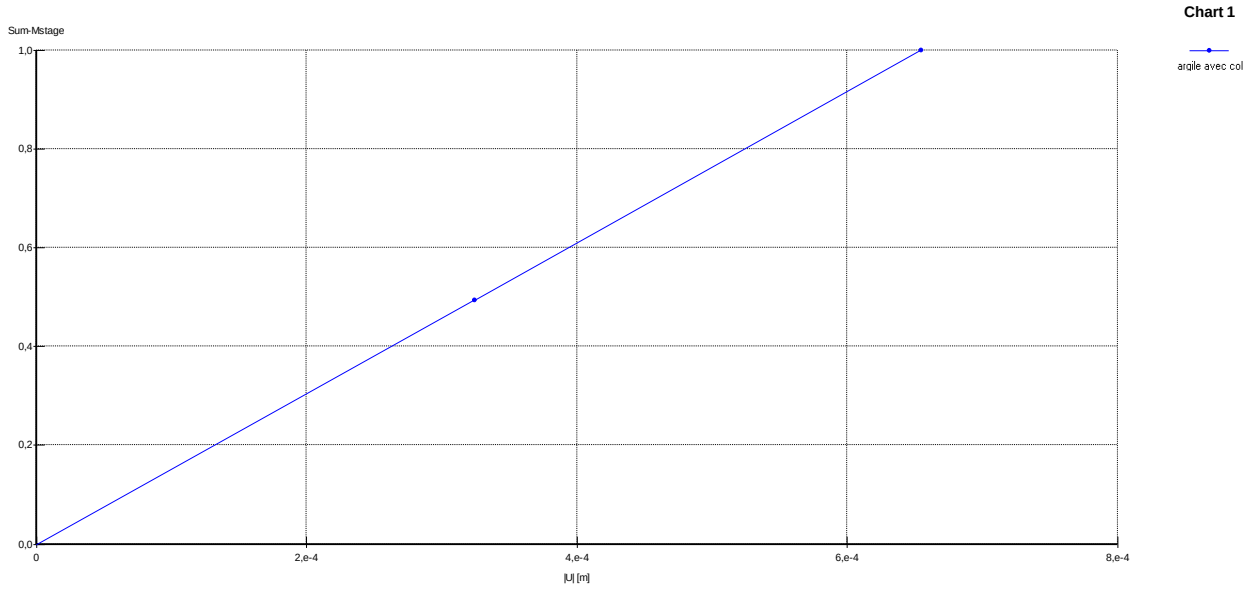


Figure III- 19 : la courbe chargement-déplacement.

- La courbe contrainte-déformation :

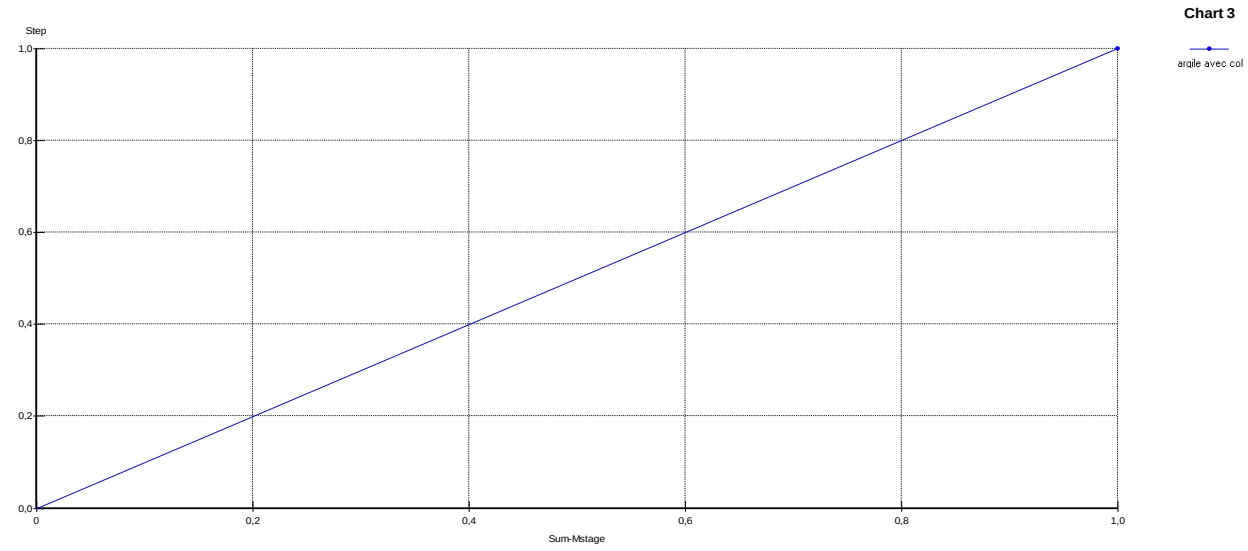


Figure III- 20 : la courbe contrainte-déformation.

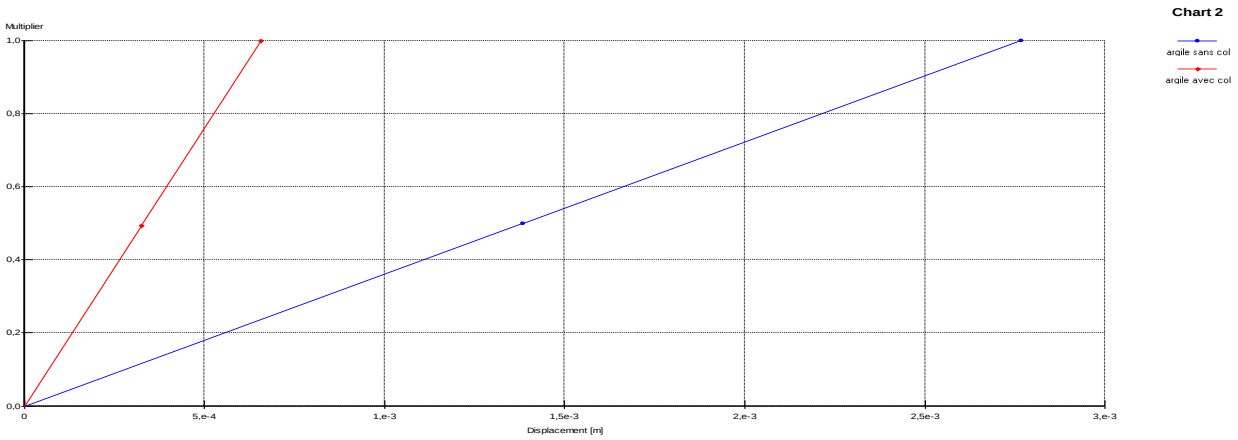


Figure III- 21 : La comparaison entre argile avec colonne et sans colonne.

Ce graphique permet de noter que :

Dans le cas de l'argile la déformation dans le milieu non traité est très élevée par rapport au sol traité. Ce qui montre l'effet de la colonne ballastée sur la rigidité globale du milieu.

III.7.5. Pour le sable sans colonne :

Les figures suivantes présentent les paramètres du sable:

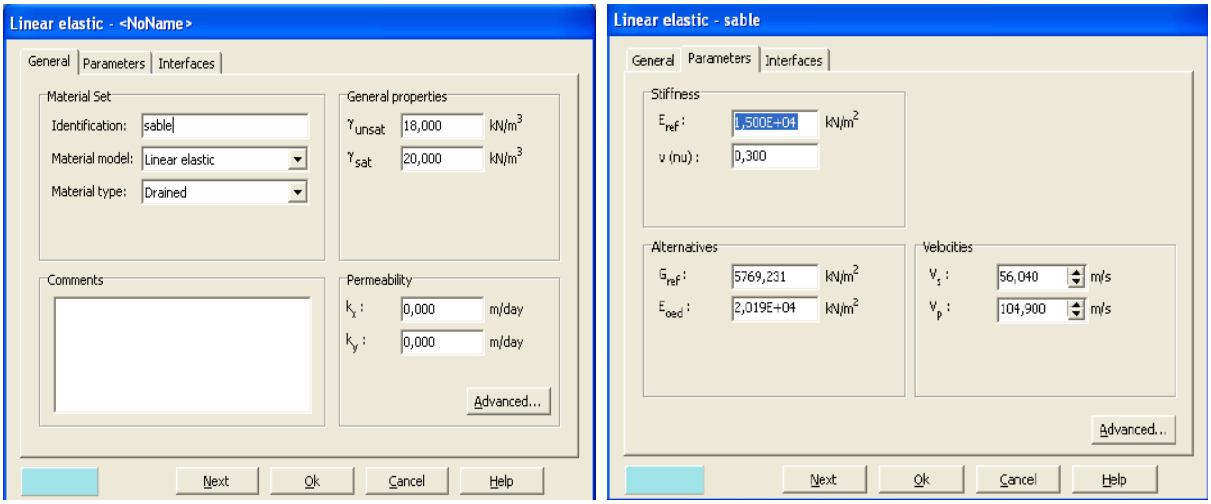


Figure III- 22 : Fenêtre des caractéristiques générales relative à la couche de sol (sable).

- **Le maillage** :

  On raffine le modèle à la même manière que l'argile.

- **Les conditions initiales** :

  Avec les mêmes conditions initiales que l'argile on obtient la figure ci-dessous :

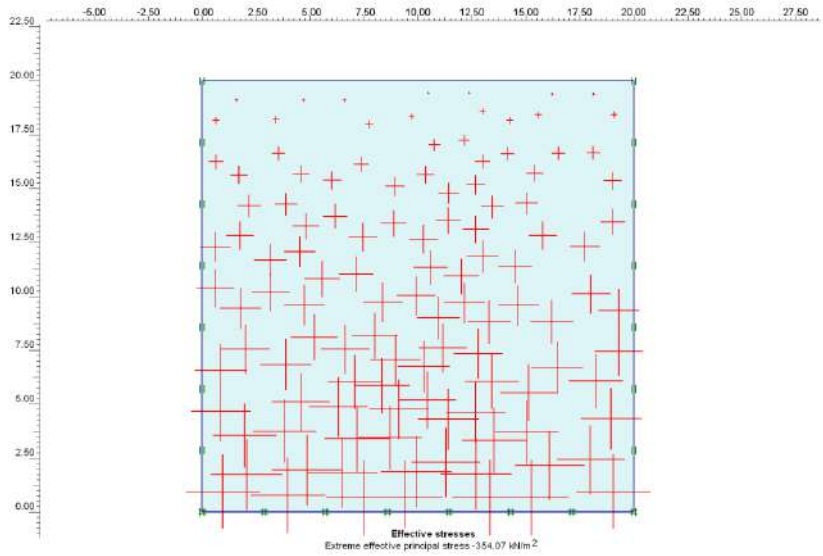


Figure III- 23 : les conditions initiales.

- **Le calcul :** on fait les mêmes étapes de calcul de l'argile pour le sable.
- **Le résultat :**
  - La déformation de maillage :

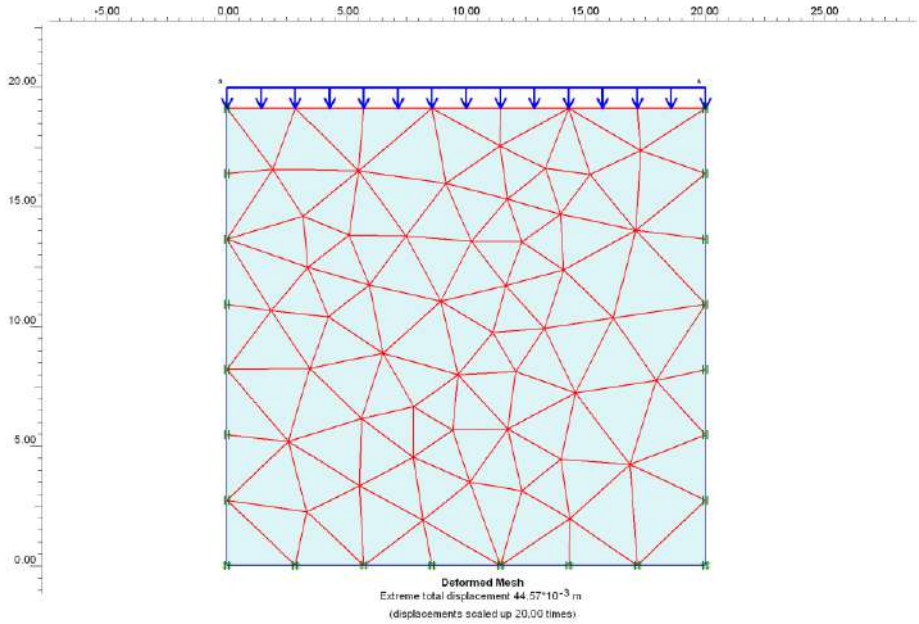


Figure III- 24 : Représentation du maillage déformé pour le sable.

- Le déplacement vertical :

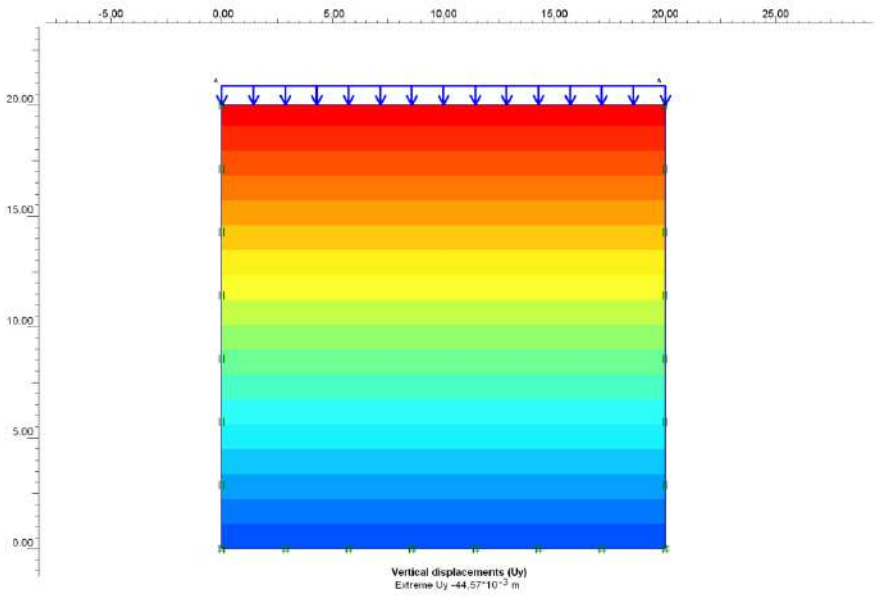


Figure III- 25 : le déplacement vertical pour le sable.

- Déformation des éléments structuraux :

- La courbe déplacement-chargement :

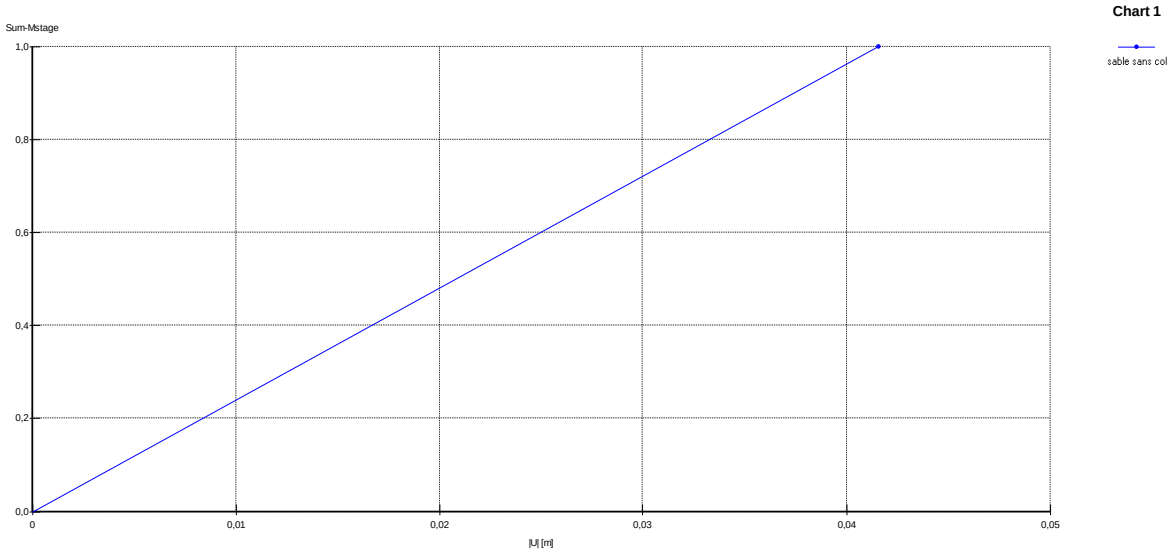


Figure III- 26 : la courbe chargement-déplacement.

- La courbe contrainte-déformation :

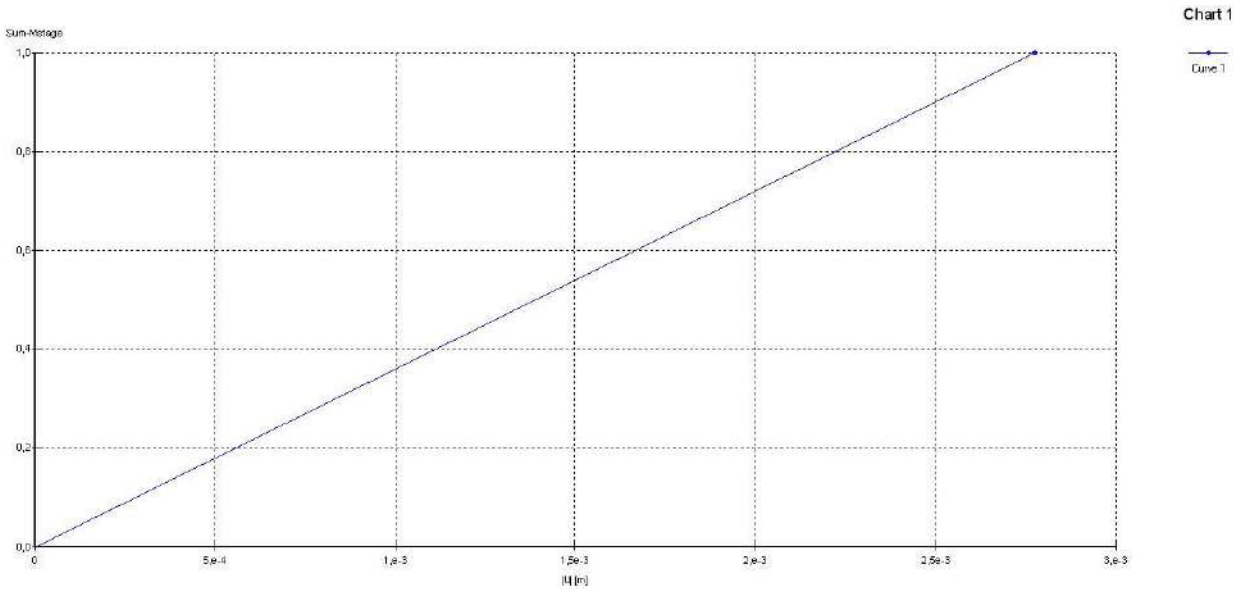


Figure III- 27 : la courbe contrainte-déformation.

III.7.6. Pour le sable avec colonne :

- **Le maillage** :

  On raffine le modèle à la même manière que l'argile.

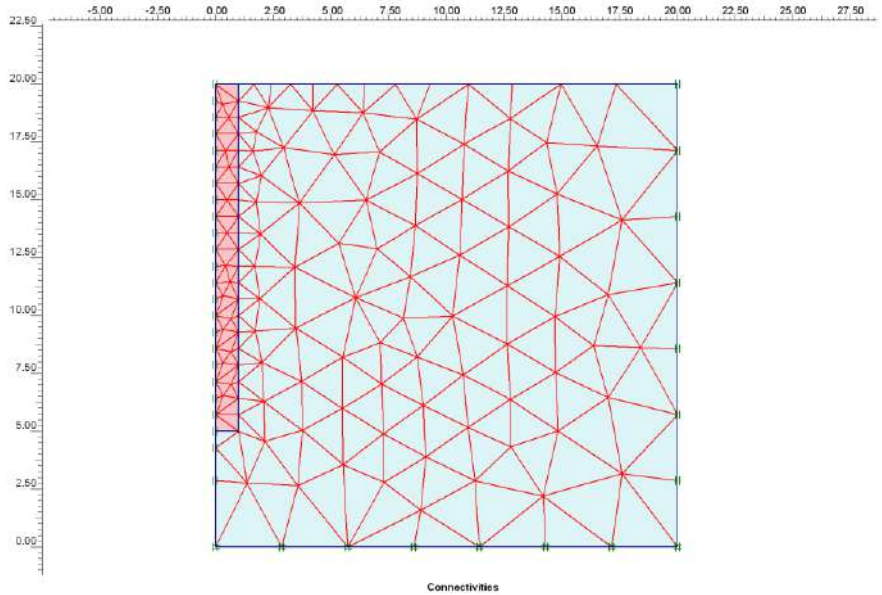


Figure III- 28 : Maillage du problème

Les conditions initiales :

Avec les mêmes conditions initiales que l'argile on obtient la figure ci-dessous :

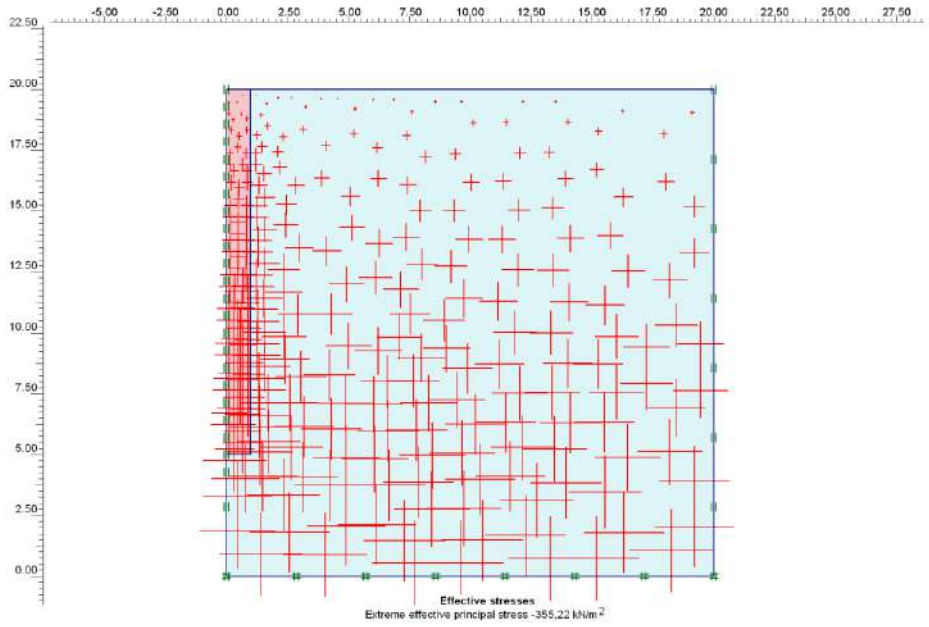


Figure III- 29 : les conditions initiales.

- **Le calcul :** on fait les mêmes étapes de calcul de l'argile pour le sable.
- **Le résultat :**
  - La déformation de maillage :

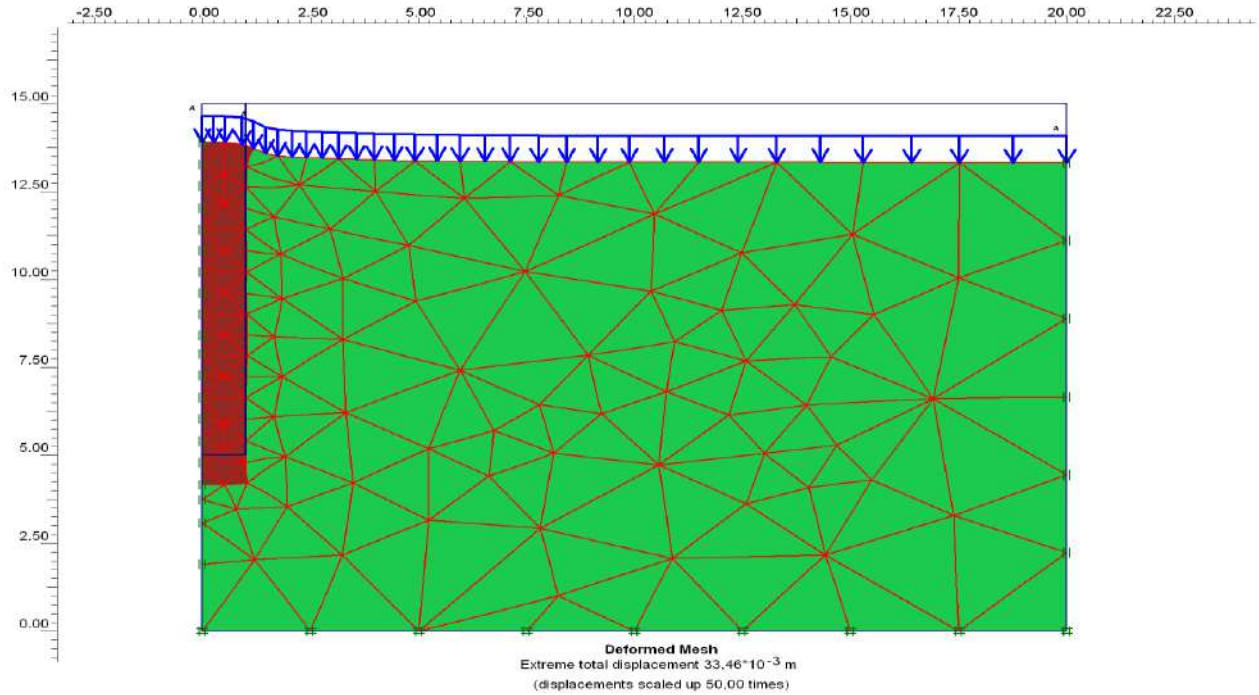


Figure III- 30 : représentation du maillage déformé pour le sable.

Le déplacement vertical :

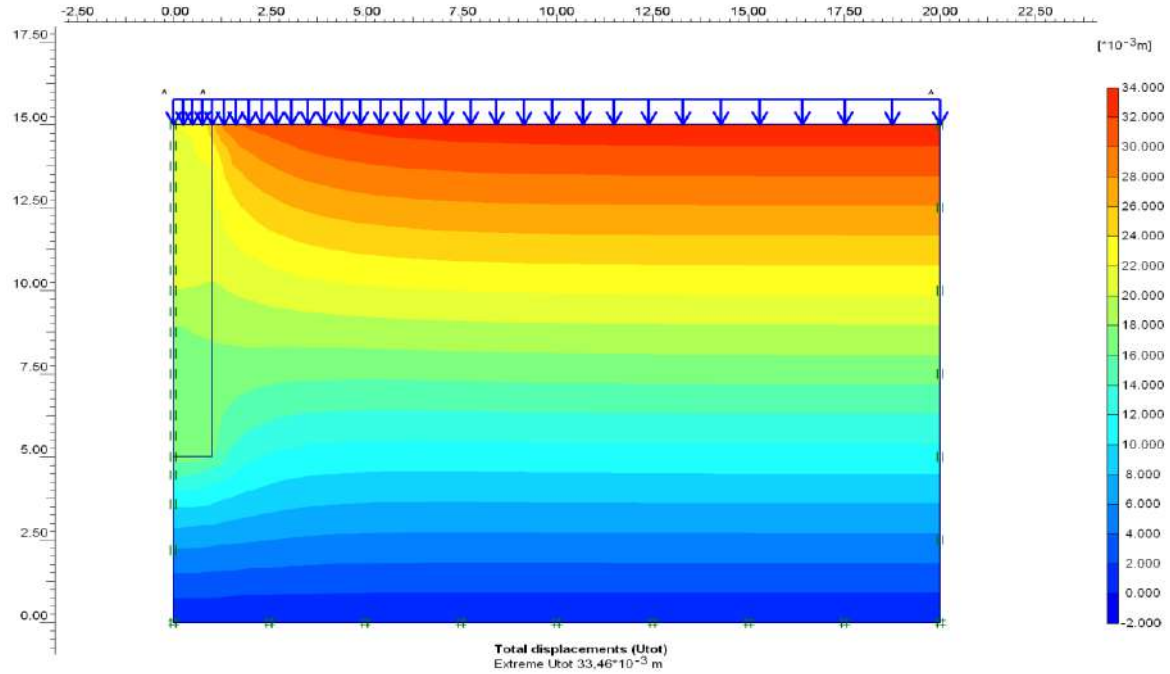


Figure III- 31 : le déplacement vertical pour le sable.

- Déformation des éléments structuraux :

- La courbe déplacement-chargement :

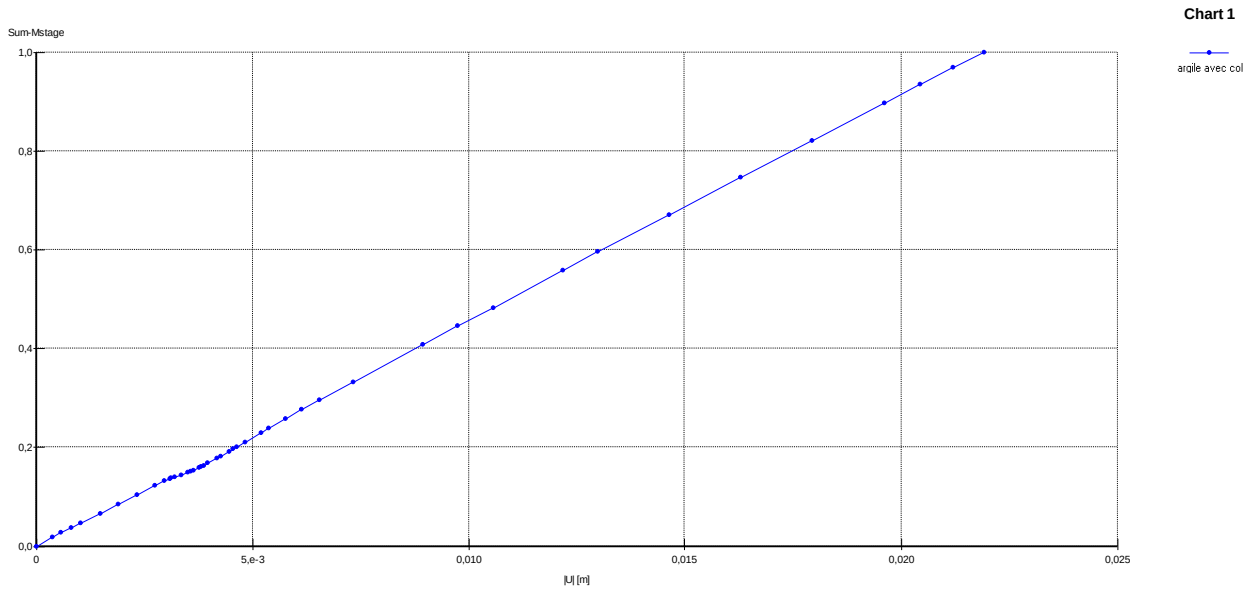


Figure III- 32 : la courbe chargement-déplacement.

La courbe contrainte-déformation :

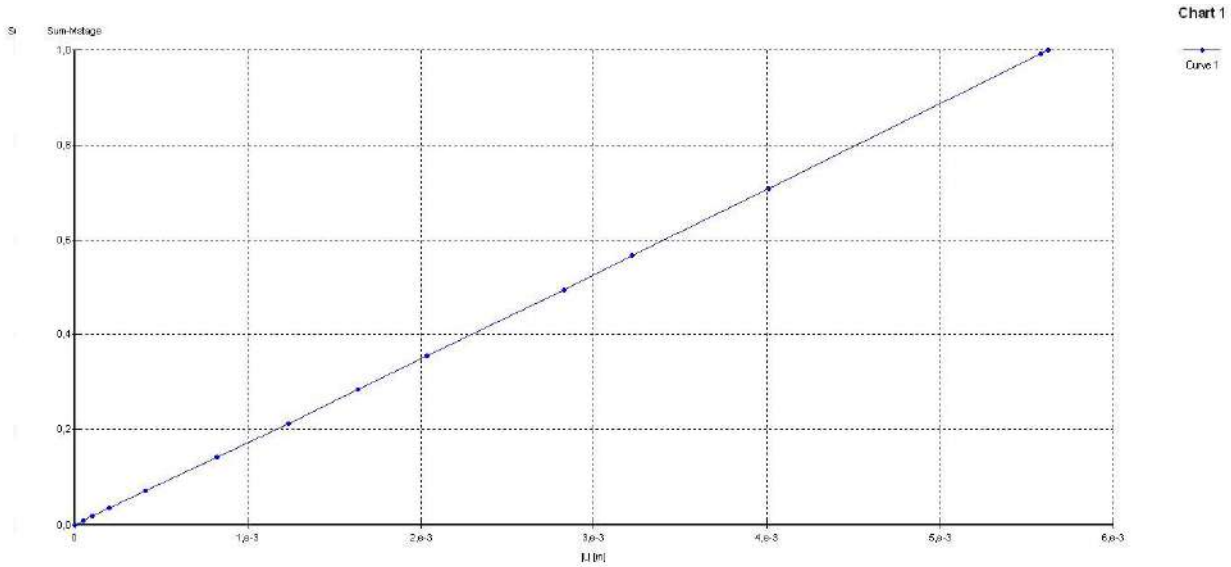


Figure III- 33 : la courbe contrainte-déformation.

Comparaison entre le sable avec col et sans col :

- La courbe chargement-déplacement :

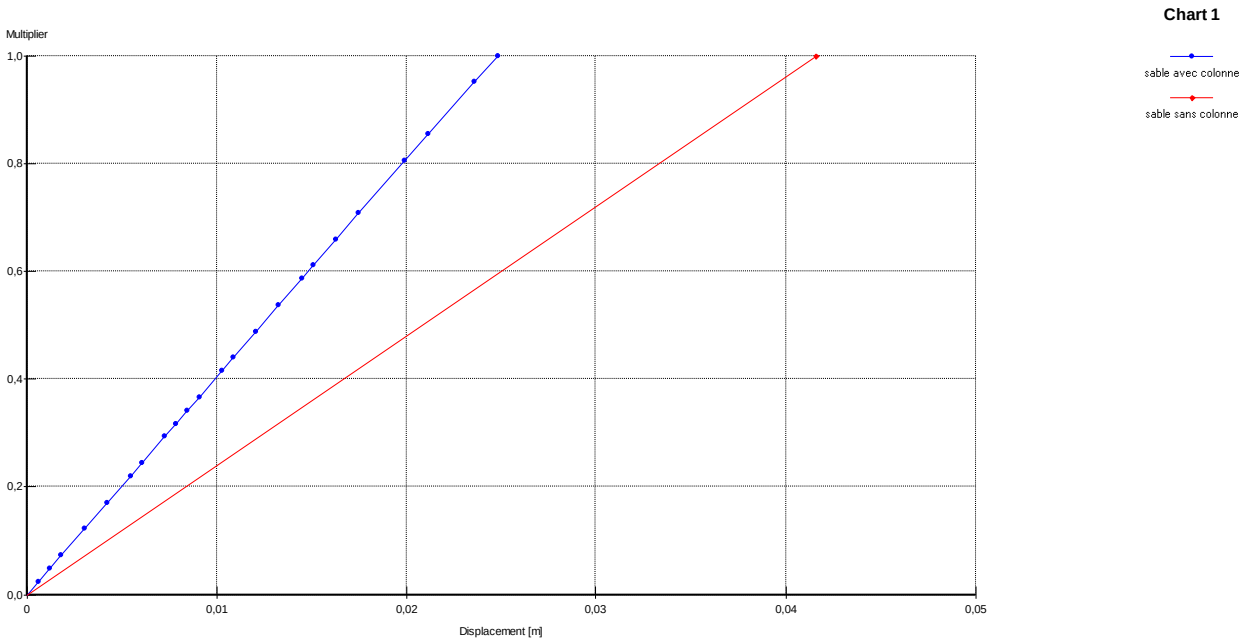


Figure III- 34 : La courbe chargement-déplacement.

Ce graphique permet de noter que :

Dans le cas de sable la déformation dans le milieu traité est très élevée par rapport au sol non traité.

Ce qui montre l'effet de la colonne ballastée sur la rigidité globale du milieu.

III.8 Conclusion :

En remarquons que le sol traiter avec colonne ballastées ont une déformation faible par rapport les sols non traiter.

Les contraintes verticales dans les sols traités sont plus élevé par rapport les sols non traiter

Finalement on remarque que les colonnes ballastées amélioré bien le sol

CONCLUSION GENERALE

L’objectif de ce mémoire est de caractériser numériquement l’analyse du comportement d’une colonne ballastée par logiciel PLAXIS.

Le premier chapitre la synthèse bibliographique, était consacré à la détermination du procédé de renforcement par colonne ballastée, ces différents modes de mise en œuvre et son domaine d’application selon différents critères.

Le deuxième chapitre concernait les mécanismes de comportement ainsi que le dimensionnement d’une colonne et d’un réseau de colonnes et les facteurs permettant de qualifier et de quantifier l’amélioration. Ce chapitre a permis de mettre en évidence les informations nécessaires pour appréhender le fonctionnement des colonnes ballastées dans un massif de sol.

Le dernier chapitre est une interprétation des résultats des modélisations en deux dimensions, du modèle d’une colonne ballastée. Ce chapitre a permis de montrer l’influence des colonnes ballastées sur le comportement statique d’un sol ayant de faibles caractéristiques mécaniques.
Arrivant à la fin de ce mémoire, nous avons pu comprendre les principes de bases du comportement des sols et l’influence des colonnes ballastées sur ce comportement.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Ammar DHOUIB et Francis BLONDEAU. *Colonnes ballastées (Techniques de mise en oeuvre, domaine d'application, comportement, justification, contrôle, axes de recherches et développement).*

[2] M. Taoufik BENCHELHA et Aziz SAIDI/DPE KALAA. *Amélioration des sols de fondation par colonnes ballastées, cas des ouvrages d'art de la rocade méditerranéenne de Nador.*

[3] Imene Besma ZIGHMI et Chawki MESSIS. *Renforcement des sols par colonnes ballastées ;* Mémoire pour l'obtention du diplôme Ingénieur d'état en travaux publics.

[4] Farid GUENOUNA. *Etude de comportement des colonnes ballastées ;* Mémoire présenté pour obtenir le diplôme de Magistère en génie civil.

[5] Robert D. HOLTZ et William D. KOVACS, Traduit par Jean LAFLEUR. *Introduction à la géotechnique ;* Chapitre 11. Résistance au cisaillement des sables et des argiles.

[6] C. Plumelle. *B6 / Chapitre6 (version 28/10/02)*, Cnam-Paris-**géotechnique.**

[7] NOUI .conception des fondations sur colonnes ballastées *Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magistère en Génie Civil Option : Géotechnique*

[8] Belkacem DJEBROU. *Traitement du sol par colonnes ballastées, Cas de la centre électrique d'alger ;* Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en génie civil.

[9] Iméne-Bassma. *Etude numérique de l'influence des paramètres géotechnique sur le comportement des sols renforcés par colonnes ballastées ;* Mémoire pour obtenir le diplôme de magistère en Génie civil. Spécialité : Géotechnique et environnement.

[10] Romain Auvray : GC5. *Influence d'une colonne ballastée sur le comportement des sols argileux.*

[11] *BERTNARD SOYEZ méthode de dimensionnement des colonnes ballastées*

[12] Zeina FINGE BOUSAID. *Contribution a l'étude du comportement non drainé des sables laches surconsolidés et anisotropes;* Thése presentée devant l'institut national des sciences appliuquée de Lyon pour obtenir le garde de docteur.

[13] *ouahab MOHAMED YOUNES comportement dynamique d'une colonne ballastée* Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magistère en Génie Civil

[14] Sébestien CORNEILLE. *Etude de comportement mécanique des colonnes ballastées chargées par des semelles rigides;* Soutenue publiquement le 25 juin 2007 en vue de l'obtention du titre de : Docteur de l'Institut National Polytechnique de lorraine. Spécialité : Génie Civil – Hydrosystéme – Géotechnique.

[15] *Plaxis Finite Element Code For Soil And Rock Analysi*