

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJ - BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département génie civil

- Présenté par :

- MILI Ahmed
- LEBAL MASSINISSA

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master 02 en :

Filière : GENIE CIVIL

Option : Structures

Thème

Etude du comportement d'un massif de sol renforcé par colonnes ballastées

Devant le jury composé de :

Belmihoub Hacene	MAA	UAMOB	Président
Ait Ahmed Fatiha	MAA	UAMOB	Examineur
Reffas Brahim	MAA	UAMOB	Encadreur

Année universitaire 2021/2022

Dédicace

Je dédie ce projet:

A ma chère Mère

*Celle qui m'a inséré le goût de la vie et le sens de
la responsabilité*

A mon cher Père

*Celui qui est la source de mon inspiration et de
mon courage*

*Ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté,
de sagesse et de patience.*

Ames 2 frères Kouceila et Jugurtha

*Pour leur soutien moral tout le long
de mes études*

A mon cher binôme

AHMED

Pour son entente et son sympathie

A tous mes amis

*Pour Leur soutiens et ai des durant les moments difficiles A
toute*

Les amis d'étude promo de

Génie civil

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment

LEBAL MASSINISSA



Dédicace

Je dédie ce projet:

A ma chère Mère

*Celle qui m'a inséré le goût de la vie et le sens de
la responsabilité*

A mon cher Père

*Celui qui est la source de mon inspiration et de
mon courage*

*Ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de
fierté, de sagesse et de patience.*

A toute ma famille

*Pour leur soutien moral tout le long
de mes études*

*A mon cher binôme
MASSINISSA*

Pour son entente et son sympathie

A tous mes amis

*Pour Leur soutiens et aides durant les moments difficiles A
toute*

*Les amis d'étude promo de
Génie civil*

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment

MILI AHMED



Remerciement

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos vifs remerciements :

Avant tous, nous remercions Dieu pour nous avoir donné la force et la patience pour mener à terme ce travail.

A nos familles : qui nous ont toujours encouragés et soutenus durant toutes nos études.

A Mr Reffas : notre promoteur, pour avoir accepté de nous guider sur le bon chemin du travail.

Au bureau d'étude (bureau des ingénieurs Bouira) : qui nous ont orienté afin d'arriver à élaborer ce modeste travail.

Aux membres de jury : pour avoir accepté de juger notre travail.

A tous les enseignants de département de Génie Civil a ses soutiens techniques et pédagogiques.

Sans oublié nos amis

Sommaire

Dédicace

Remerciement

LISTE DES FIGURES

Liste des tableaux

LISTE DES ABRIVIATIONS ET NOTATIONS

Introduction générale.....	A
Chapitre I : Recherche Bibliographique (État de L'art)	
Introduction.....	4
Définition des colonnes ballastées.....	5
I.1. Le Ballast.....	6
I.2. Les critères de qualité de ballast.....	6
I.3. L'amélioration des sols compressible par colonnes ballastées.....	7
I.4 Domaine d'application des colonnes ballastées	8
I.5. Les procédés d'exécutions des colonnes ballastées	9
I.6. Les techniques d'améliorations des sols mous	10
I.6.1. Le but d'améliorations des sols mous	11
I.7. Les Techniques de mis en œuvres.....	11
I.7.1. La technique du Vibro-compactage (VC).....	11
I.7.2. Mode opératoire	12
I.7.3.A. La technique de colonne ballastée	14
I.7.3.B. Colonnes ballastées par voie sèche	14
I.7.3.B. Voie humide (vibro-substitution).....	16
I.7.3.C. Colonnes ballastées par pilonnages.....	17
I.7.3. Analogies et différences entre les trois techniques :	18
I.7.3.E. Colonnes Ballastées en mer	19
I.8. Comportement des colonnes ballastées	21
I.8.1. principe de la cellule unitaire	21
I.8.2. Equation d'équilibre.....	24
I.8.3. Relation entre les paramètres caractéristiques n et β	24
I.9. Modèles de comportement mécanique des colonnes ballastées sous chargement Statique vertical et horizontal	26
I.9.1. Colonnes isolées.....	26
I.9.2. Mécanismes de rupture	28
I.10. Modèles de comportement d'un réseau de colonnes ballastées [11].....	29
I.10 .1. Exemples de colonnes ballastées sous charges centrées	30

I.11. Les méthodes de justification habituelle	31
I.11 .1. Les Paramètres intervenant dans le dimensionnement des colonnes ballastées	31
I.11.2. Justification en termes des contraintes	32
I.11.3. Justification du diamètre moyen en fonction de l'étreinte latérale du sol	32
I.11.4. Prévision de la capacité portante et du diamètre moyen	33
I.12. Comportement des colonnes ballastées en zone sismique	36
I.12.1. Les travaux de Seed et Booker (1977).....	36
I.12.2. Les travaux de Priebe (1978, 1998).....	36
I.13. Le phénomène de liquéfaction.....	38
I.13.1. Les sols liquéfiables.....	38
Chapitre II: Présentation de logiciel PLAXIS et Ses lois de comportement	
Introduction.....	41
II.2. Les avantages du Plaxis 2D	43
II.3. Le sous-programme de Plaxis 2D	43
II.3. Code de Plaxis 2D	44
II .4. Lois de comportement dans PLAXIS	45
II.4.1. Modèle de Mohr-Coulomb.....	45
A. Module d'Young E:	46
B. Coefficient de poisson ν :	47
C. Angle de frottement φ :.....	47
D. Cohésion C :	47
E. Angle de dilatation ψ :.....	48
II .5. Modèle de sol avec écrouissage(HSM) :.....	49
A Les paramètres du Hardening Soil Model :.....	51
II .6. Les types d'éléments de PLAXIS.....	52
II .7: Les éléments d'interface.....	52
II .8 Maillage	53
II .9. Conditions aux limites.....	53
II .10. Conclusion.....	53
Chapitre III: Modélisation Numérique	
Introduction.....	55
III-PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	56
III.1. Situation géographique de la wilaya	56
III.2. Description Du Site	57
III.2.a. Situation :	57
III.2.b. Topographie De Site :	57

III.3. Géologie Et Hydrogéologie.....	58
III.3.a. Géologie Régionale :	58
III.3.b. Hydrogéologie:	59
III.4. Sismicité de la région :.....	60
III.5. Simulation numérique.....	61
III.5.1. Présentation du cas d'étude d'un massif du sol avec et sans renforcement.....	61
III.6. Etude de l'effet des charges sur la stabilité de sol:	61
III.6 .1. Caractéristique de sol :	62
III.6 .2 Les charges appliquées :	63
III.7. Modélisation.....	63
III.7.A. 1 ^{er} cas d'étude.....	63
III.7.B. 2 ^{eme} cas d'étude.....	69
III.8. Conclusion	73
Chapitre IV: Résultat et Discussion	
IV. Représentation des résultats obtenus sous forme des schémas et des courbes.....	76
IV.1. Déplacement	76
IV.2. Accélération	79
IV.3. Pression active :.....	80
Conclusion générale	B
Référence Bibliographique.....	D
Résumé.....	F

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : forme des colonnes ballastes	03
Figure I.2 : Maillage des colonnes ballastées.....	04
Figure I.3: <i>grain</i> de ballast de 30/60mm.	05
Figure I.4 : Déférentes formes de ballast.....	06
Figure I.5 : Techniques d'amélioration du sol par colonnes ballastées (Document Keller).....	06
Figure I.6.a : un vibreur à sas (document Killer)	07
Figure I.6.b : séquence de réalisation d'une colonne ballastée (document Killer).....	08
Figure I.7: réarrangement des grains lors du compactage (entrepris SIF).....	10
Figure I.8: mode opératoire par la méthode Vibro-compactage (entreprise SIF).....	10
Figure I.9: Le cône d'affaissement autour de vibreur (barrage -Harka- TUNISIE).....	11
Figure I.10: Remplissage de l'affaissement conique par un matériau d'apport	11
Figure I.11: étape d'exécution de la colonne ballastée par la voix sèche (Entreprise SIF).....	12
Figure I.12: finition d'une colonne par voix sèche (site : mosquée de boudouaou) (Laboratoire legeotech)	13
Figure I.13 : vibreur utiliser pour lavoie sèche et ces composant (Document Keller).....	13
Figure I.14 : Le débute d'opération de forage par voie humide (Laboratoire legeotech).....	14
Figure I.15: schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide (Laboratoire legeotech).....	14
Figure I.16 : vibreur utiliser pour la voie humide et ces composant (techni.ch).....	15
Figure I.17; Engin de réalisation de colonne ballastées pilonné (Höhenhof de l'aéroport du Findel, Killer)	16
Figure I.18 : les étapes de pilonage (techni.ch).....	16

Figure I.19 : colonne ballastées en mer par La méthode du tapis de ballast (document killer).....	19
Figure I.20 : Atelier de réalisation de colonnes ballastées en mer (Document the Vibro-flottation group).....	20
Figure I.21: Réseau de colonnes ballastées : Colonne isolée et principe de la cellule unitaire.....	21
Figure I.22: Principe de réduction des tassements.et de concentration des charges.....	22
Figure I.23: mode de déformation axial pour une fondation souple (Eggestad, 1983).....	25
Figure I.24: mode de déformation radial pour une fondation souple (Eggestad, 1983).....	26
Figure I.25: mode de déformation axial d'une fondation rigide (Eggestad,1983)	26
Figure I.26: mode de déformation radial d'une fondation rigide (Eggestad,1983)	27
Figure I.27.a : mode de rupture d'une colonne ballastée isolée sous charge axiale en tête (Datye,1982).....	28
Figure I.28.a: Domaine d'influence de la colonne (maille triangulaire).....	28
Figure I.28.b : Domaine d'influence de la colonne (maille carré).....	29
Figure I.28.c: Domaine d'influence de la colonne (maille hexagonale).....	29
Figure I.29: schéma d'implantation des colonnes ballastées sous semelles d'un centre postal à Glasgow (Bell étal. 1986)	29
Figure I.30: Réduction des tassements en fonction de l'espacement entre Colonnes ballastées (Greenwood, 1970 ; Datye, 1982).....	32
Figure I.31 : Prévion de la capacité portante et du diamètre effectif en fonction de l'étreinte Latérale du sol encaissant (Thorburn ,1975).....	33

Figure I.32.a: Facteur réducteur (r_d) en fonction de la profondeur z (Seed et Idriss, 1971).....	32
Figure I.32.b : Liquéfaction : corrélation entre le rapport des contraintes cycliques τ_h / σ'_{v0} et NSPT corrigé (Seed, 1976).....	37
Figure I I.1 : type et version de Plaxis 2D.....	41
Figure I I.2 : Présentation de la fenêtre plaxis2D.....	42
Figure I I.3 : Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.....	45
Figure I I.4 : Définition du module a 50% de la rupture (M. AL HUSEIN, 2001).....	46
Figure I I.5 : pyramide de Mohr-coulomb tracé $C=0$	48
Figure I I.6.a : présentation de HSM.....	49
Figure I I.26.b: Définition du module œnométrique tangent.....	49
Figure II.7 : fenêtre des paramètres du hardening soil model.....	50
Figure II.8 : Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol.....	51
Figure III.1 : situation géographique de la wilaya (www.elbilad.net).....	55
Figure III.2: Situation du projet (Photographie satellite du 27/10/2020-Source Google.....	56
Figure III.3: Esquisse géologique de la région d'étude Extrait de la carte géologique de Koléa n°41.....	57
Figure III.4: Nouvelle carte de zonage ; RPA version 2003 Après le séisme de boumerdes.	60
Figure III.5: Les différentes couches de sol et leurs profondeurs.....	61
Figure III.6.a : paramètres des caractéristiques générales.....	64
Figure III.6.b: paramètres de dimensionnement.....	64
Figure III.7: Définition des matériaux du modèle.....	65
Figure III.8: Application de la charge verticale.....	65
Figure III.9: Géométrie de modèle.....	66

Figure III.10 : maillage d modèle.....	66
Figure III.11: Répartition des pressions interstitielles.....	67
Figure III.12: La disposition des points choisis pour un sol sans colonnes.....	68
Figure III.13: la géométrie d'un massif de sol avec colonnes ballasts.....	69
Figure III.14: Le modèle géométrique.....	69
Figure III.15: maillage du modèle	70
Figure III.16: Répartition des pressions interstitielles.....	70
Figure III.17: Accélérogramme.....	71
Figure III.18: La disposition des points choisis pour un sol sans colonnes.....	71
Figure IV.1.a : Déformation du maillage pour le sol sans colonnes ballastées.....	76
Figure IV.1.b: Déformation du maillage pour le sol avec colonnes ballastées.....	76
Figure IV.2.a : Représentation de déplacement totale SC.....	77
Figure IV.2.b: Représentation de déplacement totale AC.....	77
Figure IV.3.a : Courbe de Déplacement total SC.....	78
Figure IV.3.b : Courbe de Déplacement total AC.....	78
Figure IV.4.a: Représentation de l'accélération dans un sol SC.....	79
Figure IV.4.b: Représentation de l'accélération dans un sol AC.....	79
Figure IV.5.a: Représentation de la pression active dans le sol SC.....	80
Figure IV.5.b: Représentation de la pression active dans le sol AC.....	80
Figure IV.6.a : Courbe de la pression active pour le sol SC.....	81
Figure IV.6.b : Courbe de la pression active pour le sol AC.....	81
Figure IV.7.a : courbe Mstage-déplacement SC	82
Figure IV.7.b : courbe Mstage-déplacement AC.....	82

Liste des tableaux

Tableau.III.1 : Les Zones Sismique.....	59
Tableau III.2 : Propriétés mécanique des matériaux utilisés dans la modélisation.....	61

LISTE DES ABRIVIATIONS ET NOTATIONS

e: Excentricité de la résultante de la charge verticale

E: Module d'Young

q_u: Capacité portante de la fondation

γ: Poids volumique du sol

γ': Poids volumique

δ: Angle d'interface

ε: Déformation

ν: Module de Poisson

σ: Contrainte, horizontale(σ_h), verticale.(σ_v)

ψ: Angle de dilatance du sol

K₀: Coefficient des terres au repos

Z: Profondeur dans le sol

Q: Charge concentrée

σ_r: Contrainte normale radiale

R_{inter}: Facteur de rigidité

S_i: Tassement du sol sans traitement

S_f: Tassement du milieu composite obtenu après traitement

σ₀: Charge (initialement appliquée par la fondation)

σ_c: Contrainte en tête de la colonne,

σ_s: Contrainte en surface du sol,

σ_r : Contrainte verticale effective de rupture en tête de colonne)

σ_{hmax} : Etreinte maximale latérale

σ_{h0} : Contrainte horizontale effective dans les sol avant traitement

a : Taux d'incorporation

A_c : Aire de la colonne

A : Aire totale (de la cellule)

A_s : Aire du sol

D_c : Diamètre de la colonne ballastée.

D_e : Diamètre de la cellule unitaire (diamètre d'influence équivalent).

d : Distance entre l'entraxe des colonnes

SC : sans colonnes ballastées

AC : avec colonne ballastées

Spt : Essais de pénétration standard

CPT: cône pénétromètre test

DTU : Document Technique Unifié

MDF : Méthode Des Eléments Finis



Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Les ingénieurs ont développés de nombreuses techniques de renforcement de sol au XXe siècle. Grace à ces technologies innovantes, il est désormais possible de construire sur tout type de sols, de simple structure à la prouesse architecturale, la compétence des ingénieurs est mobilisée pour analyser, étudier, conforter et renforcer les sols. Le renforcement des sols même s'il est généralement invisible mais il est la pierre angulaire de toute structure construite sur le sol aux caractéristiques mécaniques médiocre..

L'aménagement de sol de qualité médiocre est de plus en plus nécessaire, compte tenu de la croissance de l'humanité et de ses activités. Certains types de sol, jusque-là délaissés, car présentant des caractéristiques mécaniques faibles, doivent être renforcés pour assurer la stabilité des édifices et des infrastructures de génie civil qu'ils sont appelés à porter. Peu visibles pour le profane car enfouies dans le sol, les techniques de renforcement sont très largement répandues et nous entourent au Plus qu'un défi technologique, la réalisation d'infrastructure dans les zones classifiées inconstructibles, représente un réel enjeu stratégique, économique et environnemental

Dans de nombreux cas courants comme :

- pour installer des entrepôts dans une zone portuaire dans laquelle les sols sont souvent très compressibles de par la géologie côtière (par exemple, Port du Bejaïa),
- pour construire un hôtel sur une ile artificielle en milieu marin (par exemple, hôtel Burdj al-arabe à Dubaï).

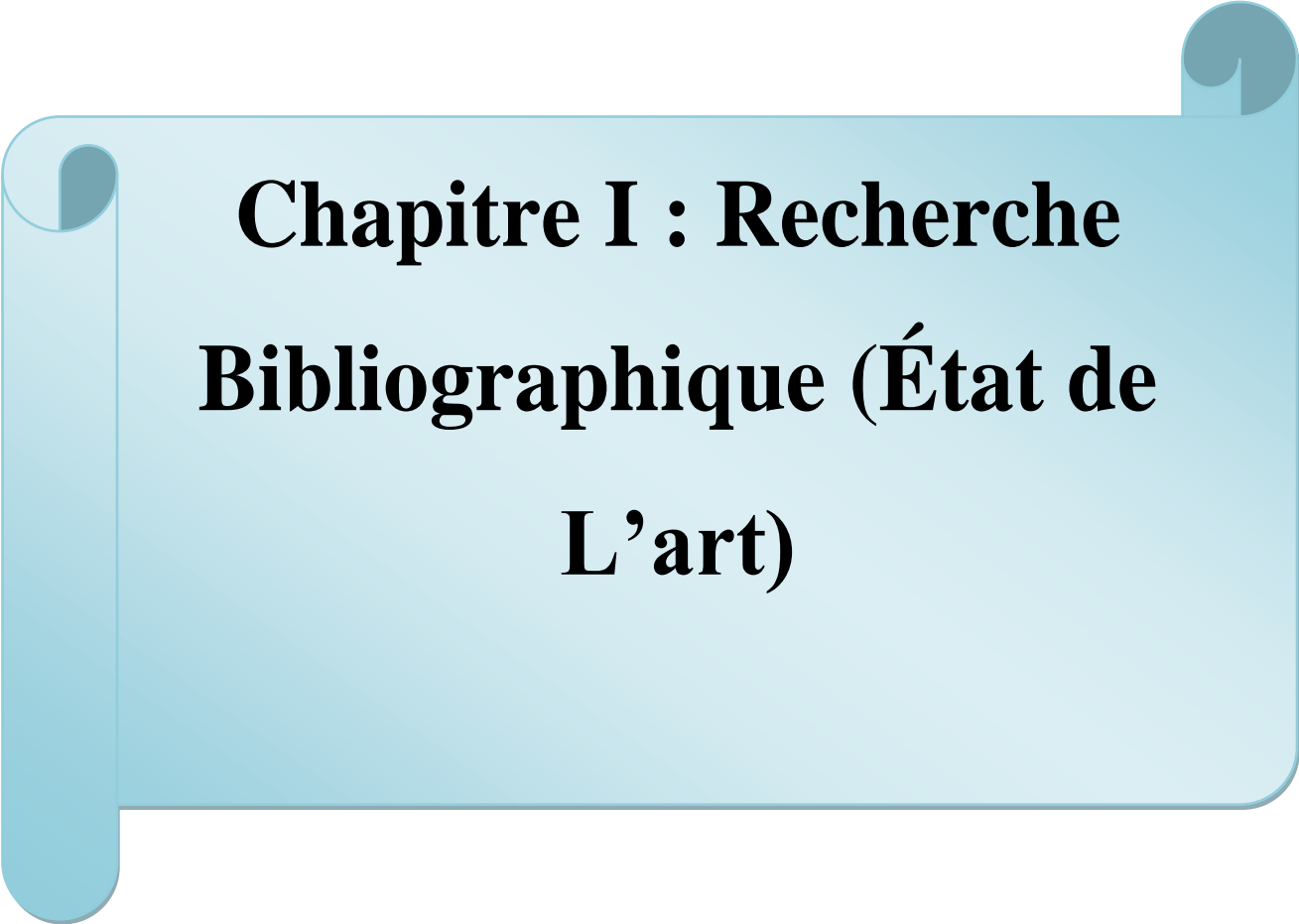
Parmi les techniques d'amélioration de sol on citera, les colonnes ballastées qui sera l'objet principal de notre travail. Cette technique, consiste à incorporer par compactage un matériau granulaire, dans un terrain présentant de faibles caractéristiques géotechniques, elle améliore les caractéristiques mécaniques des sols par augmentation de leurs capacités portantes et la réduction de leurs tassements sous les charges appliquées. Ces dernières peuvent aussi jouer le rôle d'un drain et réduire les risques de liquéfaction dans les zones sismiques.

Pour mener à bien cette étude, Le premier chapitre, sera sous forme d'une généralité sur les colonnes ballastées, consacré à la détermination du procédé d'exécution, ces différents modes de mise en œuvre et son domaine d'application, Le deuxième chapitre concernera présentation du logiciel de simulation Plaxis8.2 et la description de la fameuse loi de comportement dédié à la simulation du comportement des différents types des sols a été donnée. Ce modèle de



Introduction générale

comportement qui a été présenté dans ce chapitre est le modèle bien connu de Mohr-Coulomb. Le troisième chapitre, nous nous pencherons sur l'étude analytique et numérique du projet de fondation. Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives proposées sur le développement de cette technique d'amélioration des sols



**Chapitre I : Recherche
Bibliographique (État de
L'art)**

Introduction

Depuis les années 50, qui marquent la fin de la seconde guerre mondiale et le début d'une période de développement économique et industriel, les implantations de projets divers (bâtiments ; industriels, ouvrages enterrer, autoroutiers et ferroviaires) se multiplient dans des zones stratégiques mais parfois sur des «mauvais» sols considérés autrefois comme sols que en peut pas y construire. Lorsque les sols sont mous et compressibles ou très lâches ou d'origine anthropique (remblais hydrauliques et sous l'eau), on adopte généralement des fondations profondes pour reprendre les charges appliquées par l'ouvrage. Mais ces solutions se heurtent parfois à des contraintes techniques (substratum très profond, sols liquéfiables en zones sismiques,...) qui les rendent financièrement exorbitant.

Il est possible aujourd'hui de recourir à des techniques « nouvelles » permettant d'améliorer les caractéristiques mécaniques de sol. Ces techniques sont, de nos jours, diverses et directement liées à la nature du sol et à sa granulométrie. Elles consistent à améliorer le sol, en y incorporant des inclusions, ce qui permet de dégager différentes techniques et parmi ces techniques innovantes les colonnes ballastées, dont les premières utilisations en France remontent à plus de 40 ans, connaissent aujourd'hui un regain d'intérêt alors même que sont apparues un grand nombre de nouvelles techniques de renforcement et d'amélioration de sols, Les techniques d'amélioration des sols par colonnes ballastées ont été conçues pour renforcer les sols compressibles, elle permettent la mise en place des fondations superficielles sur des terrains qui appelleraient traditionnellement à des fondations profondes.

Définition des colonnes ballastées

Les colonnes ballastées : sont un procédé connu d'amélioration des sols fins (cohérents tels que les limons, les argiles) par conjugaison de plusieurs phénomènes tel que réorganisation du squelette granulaire pour son serrage, elles ont été mises au point et développées par Keller en 1950. Elles permettent de traiter les sols dont les caractéristiques sont insuffisantes. Par incorporation de matériaux granulaires appelés le ballast, ce dernier est mis en place par refoulement dans le sol et compacté par la suite. Ce procédé convient à des sols argileux ou limoneux contenant plus de 10% à 15% de limons et d'argiles. Ils ont généralement un diamètre de 0,60 à 1,20 m. Celles-ci reportent les charges à travers une couche de sol de qualité médiocre, sur une couche sous-jacente plus résistante. Elles ne fonctionnent que grâce à la réaction d'étreinte latérale de la couche de qualité médiocre traversée.

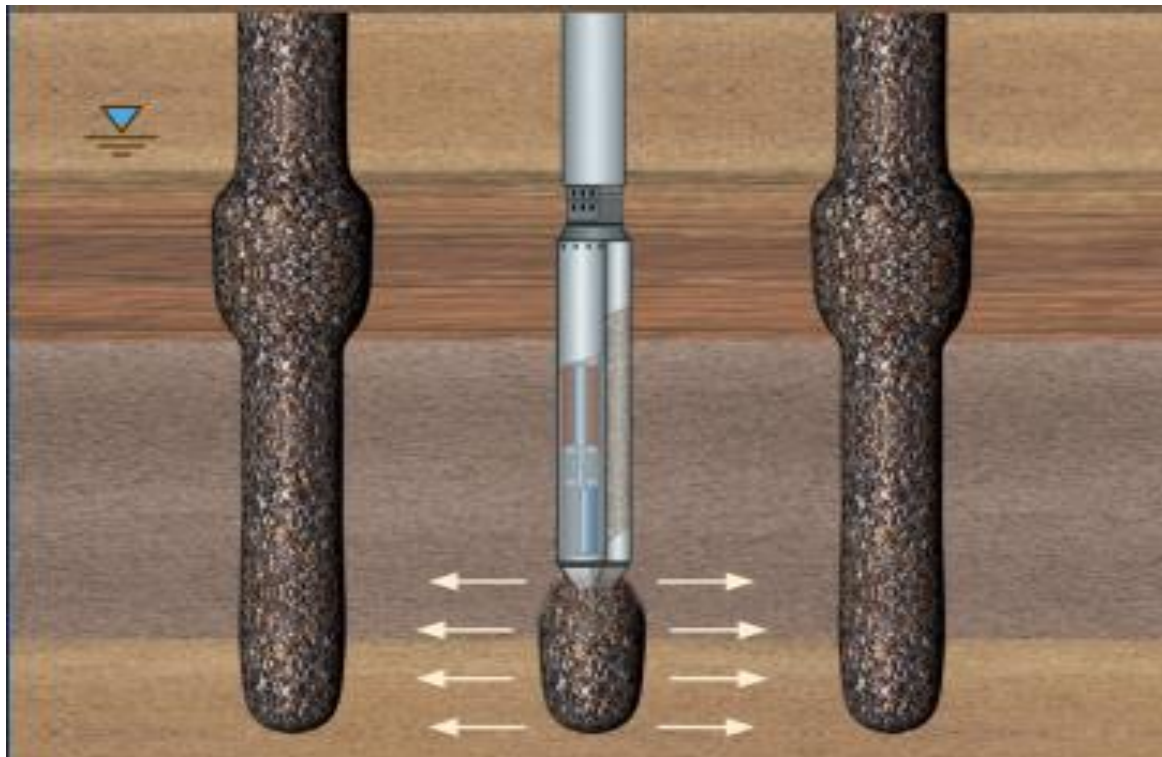


Figure I.1 : forme des colonnes ballastées

Les colonnes ballastées sont réalisées selon un réseau prédéterminé, dont la maille dépend de divers paramètres, comme les caractéristiques géo-mécaniques du sol naturel et l'intensité des charges appliquées. Afin de mieux opérer le transfert de ces charges vers les têtes de colonnes ballastées. Et ces dernières sont juxtaposées de manière à renforcer le sol de façon relativement homogène sur une surface importante. [1]

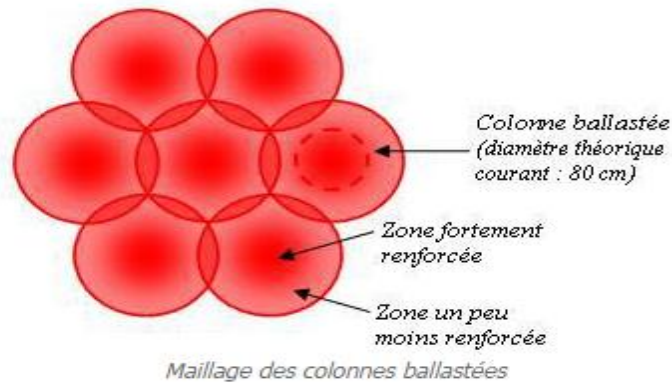


Figure I.2: Maillage des colonnes ballastées

I.1. Le Ballast

Le ballaste est un granulat provenant du concassage de roches durs de dimensions comprises entre 30 et 60 mm, sans fines. [2]

I.2. Les critères de qualité de ballast

- Dureté : la dureté du matériau ballast est exprimée au moyen d'un coefficient dit de dureté globale (DRG) ce coefficient est établi à partir de deux type d'essais essai Deval et Los Angeles.
- Forme : les grains sont de forme polyédrique, mais il existe aussi des grains allongés qui nuisent à la stabilité de la couche compactée car ils sont susceptibles de se rompre.
- Propreté : les grains de ballast doivent être expurgés du sable, terre, débris pouvant influencer la rugosité et le frottement entre les grains.
- Granulométrie: le ballast est un matériau granulaire de diamètre variant de 30 à 60mm il provient du concassage de roche extraites dans des carrières
- de pierres dure (granite, diorite, quartzite...).



Figure I.3: grain de ballast de 30/60mm

I.3. L'amélioration des sols compressible par colonnes ballastées

L'amélioration des sols compressible est maintenant utilisée dans le monde entier y compris en Algérie où le procédé commence à se lancer de plus en plus. Le but de toute réalisation de colonnes ballastées est de donnée au sol compressibles de nouvelles caractéristiques, sous l'ouvrage à construire, afin que les différents éléments d'infrastructure de celui-ci (semelles isolées ou filantes, radiers, dallages,...) aient un comportement justifiable et compatible avec les règlements. La technique de renforcement par colonnes ballastées [3] peut être utilisée pour assurer :

- L'augmentation de la capacité portante du sol.
- réduction des tassements.
- Traiter le potentiel de liquéfaction.
- Améliorer globalement les caractéristiques mécaniques du sol traité (la résistance au cisaillement horizontal, l'angle de frottement interne et les paramètres de déformation).
- accélérer la consolidation par l'effet drainant du ballast.



Figure I.4: Différentes formes de ballast

I.4 Domaine d'application des colonnes ballastées

On emploie la technique des colonnes ballastées en générale lorsque les sols sont de qualité médiocre et le coût du système de fondations profondes et du plancher est plus élevée que la réalisation des colonnes ballastées et L'emploi de ce type de renforcement de sol ne se fait que dans les terrains fins (principalement composés de limons et d'argiles). En effet, si le sol est granuleux, le matériau d'apport n'est plus nécessaire [3]

Les domaines d'application des techniques d'amélioration de sol sont représentés sur la figure I.4

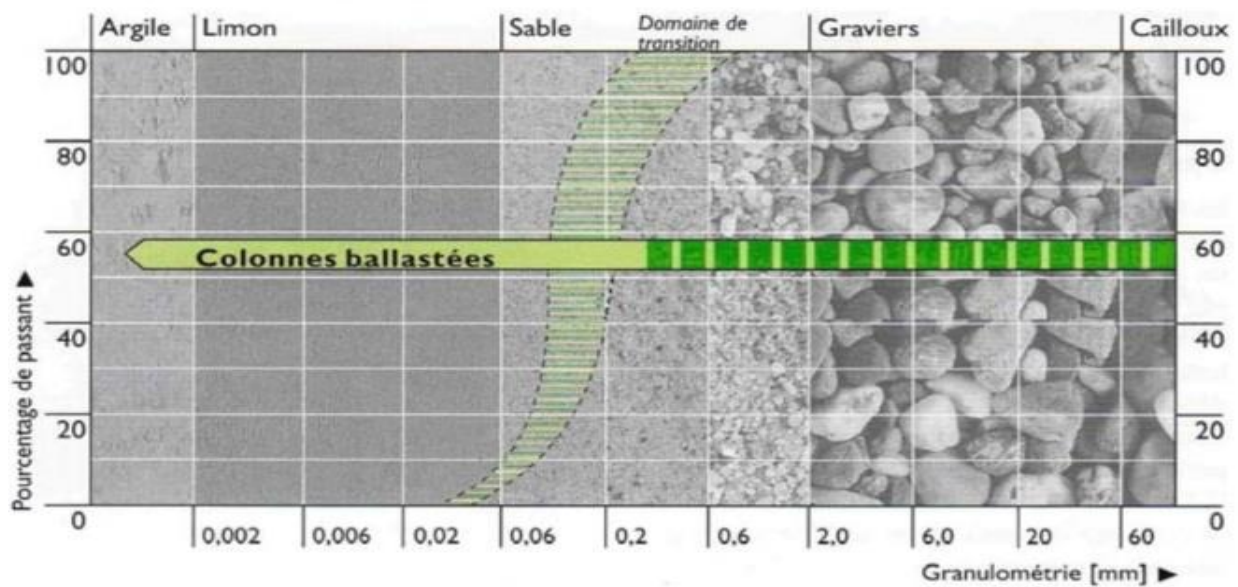


Figure I.5: Techniques d'amélioration du sol par colonnes ballastées (Document Keller)

I.5. Les procédés d'exécutions des colonnes ballastées

Le renforcement par colonnes ballastées d'un sol dont les caractéristiques mécaniques (cohésion et angle de frottement..) et de déformabilité (module de Young..) sont faibles. En d'autre terme, le sol initial ne peut pas constituer l'assise d'une fondation, à cause d'une capacité portante insuffisante ou en raison d'un tassement excessif et La plupart des sols fins ou granulaires peuvent se compacter sous l'effet des vibrations et du refoulement (ceci dépend principalement de la teneur en fines).

En règle générale, les colonnes ballastées sont réalisées avec un vibreur qui comporte, à son extrémité supérieure, un sas et une trémie pour les matériaux d'apport(ballast) comme le montre (la figure 03), puis ce dernier est acheminée jusqu'à la pointe lançage puis le vibreur est enfoncé dans la terre suit à son poids propre (figure 04.a) puis en le remonte et le ballast est incorporer dans la colonne (figure04.b) et en réintroduit le vibreur dans la colonne et le ballast et compacté (figure04.c) ensuit en applique la même procédure jusqu'à que les colonnes est plein.(figure04.d).[4]



Figure I.6.a: un vibreur a sas (document Killer)

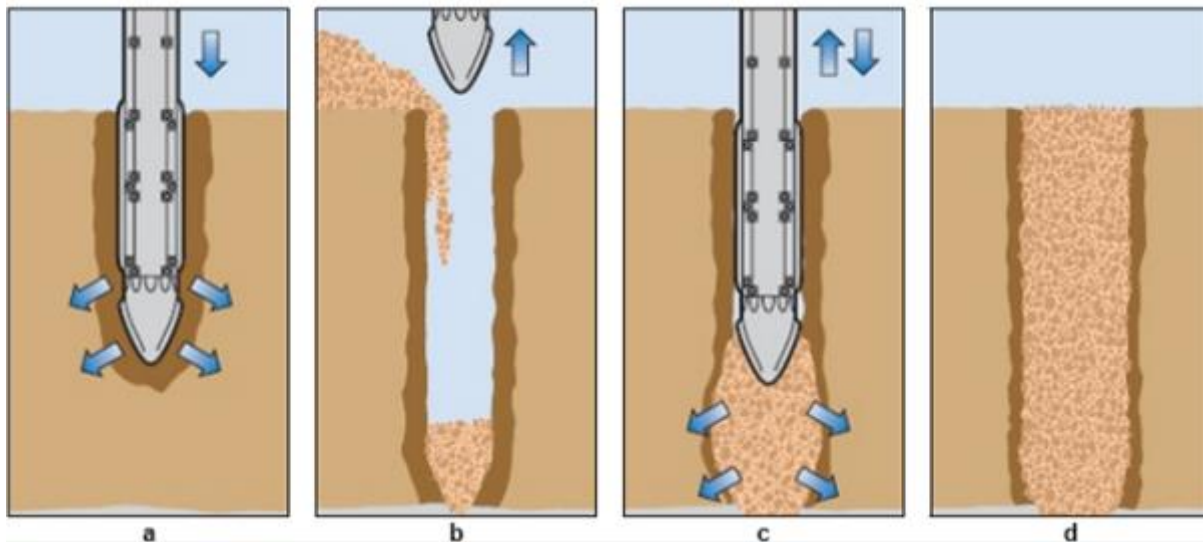


Figure I.6.b: séquence de réalisation d'une colonne ballastée (document Keller)

I.6. Les techniques d'améliorations des sols mous

Il existe principalement deux techniques qui dépendent toutes les deux de la nature et de la capacité portante de sol qui sont :

- le compactage vibratoire.
- Colonnes ballastées.

Ces techniques en générale utilise le même principe c'est à dire faire pénétrer le vibreur dans le sol mou puis l'outil vibrant est remonté par passe successives pour compacter le sol de bas en haut avec le procédé de Vibro-compactage, ou pour refouler le ballast qui est destinée à réaliser la colonne ballastée.

Vue d'ensemble

Les techniques de vibrations profondes offrent des solutions écologiques, simples à mettre en œuvre et très efficaces dans l'amélioration des sols. On les utilise pour tout type de construction sur des sols à faible portance, sous les dallages et les remblais. Keller a inventé un vibreur homologué en 1934, utilisé à l'origine pour compacter uniquement des sols granulaires (sable ou gravier). Depuis, Keller utilise un vaste choix de modèles de vibreurs et de techniques pour optimiser l'amélioration de sols, qu'ils soient de type granulaire ou cohésif

[5]

I.6.1. Le but d'améliorations des sols mous

- Augmenter sa résistance en place, pour augmenter sa capacité portante.
- Améliorer la stabilité d'un talus existants.
- Arrêter le mouvement d'une pente instable.
- Diminuer la compressibilité en place.
- Demeunier la perméabilité des sols.
- Accélérer la consolidation d'un dépôt d'argile

I.7. Les Techniques de mis en œuvres

I.7.1. La technique du Vibro-compactage (VC)

Cette technique permet le réarrangement optimal des matériaux granulaires pour augmenter la densité du sol local. (Figure 05)Le traitement des sols par Vibro-compactage consiste à améliorer la compacité naturelle des sables, afin de garantir en tout point des sols de fondation sableux des valeurs SPT[20] ou CPT[21] définies après la planche d'essai .Le sol est amélioré à la remontée du vibreur en suivant un programme de paliers successifs de 50 à 100 cm en fonction du terrain et de la puissance du vibreur utilisé.

Ce type de traitement est efficace dans les terrains granulaires propres (sable, gravier dont la teneur en fines est inférieure à 10%). Le maillage du traitement dépend également de la puissance du vibreur et de la nature du sol à améliorer. De plus, cela dépend aussi du facteur d'amélioration que l'on souhaite apporter qui varie en fonction des besoins du Projet.

Lors des travaux, un tassement de l'ordre de 5 à 10 % de la hauteur traitée se produit. Ce tassement est synonyme de l'amélioration apporté et de la densification du sol en place .[6]

La figure I.7 montre les grains du sol avant et après le traitement.

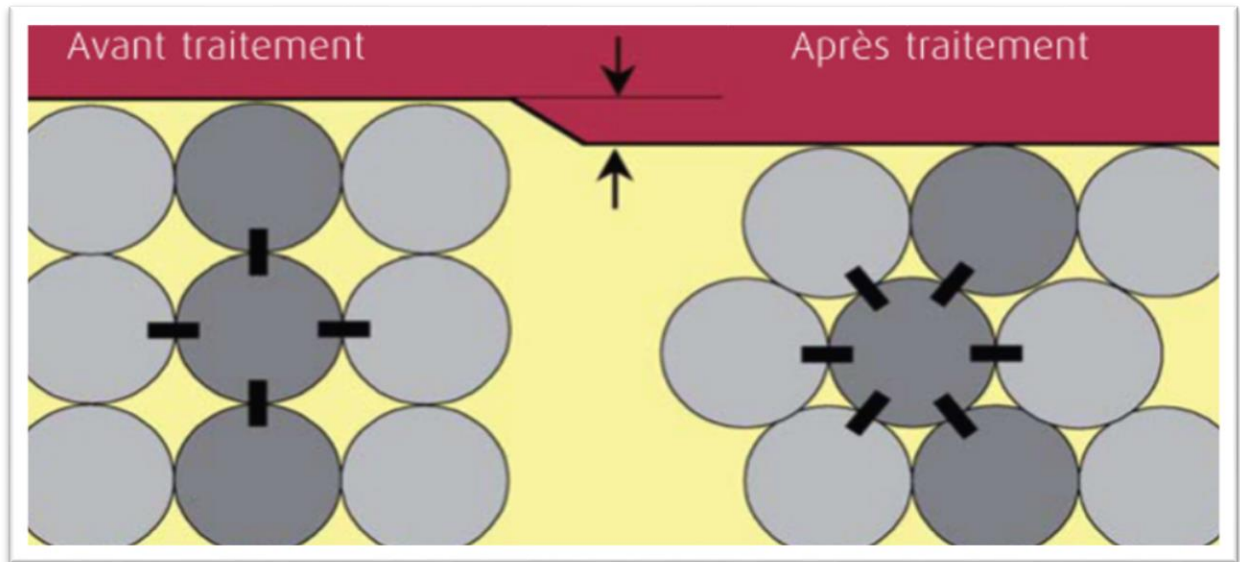


Figure I.7: réarrangement des grains lors du compactage (entreprise SIF)

I.7.2. Mode opératoire

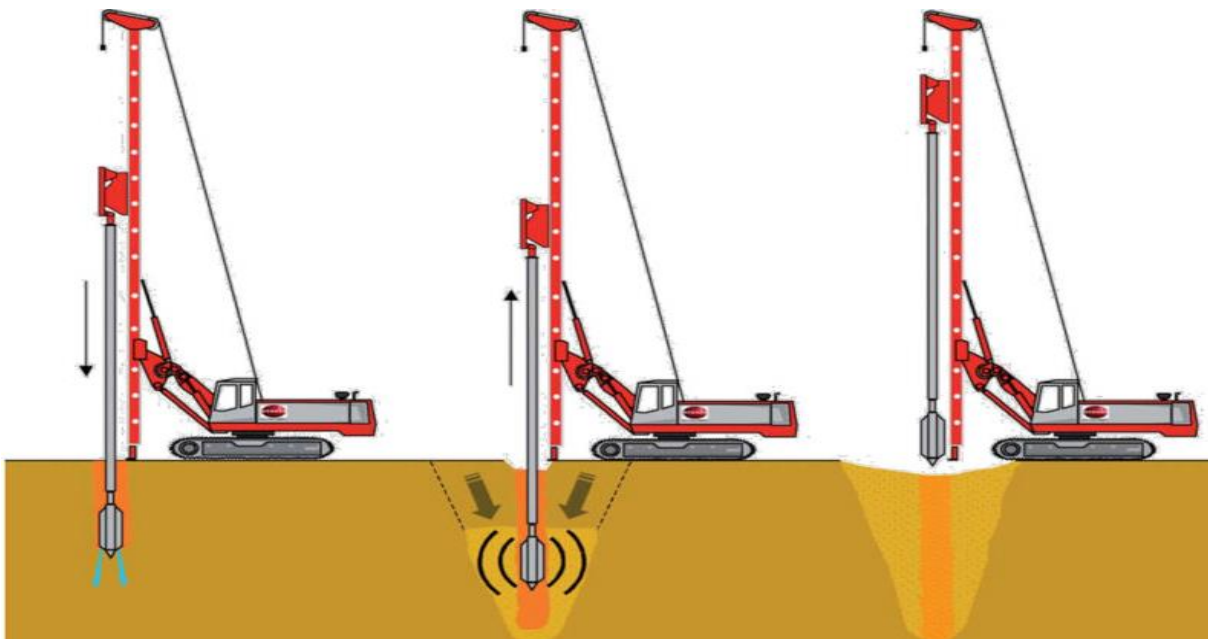


Figure I.8: mode opératoire par la méthode Vibro-compactage (entreprise SIF)

- ◆ **Forage:** en raison des effets combinés de son poids et de ses vibrations, le vibreur est sombré à sa profondeur finale.

- ◆ **Compactage** : Le Vibro-compactage est alors réalisé par passes successives de bas en haut. Le volume compacté est un cylindre d'un diamètre pouvant atteindre 5m. L'augmentation progressive de l'intensité consommée par le vibreur permet la croissance de la compacité du sol.
- ◆ **Apport de matériaux** : Autour du vibreur apparaît un cône d'affaissement (voir la figure I.9), que l'on comble au fur à mesure par des matériaux d'apport, soit en découpant progressivement les matériaux du site (voir la figure 06.b).En fonction de l'état initial, on peut atteindre une quantité de 10% de matériaux ajoutés par rapport au volume traité.
- ◆ **Finition** : Après traitement, en ré-compactée à l'aide d'un rouleau vibrant.



Figure I.9 : Le cône d'affaissement autour de vibreur (barrage -Harka- TUNISIE)



Figure I.10: Remplissage de l'affaissement conique par un matériau d'apport
(Barrage -Harka- TUNISIE)

I.7.3.A. La technique de colonne ballastée

Cette technique utilisée dans les sols cohésifs ou les sols granulaires avec une forte teneur en fines Elle consiste à réaliser des colonnes de renforcement à l'aide de granulats roulés ou concassés. Il existe plusieurs modes de construction des colonnes ballastées en tenant compte du fluide de lançage, air ou eau, et du mode d'alimentation du ballast, soit par le haut, soit par la base du vibreur[7]en distingue :

1. colonne ballastée par voie sèche. (On utilise le lançage à l'air).
2. colonne ballastée par voie humide. (On utilise le lançage à l'eau).
3. Colonnes ballastées par pilonnage

I.7.3.B. Colonnes ballastées par voie sèche

Pour la réalisation des colonnes ballastées par voie sèche, dite encore par vibro-refoulement, Le forage est réalisé sous la pression d'air comprimé qui aide à la pénétration du vibreur et ce dernier permet aux matériaux granulaires d'être acheminés jusqu'à la pointe du vibreur.

La réalisation se déroule en deux temps : le vibreur est d'abord légèrement remonté, permettant aux matériaux granulaires de combler le forage, puis redescendu dans la colonne ainsi constituée de manière à compacter et comprimer les matériaux introduits dans le sol alentour jusqu'à ce que la colonne est remplis (figure 07-1) [8]

La figure I.11 : montre les différentes étapes de la réalisation de colonne ballastée.

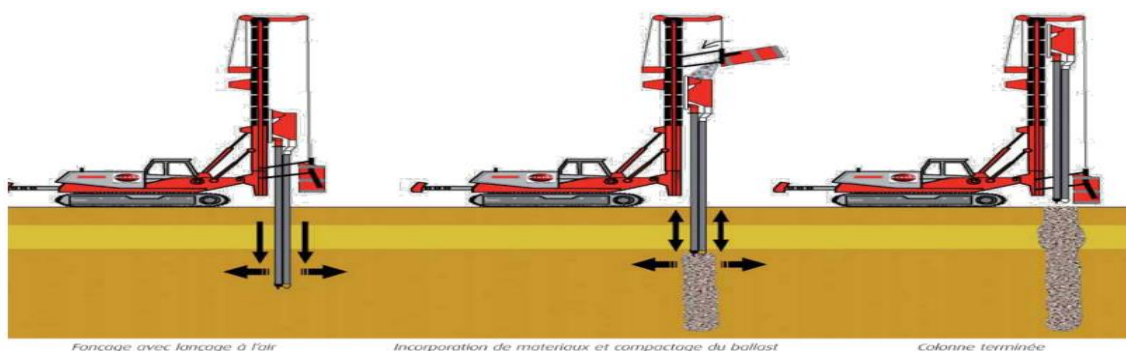


Figure I.11: étape d'exécution de la colonne ballastée par la voix sèche (Entreprise SIF)



Figure I.12: finition d'une colonne par voie sèche (site : mosquée de boudouaou)
(Laboratoire legeotech)

♦ **Le type de vibreur utilisé dans la voie sèche**

Le vibreur utilisé est entièrement instrumenté et doté d'un système d'acquisition de données embarqué. Les données du système peuvent ensuite être enregistrées et affichées sur un moniteur en cabine.

Les avantages de ce vibreur :

- Assure une parfaite verticalité des colonnes,

Et peut mobiliser un effort de poussé supérieur à 250kn

- Il n'y aura pas de risque d'éboulement du forage dans les sols instable.
- Le matériau d'apport arrive directement à l'orifice de sortie, ce qui assure la continuité de la colonne. [8]

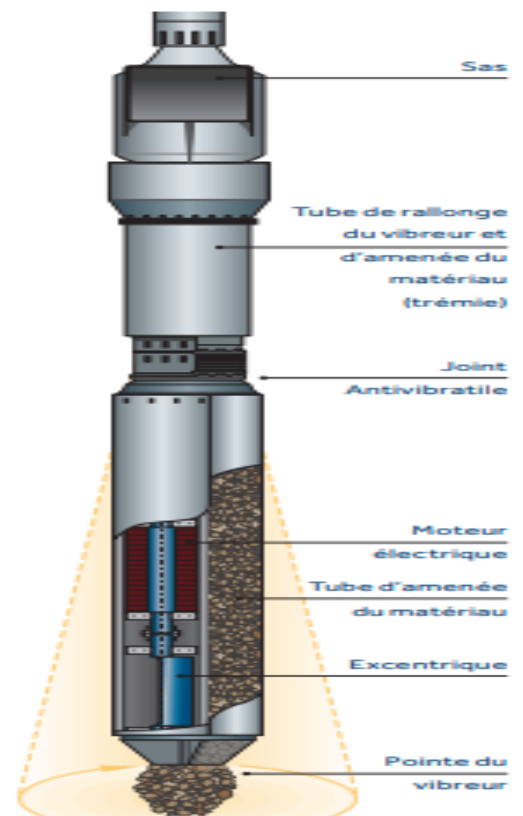


Figure I.13: vibreur utiliser pour lavoie sèche et ces composant (Document Keller).

I.7.3.B. Voie humide (vibro-substitution)

Cette méthode consiste à :

Réaliser un forage par lançage à l'eau (figure 08) jusqu'à la profondeur désignée à l'aide d'un vibreur puis en remonte ce dernier et laisser tomber le ballast dans le forage préalable ensuite Compacter le ballast par passes successives jusqu'à la finition de la colonne Cette dernière sera finie avec un diamètre de 0.8 à 1.2 m. Plus que le sol en place est compressible, plus que l'expansion de la colonne sera significative.[8]



Figure I.14: Le débute d'opération de forage par voie humide (Laboratoire legeotech)

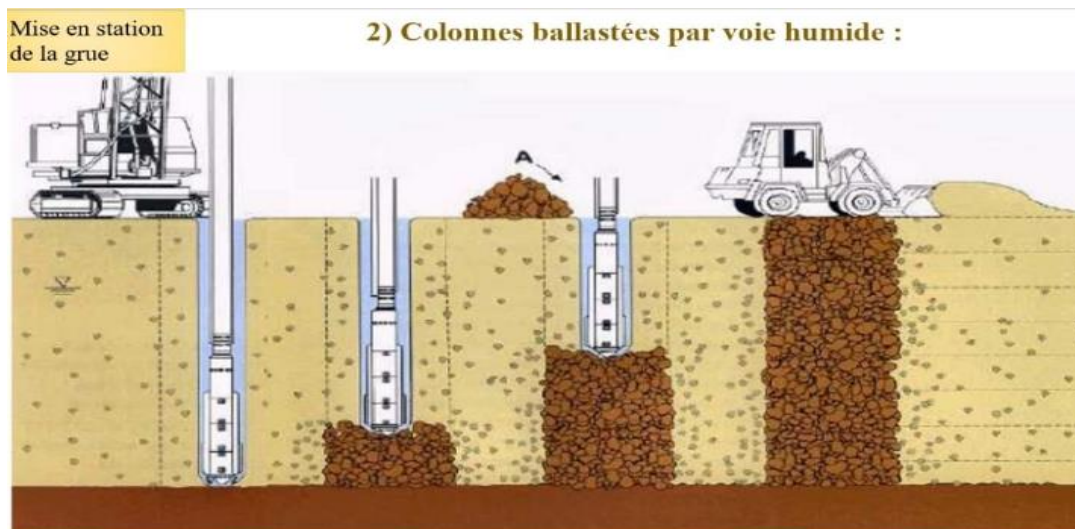


Figure I.15: schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide (Laboratoire legeotech)

- *Le type de vibreur utilisé dans la voie humide*

Le vibreur porté par un Engin porteur : L'engin porteur est une grue à flèche treillis, sur chenilles. La base porteuse est de 40 à 60 tonnes environ

Le vibreur comporte dans sa partie inférieure, légèrement au-dessus de sa pointe, un excentrique entraîné par un moteur électrique.

Le vibreur est prolongé par des tubes complémentaires jusqu'à la profondeur à atteindre. Il fonctionne avec un lançage à eau.

Les orifices de sortie d'eau se trouvent à la pointe du vibreur. L'alimentation en eau sous pression est assurée par une pompe.

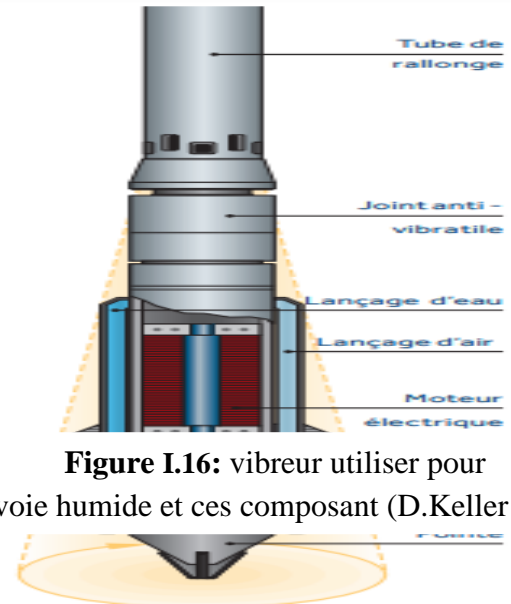


Figure I.16: vibreur utiliser pour lavoie humide et ces composant (D.Keller).

I.7 3.C. Colonnes ballastées par pilonnages

Appelée aussi méthode pieux de gravier Franki, le forage s'effectue à l'aide d'engins spécialisés (figure10), proches de ceux utilisés pour le compactage dynamique elle garantit la réalisation d'une colonne compactée énergiquement dont le diamètre varie en fonction de la qualité du gravie rapporté.



Figure I.17: Engin de réalisation de colonne ballastées pilonné (Höhenhof de l'aéroport du Findel, Killer)

Cette méthode est exécutée en 5 étapes :

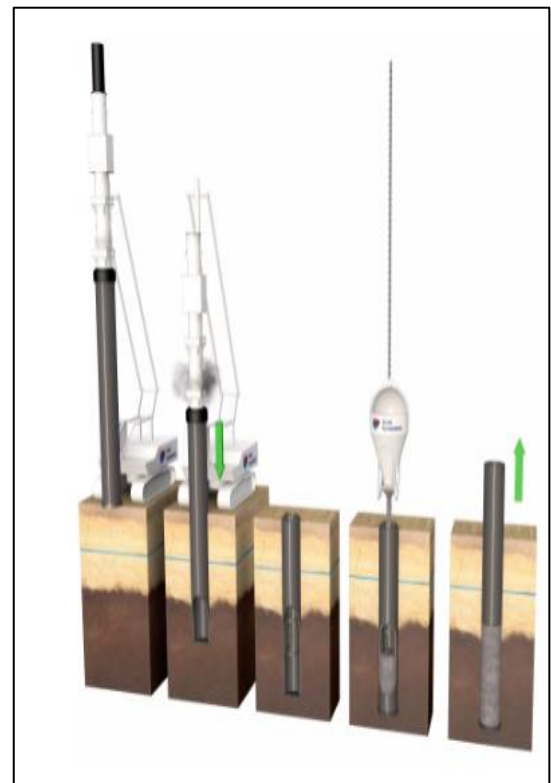
1. Implantation du pieu et mise en place du tube de battage avec plaque métallique perdue.
2. Enfoncement du tube dans le sol par battage en tête du pieu avec un marteau de battage (mouton hydraulique ou diesel).
3. Mise en place de l'armature à l'arrêt du battage, lorsque le tube a atteint la profondeur d'assise.
4. réalisation de la colonne par damage de charges de gravier et extraction du tube.
5. Extraction du tube de battage en acier (Atlas Fondation)

1 2 3 4 5

Figure I.18: les étapes de pilonage
(techni.ch).

I.7.3. Analogies et différences entre les trois techniques

- ◆ Les trois techniques déployées en œuvre des colonnes ballastées présentent les analogies suivantes [3]
 - La colonne ballastée est réalisée par incorporation de matériau drainant et frottant de gros diamètre dans les oltraîté;
 - Le matériau de ballast remplit le trou de forage dès le retrait de l'outil par remontée progressive (passes de 0,5) puis est refoulé latéralement dans le sol;
 - Le compactage optimal du gravier et son refoulement latéral sont obtenus sous l'effet des vibrations et d'un effort axial exercé sur la pointe de l'outil (vibreur ou pilon), qui peut atteindre, voir excéder 300KN;
 - L'augmentation instantanée de l'effort à la pointe du vibreur ou du pilon (visualisé par les enregistrements de paramètres) jusqu'à une



valeur critique, permet de vérifier que le compactage optimaux t'atteint. Cette valeur critique varie selon la nature du terrain;

- Les colonnes ballastées sont exécutées à partir d'une plateforme de travail carrossable généralement pour engins de 300 à 400 KN sur chenilles (grues, atelier à mat vertical fixe).
- ◆ Les différences entre ces trois techniques de mise en œuvre
1. Dans la voie humide, le vibreur est enfoncé par lancement à eau jusque dans les inévitables remontées de boues, qu'il faut évacuer hors duite ; Le forage à l'eau provoque une extraction de terrain, alors qu'il y a refoulement lors du forage à l'air dans la voie sèche ou lors du pilonnage. Il en résulte que le diamètre du forage est plus important dans le cas des colonnes exécutées par voie humide.
 2. Dans la voie sèche, le vibreur est descendu avec lancement à air et il refoule les collatéralement sans remontée et ni évacuation de matériau ; Dans la technique par voie sèche, le gravier alimenté par une benne hissée au moyen d'un treuil descend dans un tube intégré jusqu'à la pointe du vibreur ; La réalisation de colonne ballastée par voie sèche offre plus de garanties quant à la continuité de la colonne en réduisant les risques de mélange du ballast avec le sol si les parois du forage sont bien stables.
 3. La qualité de l'exécution des colonnes ballastées pilonnées est assurée aussi par la mise en œuvre, à l'intérieur du tube provisoire, du gravier sans mélange avec le terrain encaissant, gravier compacté et repoussé dans le terrain par la chute du dameur placé à l'intérieur du tube.

I.7.3.E. Colonnes Ballastées en mer

Sous les ouvrages maritimes il est parfois nécessaire d'améliorer le sol de fondation ; l'application des méthodes terrestres aux milieux maritimes nécessite des techniques différentes, (en générale 02 techniques sont utilisées pour la construction des colonnes sous-marines [9]):

- La méthode du tapis de ballast

La méthode du tapis de ballast (Fig. 11) est une méthode de construction des colonnes en voie humide avec alimentation par le haut.

Elle consiste à la mise en place d'un tapis épais de ballast sur le fond de la mer (pour des colonnes ballastées de 10 m de long et 90 cm de diamètre selon une maille carrée de 3 m, il faut un tapis de près de 3 m d'épaisseur). Mise en place à l'aplomb du point de traitement de la barge portant grue et aiguille vibrante,

Descente de l'aiguille jusqu'à la surface du tapis de ballast et mise en route du vibreur et de la pompe de lancement, Fonçage de l'aiguille à travers le tapis et le terrain en place jusqu'à la profondeur requise, Exécution de plusieurs "ramonages" en remontant et redescendant rapidement l'aiguille sur toute la hauteur de la colonne afin de créer autour de l'aiguille un espace annulaire dans lequel les éléments de ballast du tapis pourront descendre jusqu'à atteindre le pied du forage, Construction de la colonne par courtes passes remontantes successives (pas plus de 50 cm, usuellement) en utilisant la mesure de l'énergie absorbée par le moteur du vibreur comme moyen de contrôle de la compacité et de la continuité de la colonne.

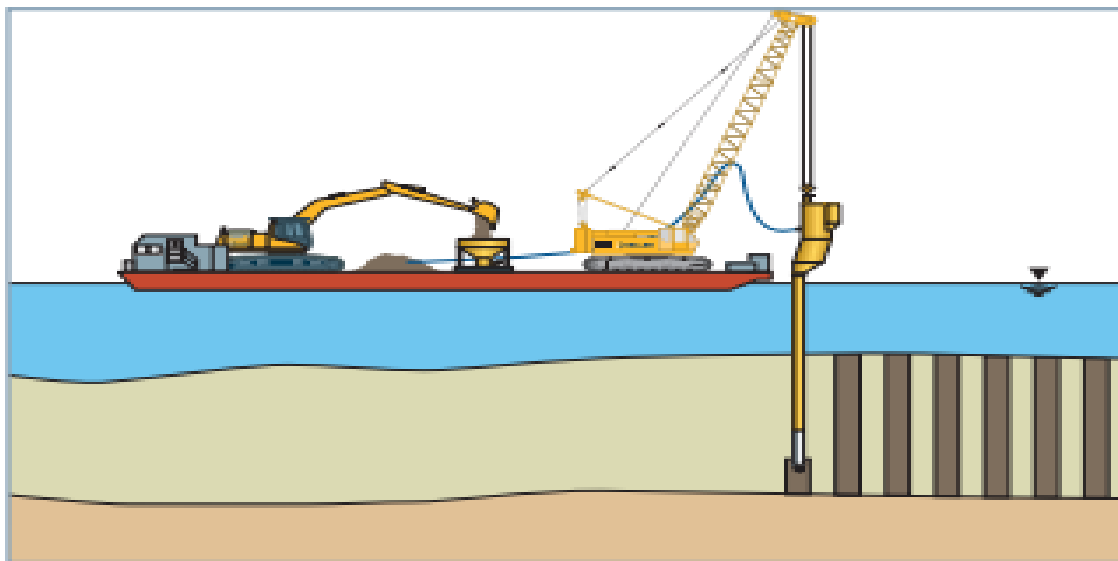


Figure I.19: colonne ballastées en mer par La méthode du tapis de ballast

(document killer)

- La méthode de la trémie-réservoir unique

Il s'agit d'une méthode d'alimentation par la voie humide, dans laquelle le tube d'alimentation est soudé le long de l'aiguille vibrante (vibreux et un tube d'extension), et il y a une grande trémie à l'extrémité supérieure. La trémie a une capacité légèrement supérieure à la consommation de ballast prévue de la colonne et elle est équipée d'une trappe à commandé

hydraulique a son fond qui permet l'évacuation des pierres de la trémie vers le tuyau d'admission.

Cette méthode comprenne les étapes suivantes :

- 1- Des aiguilles vibrantes sont suspendues à des grues au bord de barge.
- 2- Remplir la trémie avec la quantité désirée de ballast.
- 3- L'aiguille est les cailloux sont abaissées au fond marin et puis la pompe et le vibreur de lancement sont activés. Les colonnes sont construites en utilisant des mouvements ascendants et descendants continus à travers des canaux ascendants. Permettant la décharge et le compactage du ballast au bas du vibreur.



Figure I.20: Atelier de réalisation de colonnes ballastées en mer

(Document the Vibro-flotation group).

I.8. Comportement des colonnes ballastées

I.8.1. principe de la cellule unitaire

Soit un ouvrage gigantesque de grandes dimensions qui transmet une charge Q générant une contrainte uniformément répartie σ_0 , sur un massif de sol traité par un réseau de colonnes ballastées [10]

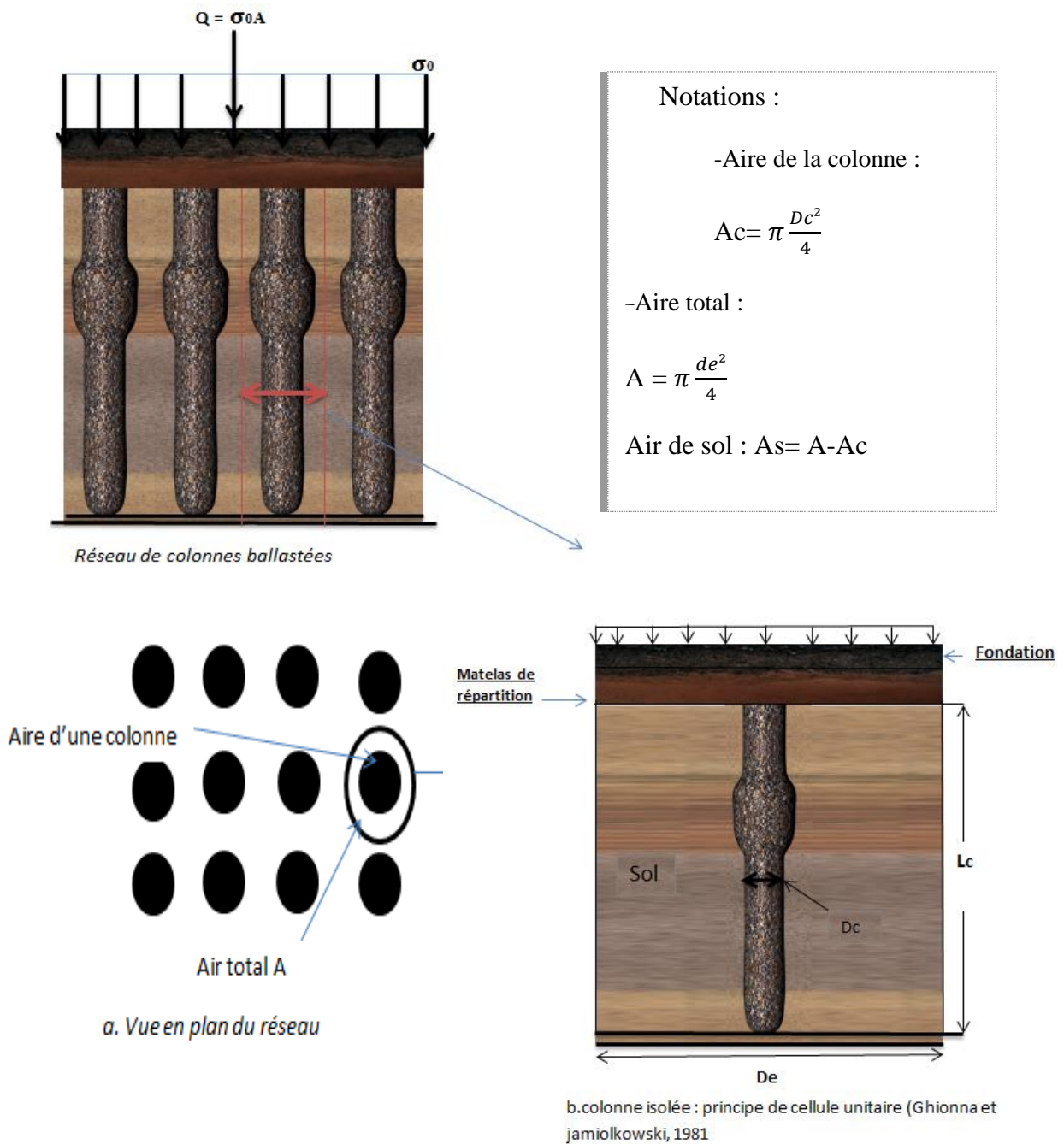


Figure I.21: Réseau de colonnes ballastées - Colonne isolée et principe de la cellule unitaire.

Pour toutes études de comportement et de dimensionnement des colonnes ballastées on doit impérativement introduire les trois paramètres caractéristiques suivant :

1er. Le coefficient de substitution noté (a):

Soit dans le cas des colonnes mis en œuvre par voie humide ou par voie sèche le coefficient de substitution ou nommé aussi le taux d'incorporation (a) est le rapport de l'aire traité c'est-à-dire de la section de la colonne (A_c) à l'aire totale (A) du domaine d'influence de la colonne comme il est montré à la figure 12.

Donc :
$$a = \frac{A_c}{A}$$

2e. Le facteur de réduction des tassements noté (β) :

Il s'agit d'un variable important permettant pour particulariser l'efficacité du traitement de sol, (S_i) représente le tassement moyen produit, en l'absence des colonnes ballastées, par la contrainte σ_0 appliquée par la fondation au sol d'assise. (S_f) désigne le tassement du milieu sol/colonne obtenu après traitement.

Alors :
$$\beta = \frac{S_i}{S_f}$$

La figure I.22 montre la différence de tassement avant et après traitement

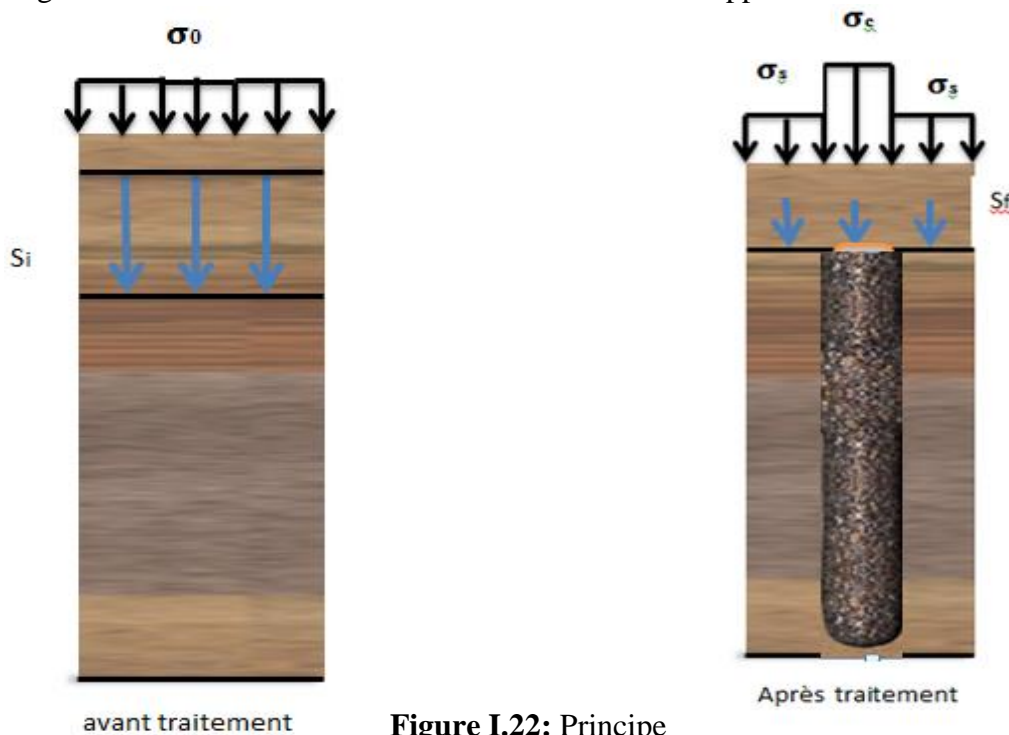


Figure I.22: Principe
réduction des tassements et de concentration des charges.

Avec ces notations de la fig13 en peut déduire le **paramètre de rapport de concentration des contraintes (n)**, qui es un paramètre essentiel pour caractériser le comportement de la colonne ballastée.

Cette concentration se développe au fur et à mesure De l'évolution de la consolidation du sol autour de l'inclusion. Il convient de noter que ce rapport dépend aussi du type de fondation qui supporte la charge σ_0 . Ce rapport est moins accentué dans le cas des fondations souples (remblais, dallages, radiers souples).

Il est définie par :
$$\mathbf{n} = \frac{\sigma_c}{\sigma_s}$$

I.8.2. Equation d'équilibre

La relation entre la contrainte moyenne σ_0 , la contrainte transférée à la Colonne et la contrainte σ_s supportée par le sol encaissant la colonne est défini par L'équation suivante :

$$\sigma_0 \cdot A = \sigma_c \cdot A_c + \sigma_s \cdot A_s$$

En introduisant la valeur du taux d'incorporation $a = \frac{A_c}{A}$ l'équation devient :

$$\sigma_0 = a \cdot \sigma_c + (1 - a) \cdot \sigma_s$$

I.8.3. Relation entre les paramètres caractéristiques n et β

Dans l'hypothèse d'un comportement purement élastique du solet du ballast et dans le cas des fondations rigides, Dhoub (2005) indique dans ce cas :

que le rapport de concentration des contraintes ne dépend que des modules de Compressibilité élastiques E_c et E_s :

$$\mathbf{n} = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} = \frac{E_c}{E_s}$$

Cette relation peut s'établir en considérant que la colonne et le sol se comportent de manières indépendantes. D'où

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = \frac{S_f}{L} = \frac{\sigma_c}{EC} = \frac{\sigma_s}{Es}$$

Ce qui permet d'aboutir à la relation de (n) mais ceci constitue une grande simplification (Vincent SIX, 2006)

Avec $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ est la déformation identique de la colonne et du sol (en cas de fondations rigides). Remarque :

$$\text{On peut admettre que } \mathbf{n} = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} = \frac{Ec}{Es}$$

Avec une grande précision si on travaille avec les modules œnométriques, car le module œnométriques, est donné par :

$E_{oed} = \Delta\sigma/\varepsilon$ pour un palier de chargement.

Dans l'hypothèse d'un comportement purement élastique du sol et du ballast, et en supposant que les module élastiques restent constants, Soyez (1985) indique aussi que $\beta = \frac{\sigma_0}{\sigma_s}$

Il vient alors : $\beta = 1 + n - 1. a$

D'où

$$\sigma_c = n. \sigma_s = n. \sigma_0 \frac{n. \sigma_0}{(n-1). a + 1}$$

I.9. Modèles de comportement mécanique des colonnes ballastées sous chargement Statique vertical et horizontal

I.9.1. Colonnes isolées

- mode de déformation axial et latéral d'une fondation souple

Sous une charge verticale

sous une fondation souple (figure I.23) les tassement sur la colonne est moins important que sur les tassement de sol toutefois le rapport de charge vertical est moins accentué, les contraintes réparties sur le sol (σ_s) et sur la colonne (σ_c) évolue dans un rapport de 3 à 5 (Vautrain, 1980) et (Wallays, 1983) indique que sous des ouvrages souple considérés comme remblais (Vautrain, 1980) et des cuves de station d'épuration (Faure, 1982) les deux tassements ne se diffèrent que de quelques centimètres

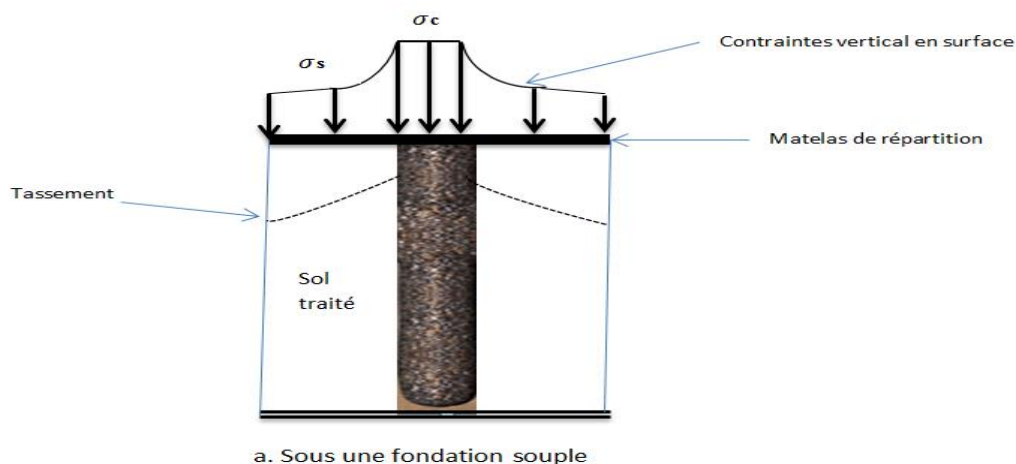


Figure I.23: mode de déformation axial pour une fondation souple (Eggstad, 1983)

Sous une charge horizontale

Dans une charge horizontale, la contrainte horizontale, qui résulte de la contrainte horizontale initiale dans le sol et de la contrainte de compression exercée dans le ballast augmente jusqu'à une profondeur caractéristique puis elle diminue comme le montre (la figure I.24)

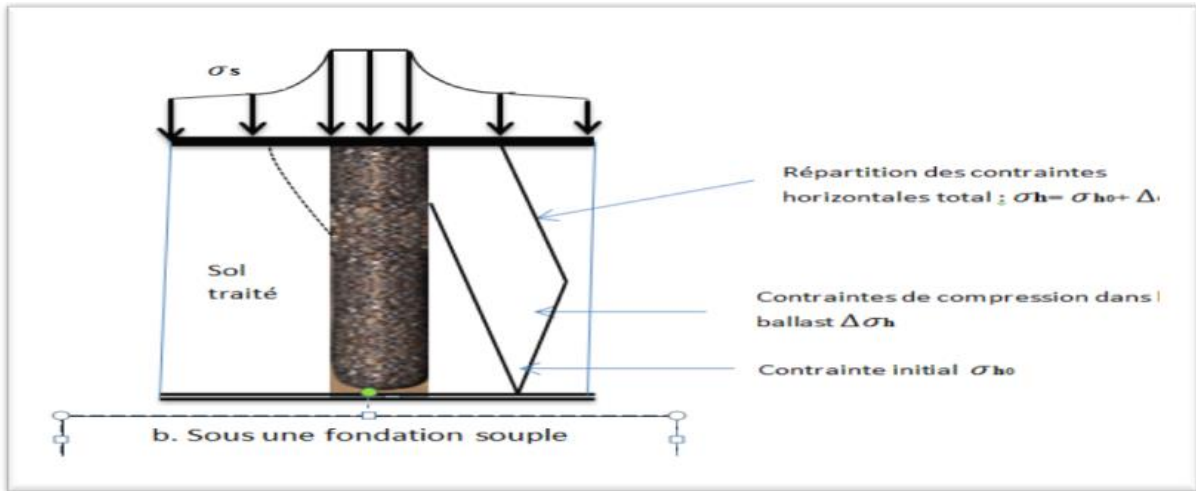


Figure I.24: mode de déformation radial pour une fondation souple (Eggestad, 1983)

- mode de déformation axial et latéral d'une fondation rigide

Sous une charge verticale

Sous une fondation rigide (figure 15.a) une concentration importante des contraintes sur la colonne et un bon déchargement du sol, et ce qui concerne les tassements dans ce type de fondation ils sont identique (soyez, 1985 : Belcotec, 1985) et ça grâce au caractère de l'indéformabilité de la fondation.

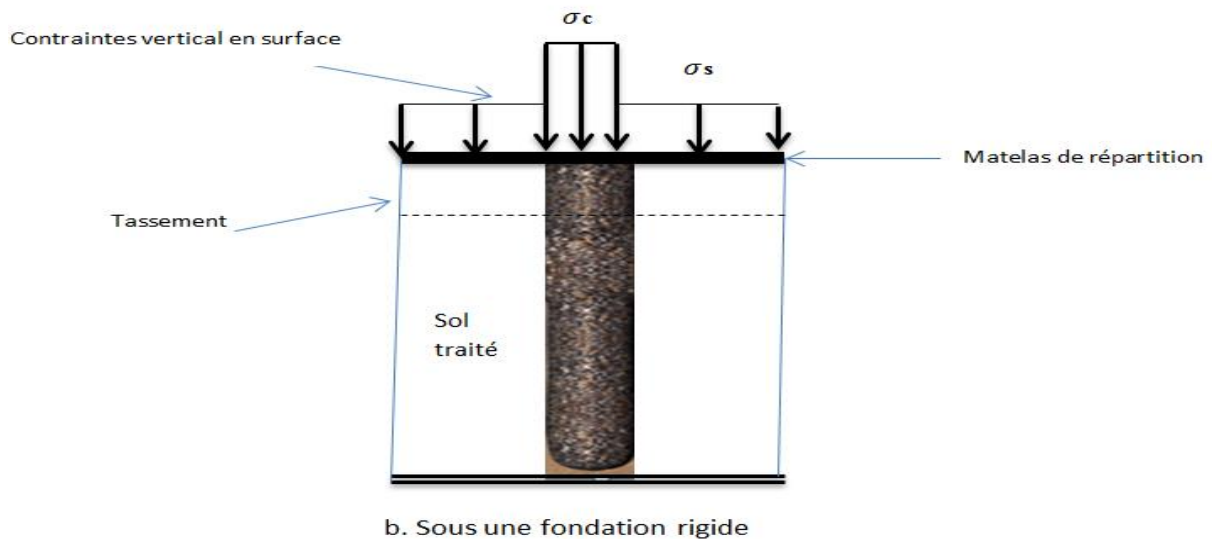


Figure I.25 : mode de déformation axial d'une fondation rigide (Eggestad, 1983).

Sous une charge horizontale

Alors que sous une charge horizontale la contrainte totale horizontale décroît linéairement en fonction de la profondeur.

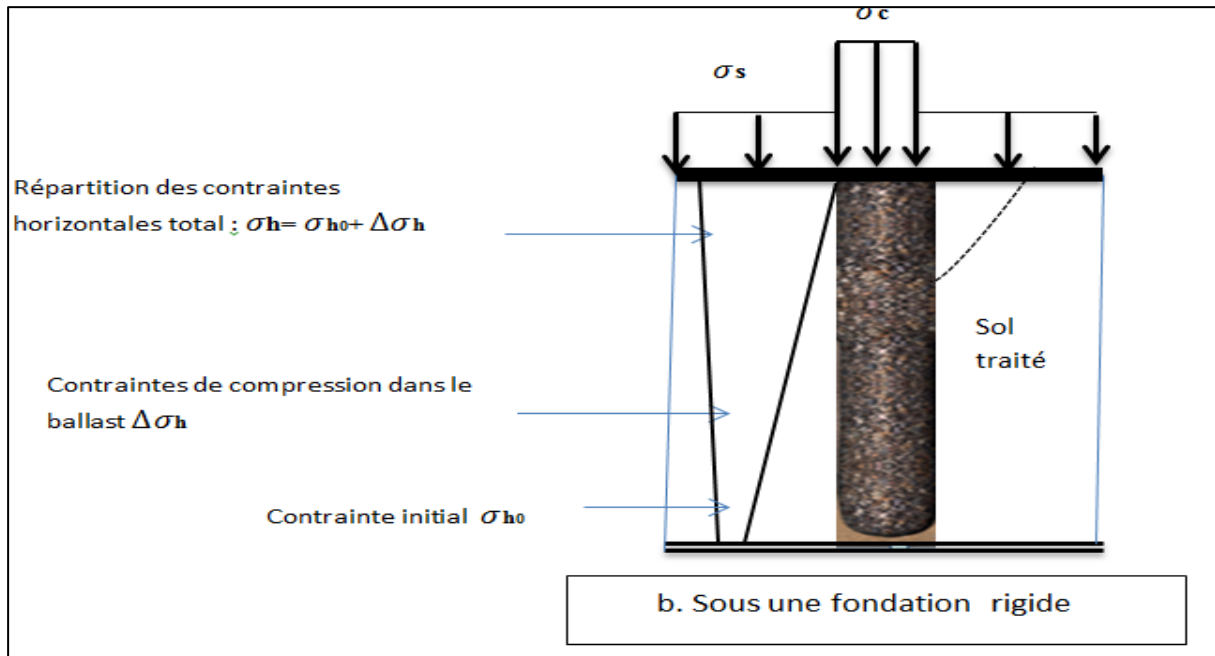


Figure I.26: mode de déformation radial d'une fondation rigide (Eggestad, 1983).

I.9.2. Mécanismes de rupture

D'après Datye (1982) Le mécanisme de rupture pour une colonne ballastée isolée se dérouler selon 3 rupture qui sont :

- a. Rupture par expansion.
- b. Rupture par cisaillement généralisé.
- C. Rupture par poinçonnement (colonne flottante).

La figure I.27 montre ces différents mécanismes de rupture

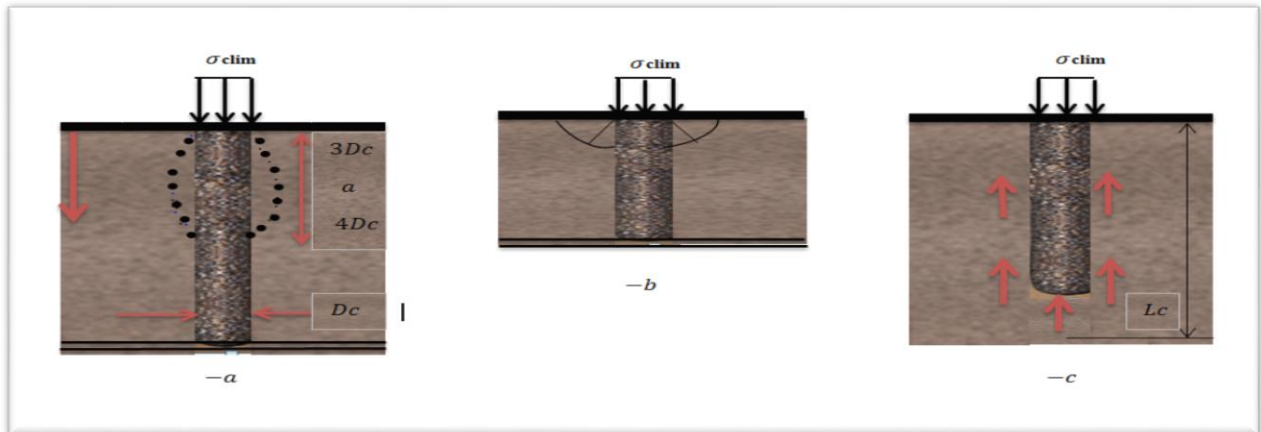
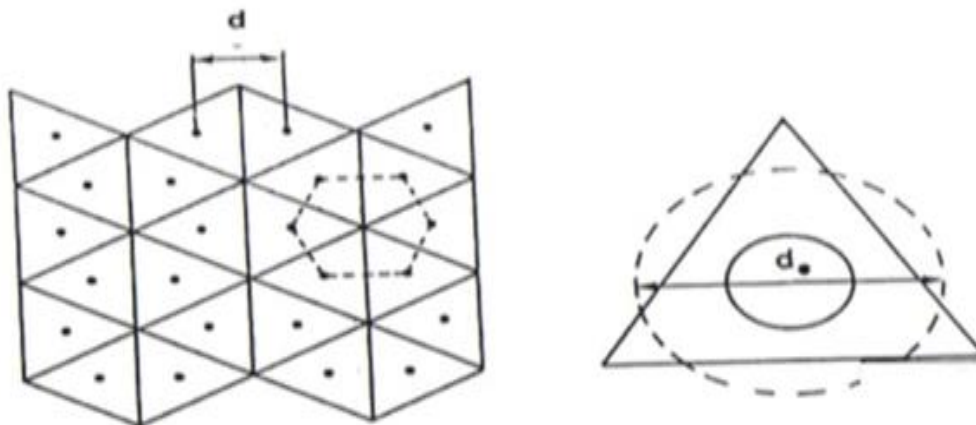


Figure I.27 : mode de rupture d'une colonne ballastée isolée sous charge axiale en tête
(Datye, 1982)

I.10. Modèles de comportement d'un réseau de colonnes ballastées [11]

Les colonnes ballastées sont généralement disposées selon trois maillages différents qui sont :

- Un maillage triangulaire.
- Un maillage carré.
- Un maillage hexagonal.



Maille triangulaire: $d_e = 1.29d$

Figure I.28.a : Domaine d'influence de la colonne (maille triangulaire)

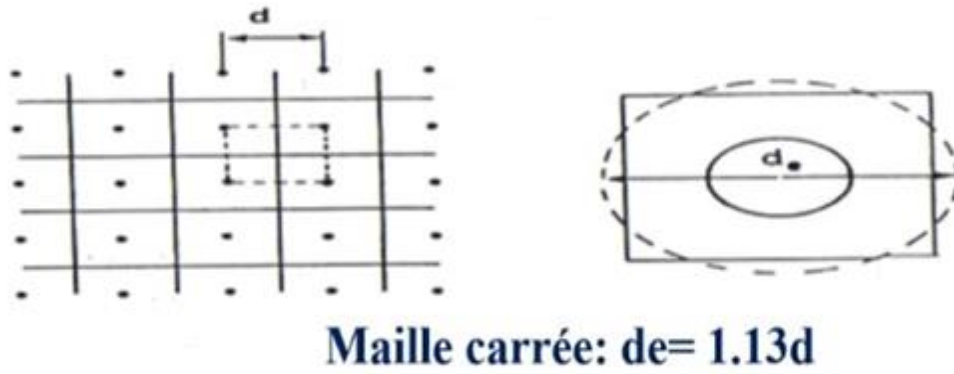


Figure I.28.b: Domaine d'influence de la colonne (maille carré)



Figure I.28.c : Domaine d'influence de la colonne (maille hexagonale)

I.10 .1. Exemples de colonnes ballastées sous charges centrées

Cette figure Montre comment les colonnes sont déposiez pour améliorer de limon sableux de consistance variable.

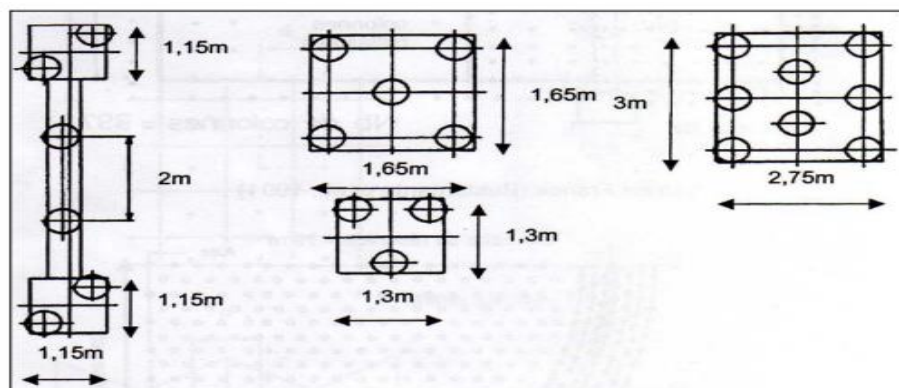
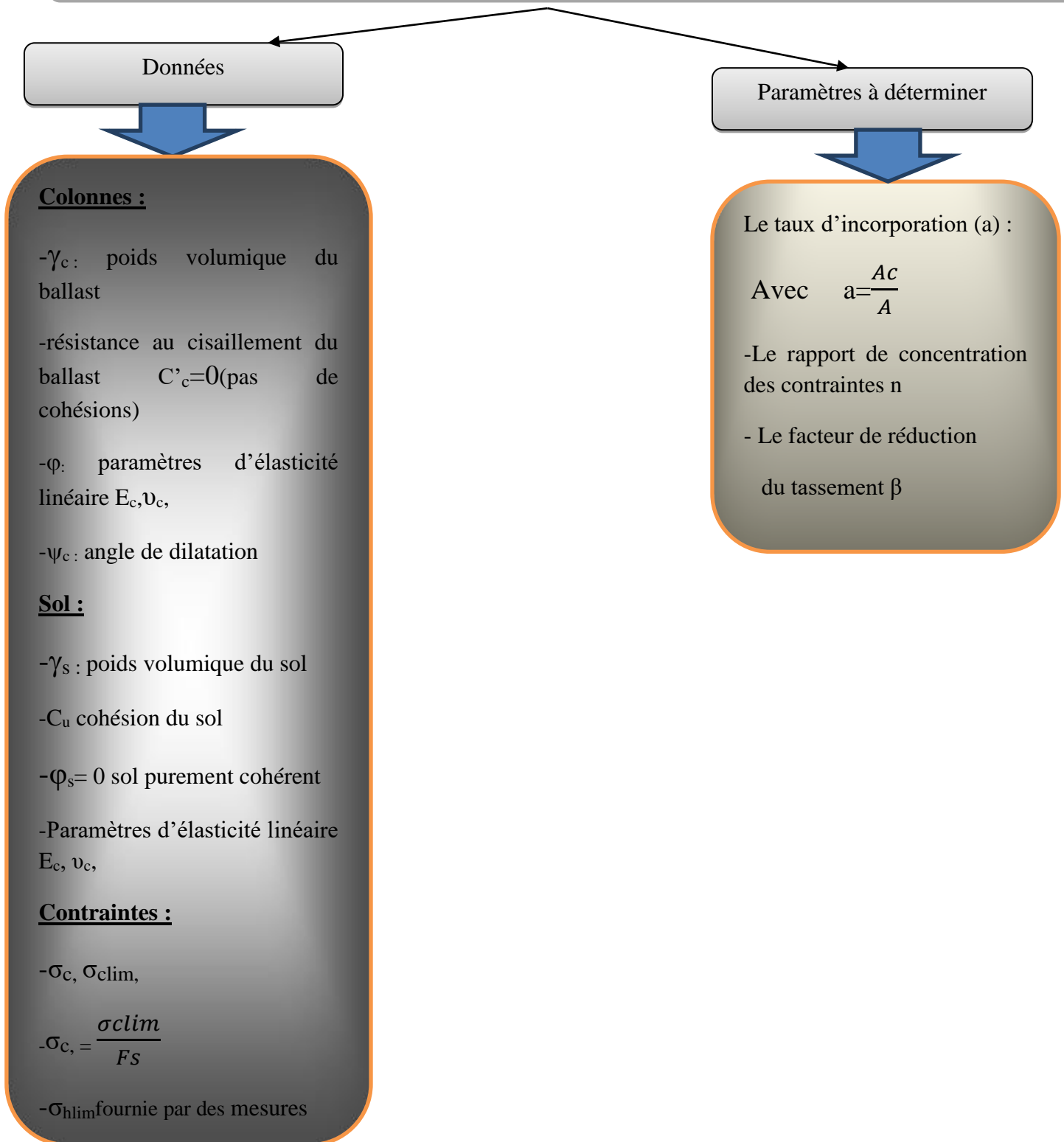


Figure I.29 : schéma d'implantation des colonnes ballastées sous semelles d'un centre postal à Glasgow (Bell étal. 1986)

I.11. Les méthodes de justification habituelle

I.11 .1. Les Paramètres intervenant dans le dimensionnement des colonnes ballastées

PARAMETRES DE DIMENSIONNEMENT DES COLONNES BALLASTEES ET LES PARAMETRES A DETERMINER



I.11.2. Justification en termes des contraintes

D'après Ammar Dhouib et Francis Blondeau(2005) le seul document qui donne les règles de justification des colonnes ballastées est le DTU 13.2 (norme NF p11-212)

Par assimilation avec l'essai triaxial, le DTU définit la contrainte de rupture q_r de la colonne par la formule suivante :

$$q_r = \sigma_h \frac{1 + \sin \varphi_c}{1 - \sin \varphi_c} = \sigma_h \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'_c}{2} \right)$$

Avec φ'_c : l'angle de frottement interne du ballast

σ_h : l'étreinte latérale.

Et d'après le DTU 13.2 :

- Dans les essais au pressiomètre la valeur de σ_h peut être prise égale à la valeur de la pression limite P_i par analogie avec la sonde pressiomètre Louis Ménard.
- La contrainte(q) de calcul a ELS sur une section théorique de colonne doit être inférieure à 2 fois l'étreinte latérale (σ_h) du sol encaissant sans être cependant supérieur à 0.8MPa.
- faut s'assurer que sous les contraintes calculées les tassements reste compatible avec les tolérance imposées par l'ouvrage.

Donc suivant les prescriptions du DTU 13.2 la contrainte q_{ELS} est obtenue par l'application d'un coefficient de sécurité minimum de 2, soit :

$$q_{ELS} \leq \min \left(\frac{q_r}{2}, 0,8 \text{Mpa} \right)$$

I.11.3. Justification du diamètre moyen en fonction de l'étreinte latérale du sol

Greenwood en 1970 propose un abaque de pré dimensionnement donnant le facteur de réduction des tassements ($1/\beta$ en %) En négligeant les tassements immédiats et les déplacements générés par les contraintes de cisaillement, qui est en fonction de l'espacement des colonnes ballastées pour des plages de variation de la cohésion non drainée C_u des argiles encaissantes de 20 à 40 kPa. Cet abaque montre que le facteur β de réduction des tassements

augmente rapidement pour des colonnes rapprochées lorsque l'étreinte latérale est élevée et qu'il est peu sensible à cette étreinte lorsque les colonnes sont plus espacées.

Les résultats de Greenwood (1970) sont donnés indépendamment de la charge appliquée, contrairement à ceux de Datye (1982) qui montre que le facteur de réduction des tassements β diminue lorsque les contraintes appliquées par l'ouvrage augmentent.

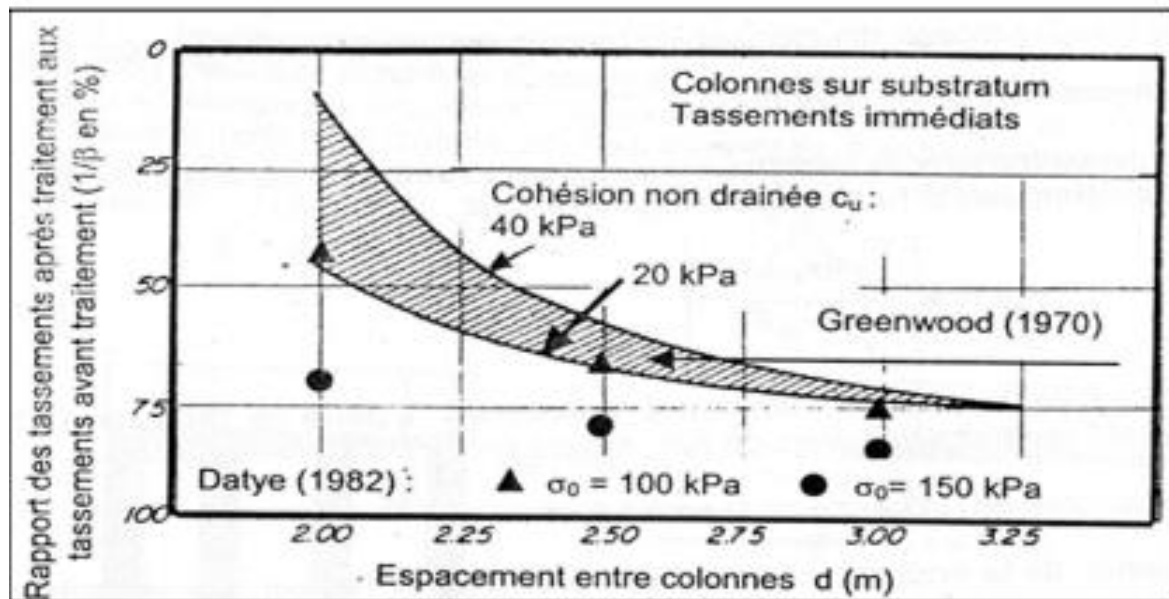


Figure I.30 : Réduction des tassements en fonction de l'espacement entre Colonnes ballastées (Greenwood, 1970 ; Datye, 1982)

I.11.4. Prédiction de la capacité portante et du diamètre moyen

Thorburn (1975) se base sur une approche semi-empirique résultant d'observations in-situ sur plusieurs projets de fondations pour élaborer un abaque de pré-dimensionnement donnant Pour estimer la capacité portante des fondations d'immeuble reposant sur sols mous traités par colonnes ballastées, qui est en fonction de la cohésion non drainée du sol C_u , la capacité portante Q_c et le diamètre effectif D_c de la colonne.

Le graphique (I.31) montre que :

- La capacité portante du milieu traité augmente avec l'étreinte latérale (σ_h).
- Le diamètre (D_c) effectif de la colonne ballastée diminue avec l'étreinte latérale
- Le DTU 13-2 pour des diamètres identique sont approche est fondé sur les Conditions triaxiale.

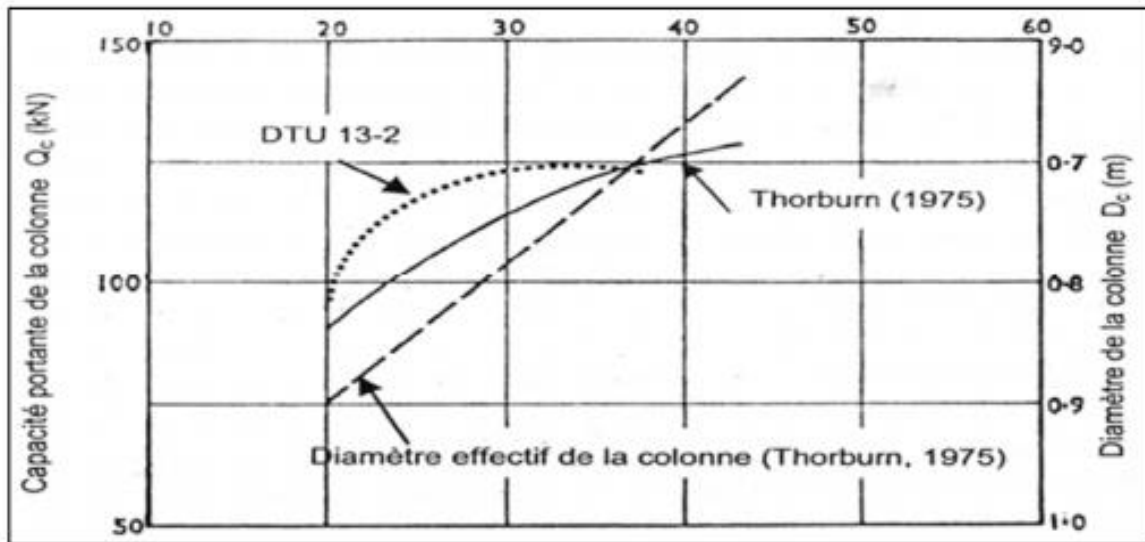


Figure I.31 : Prédiction de la capacité portante et du diamètre effectif en fonction de l'étreinte Latérale du sol encaissant (Thorburn ,1975)

I.11.5. Justification en termes de tassements

Plusieurs auteurs ont étudié les tassements des ouvrages sur des sols traités par Colonnes ballastées, en termes de facteur de réduction des tassements. On se limitera dans ce travail : la méthode de Priebe (1976, 1995) puisque est la plus élaborée et la plus complète dans le domaine du dimensionnement des colonnes ballastées (Dhouib et al.2004a)

Cette méthode Priebe a introduit 3 critères principaux :

A- prise en compte de l'amélioration globale du sol après traitement :

Cette prise en compte est caractériser par le facteur d'amélioration n_0 qui est donnée par

$$n=1+a \left[\frac{0,5+f(Vs,a)}{Kacf(Vs,a)} - 1 \right]$$

D'où

- vs désigne le coefficient de Poisson du sol
- f (vs,a) est une fonction donnée par: $f (vs,a)= \frac{(1-Vs)(1-a)}{(1-2Vs)+a}$
- Et..... $K_{ac} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_c}{2} \right)$

B- prise en compte de la compressibilité de la colonne :

La compressibilité de la colonne se traduit, d'après l'auteur, par un accroissement (Δa) de la section de la colonne, fonction de la rigidité relative colonne/ sol (E_c/E_s). Cet

Accroissement est donné par (Priebe, 1995) :

$$\Delta a + a = \bar{a} = \frac{1}{\frac{1}{a} + \Delta\left(\frac{1}{a}\right)} \dots \dots \dots 1$$

d'où $\Delta(1/a = A/A_c)$ qui dépend du rapport des module (E_c/E_s)

Le nouveau rapport des sections $\Delta a + a = \bar{a}$ peut être injecté dans la formule (1) afin de déterminer le facteur d'amélioration n_1 , soit:

$$n_1 = 1 + \bar{a} \left[\frac{\frac{1}{2} + f(V_s, \bar{a})}{K_{ac} \cdot f(V_s, \bar{a})} - 1 \right]$$

La valeur de n_1 peut être déterminée directement à partir de l'abaque B.2 de l'annexe B, en fonction du rapport A/A_c majoré de l'accroissement $\Delta (A/A_c)$.

C- Introduction de l'influence de la profondeur :

L'influence de la profondeur caractérisée, d'après l'auteur, par un facteur de profondeur

(Noté f_d) donné par l'expression suivante:

$$D'où f_d = \frac{1}{1 - \gamma \left(\frac{\sum \sigma_{si}}{\sigma_0} \right)}$$

$\sum \sigma_{si}$: la somme des contraintes verticales régnant au milieu des couches de sol encaissant (couche i à n).

$-\sigma_0$: est la contrainte apportée par l'ouvrage.

$-\gamma$: le facteur d'influence qui est directement donné par l'abaque B.3 de l'annexe B aussi en fonction du rapport A/A_c majoré de l'accroissement $\Delta (A/A_c)$.

Remarques : La compatibilité des tassements avec la compressibilité de la colonne conduit Priebe (1995) à limiter le facteur de profondeur au rapport des modules (E_c/E_s) divisé par celui des contraintes (σ_c/σ_s), soit: $f_d \leq \frac{E_c \sigma_s}{E_s \sigma_c}$

Cette formule revient à noter que : $f_d \leq y \frac{E_c}{E_s}$ mais $f_d \geq 1$, $f_d = 1$ si la fondation est rigide ($E_c/E_s = \sigma_c/\sigma_s$)

I.12. Comportement des colonnes ballastées en zone sismique

I.12.1. Les travaux de Seed et Booker (1977)

Seed et Booker (1977) basent sur le caractère drainant du ballast et utilisent la théorie des drains pour étudier la réduction du potentiel de liquéfaction. [12]

I.12.2. Les travaux de Priebe (1978, 1998)

Priebe propose une approche basée sur des corrélations analogues à celles de Seed et al. (1983), qui permet d'exprimer le rapport de la contrainte de cisaillement cyclique générée par le séisme τ_h à la contrainte verticale effective σ'_{v0} régnante dans le sol, par l'expression suivante (Suzuki et Koyamada, 1997)

$$\tau_h / \sigma'_{v0} = 0,1 \cdot (M-1) \cdot [(a_{\max}/g) \cdot (\sigma_{v0} / \sigma'_{v0})] \cdot r_d$$

D'où :

M : la magnitude du séisme,

g : l'accélération de la pesanteur,

σ_{v0} : la contrainte verticale totale dans le sol,

r_d : un coefficient réducteur dépend de la profondeur a_{\max}

Pour introduire l'influence des colonnes sur la contrainte de cisaillement induite par le

Séisme, Priebe (1998) apporte une correction au rapport des contraintes cycliques par le biais

du facteur d'amélioration n_0 , soit :

$$\frac{\tau_h}{\sigma_{v0}} = \frac{1}{n_0} \left[0,1(M-1) \frac{a \cdot \sigma_{v0}}{g \sigma'_{v0}} r_d \right]$$

Et à partir de la fonction de $f(v_s, a)$ et en fonction de taux d'incorporation et pour des déformations à volume constant ($v=0,5$) le facteur d'amélioration n_0 devient :

$$n_0 = 1 + a \left[\frac{1}{K_{ac} \cdot (1 - \bar{a})} - 1 \right]$$

$$K_{ac} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_c}{2} \right) \quad \text{Et} \quad r_d = 1 - 0.015z$$

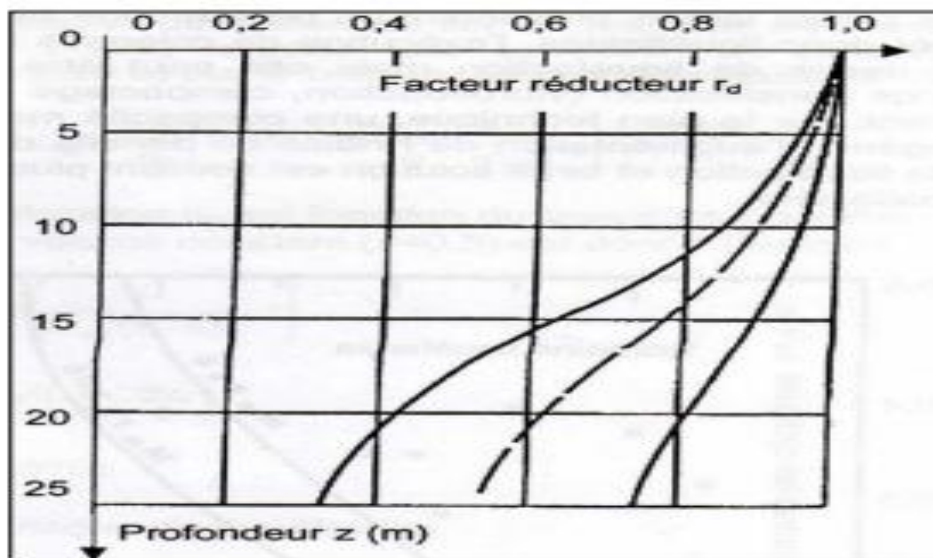


Figure I.32 .a: Facteur réducteur (r_d) en fonction de la profondeur z (Seed et Idriss, 1971)

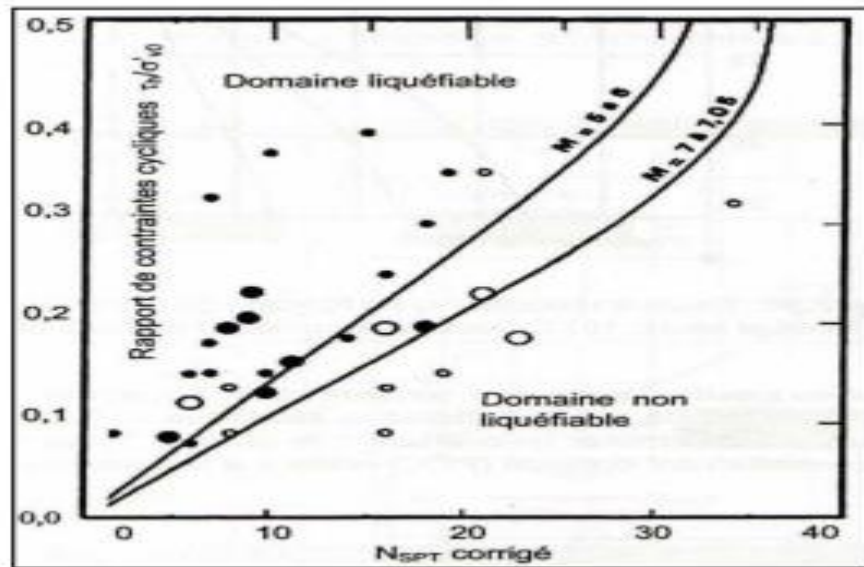


Figure I.32.b: Liquéfaction : corrélation entre le rapport des contraintes cycliques τ_h / σ'_{v0} et NSPT corrigé (Seed, 1976)

I.13. Le phénomène de liquéfaction

Ce phénomène se produit en présence d'eau souterraine, remontant à la surface et faisant ainsi perdre la cohésion des particules du sol en surface. Ce sol va se comporter comme une roche meuble. En situation de liquéfaction, la « déstructuration » du squelette granulaire du sol peut entraîner la perte des constructions.[13]

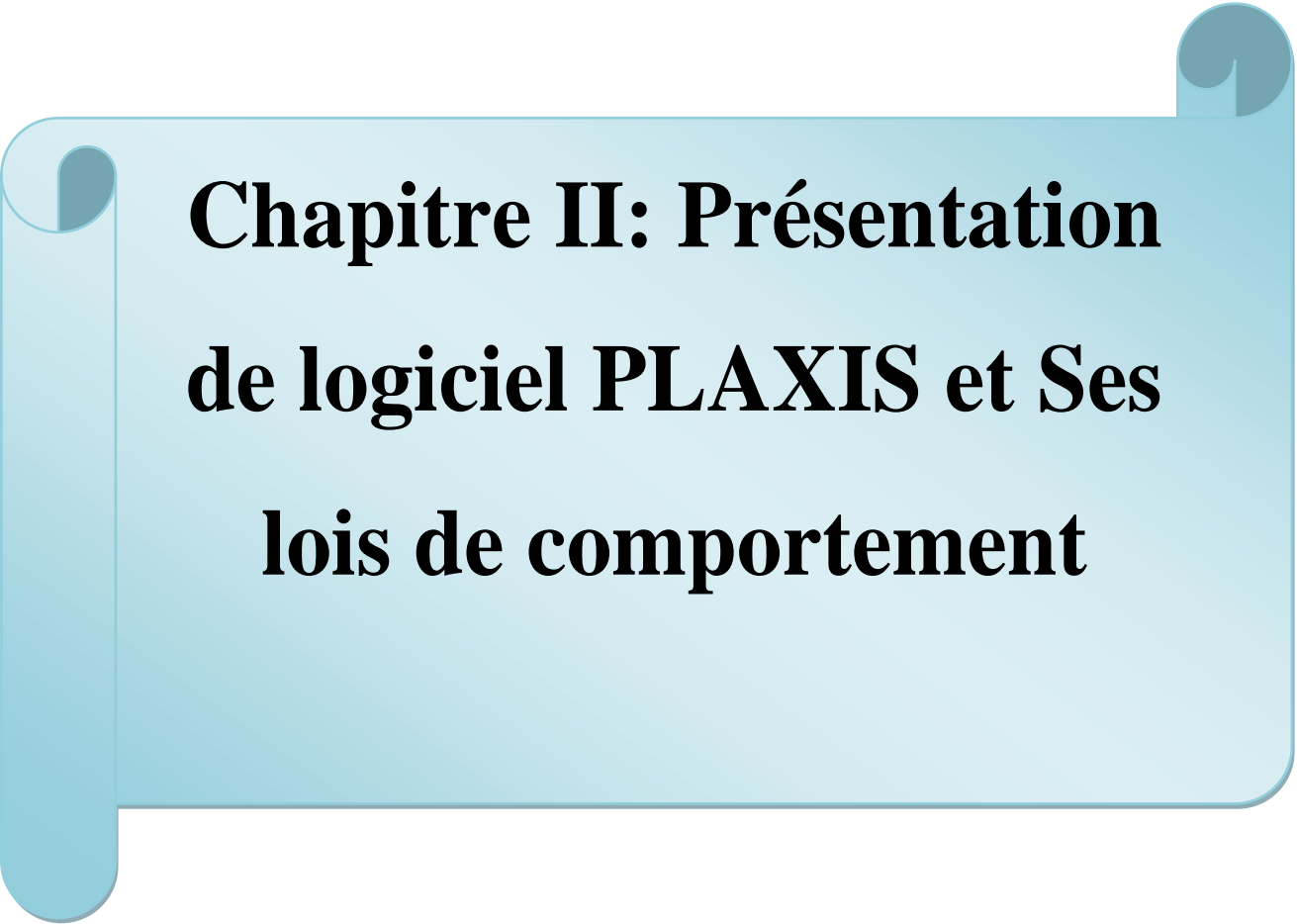
I.13.1. Les sols liquéfiables

Avant tout évaluation de risque de liquéfaction d'un milieu traité par colonnes ballastées, il est nécessaire de préciser les points suivants (Dhouib et Blondeau, 2005)

- le ballast aide à éliminer le risque de liquéfaction à cause de la présence des fins (>35/45%)
- Dans les sols fins, lorsque la perméabilité augmente et l'indice de plasticité diminue, il peut y avoir une liquéfaction.
- L'incorporation d'un ballast a pour rôle d'améliorer le drainage et d'accélérer la dissipation des surpressions interstitielles afin de réduire le potentiel de liquéfaction dans les sable fins lâches, et quand ces sable lâches présente un pourcentage inférieur à 10% à 12% et sont donc liquéfiables.

L'évaluation du risque de liquéfaction consiste à calculer la contrainte de cisaillement cyclique générée par le séisme τ_h à chaque profondeur, à déterminer un coefficient de

sécurité Γ_S qui est le rapport de la résistance au cisaillement cyclique (RCC) notée τ_1 à la contrainte de cisaillement cyclique τ_h . soit : $\Gamma_S = \frac{\tau_1}{\tau_h}$ d'où $\tau_1 = A_Z (qc/4) \cdot 10^{0.755} \exp(0,006Nt) \sigma'_{v0}$



**Chapitre II: Présentation
de logiciel PLAXIS et Ses
lois de comportement**

Introduction

Dans toute étude géotechnique, la modélisation est une étape décisive qui conditionne la qualité d'une analyse diagnostique ou prévisionnelle du comportement des sols et des ouvrages. Son objectif est de déterminer un modèle qui est une série d'équations représentant le comportement physique et mécanique d'un sol, et une représentation géométrique de l'espace qui définit le nombre de couches ou de volumes qu'occupe dans chaque matériau (sol, roche, eau...) et préciser la localisation des conditions aux limites et des interfaces ainsi que leurs conditions de contact.

En général la loi de comportement du sol est une pièce majeure dans un modèle numérique qui vise à prévoir, en fonction des méthodes constructives et de la géologie des sols. Des modèles élastiques linéaires aux lois de comportements les plus avancées.

C'est pour cette raison que le logiciel Plaxis est conçu par les ingénieurs qui comportent des lois préinstallées pour la description des comportements d'un certain nombre de matériaux. Et qui dispose depuis la version 8.0 d'une option permettant à l'utilisateur d'implémenter ses propres lois de comportement des matériaux. et son objectif est de fournir à l'utilisateur un code d'éléments finis qui soit à la fois robuste convivial ; permettant de traiter des problèmes géotechniques réels dans un record de temps.

II.1. Présentation du logiciel Plaxis 2D

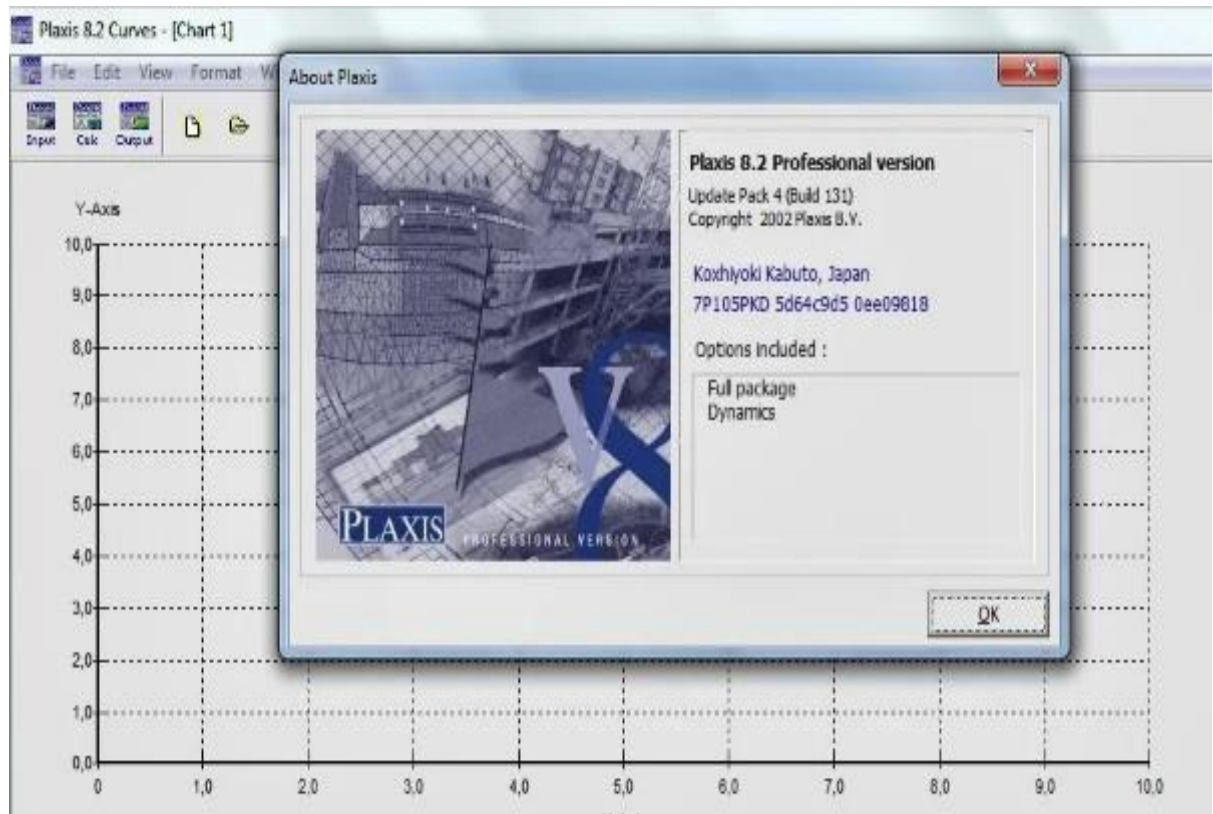


Figure II.1 : type et version de Plaxis 2D

Le Plaxis est un logiciel performants, spécialement pour la géotechnique il est basé sur la méthode des éléments finie crée en 1982 par des étudiants dans une université de hollande au Pays-Bas, en 2018 la startup a était achetée et commercialisée par la société Bentley aux Etats-Unis. Ce dernière est un puissant logiciel pour la modélisation et l'analyse aux éléments finis des problèmes géotechniques en 2D et 3D (contraintes, déformations, stabilité, en mécanique des sols et mécanique des roches). Ses applications sont nombreuses et couvrent les projets d'excavations, remblais et barrages, fondations, digues, tunnels, ouvrages de soutènement.

Le Plaxis 2D existe en quatre modules, un module principal et trois modules pour les analyses plus poussé comme (plaxflow, dynamique et Plaxis thermal)[14], son principal module il permet de concevoir et de réaliser des analyses avancées par MDF de la stabilité et de la déformation de sol et de roche et il offre la possibilité de modéliser divers problèmes géotechniques à partir d'une seule application intégré comme obtenir l'interaction entre statut des sols et les eaux souterraines et les interactions entre la structure et le sol.

II.2. Les avantages du Plaxis 2D

- Convivialité de l'interface (Windows®), pour la saisie des données, la définition des phases de projets et l'analyse des résultats.
- Génération automatique des maillages.
- la capacité de définir ses propres lois et des jeux prédéfinis de lois de comportement de sol.
- prise en compte des éléments de structure et de l'interaction sol-structure.
- Calcul de coefficients de sécurité [15]

II.3. Le sous-programme de Plaxis 2D

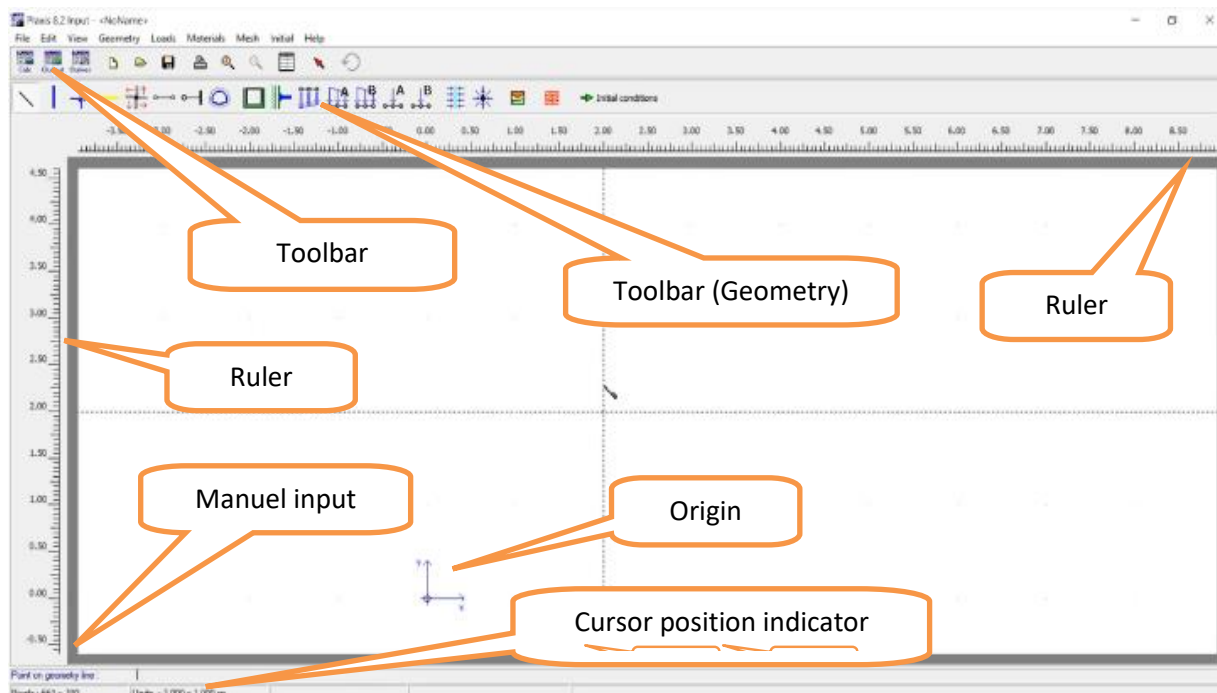
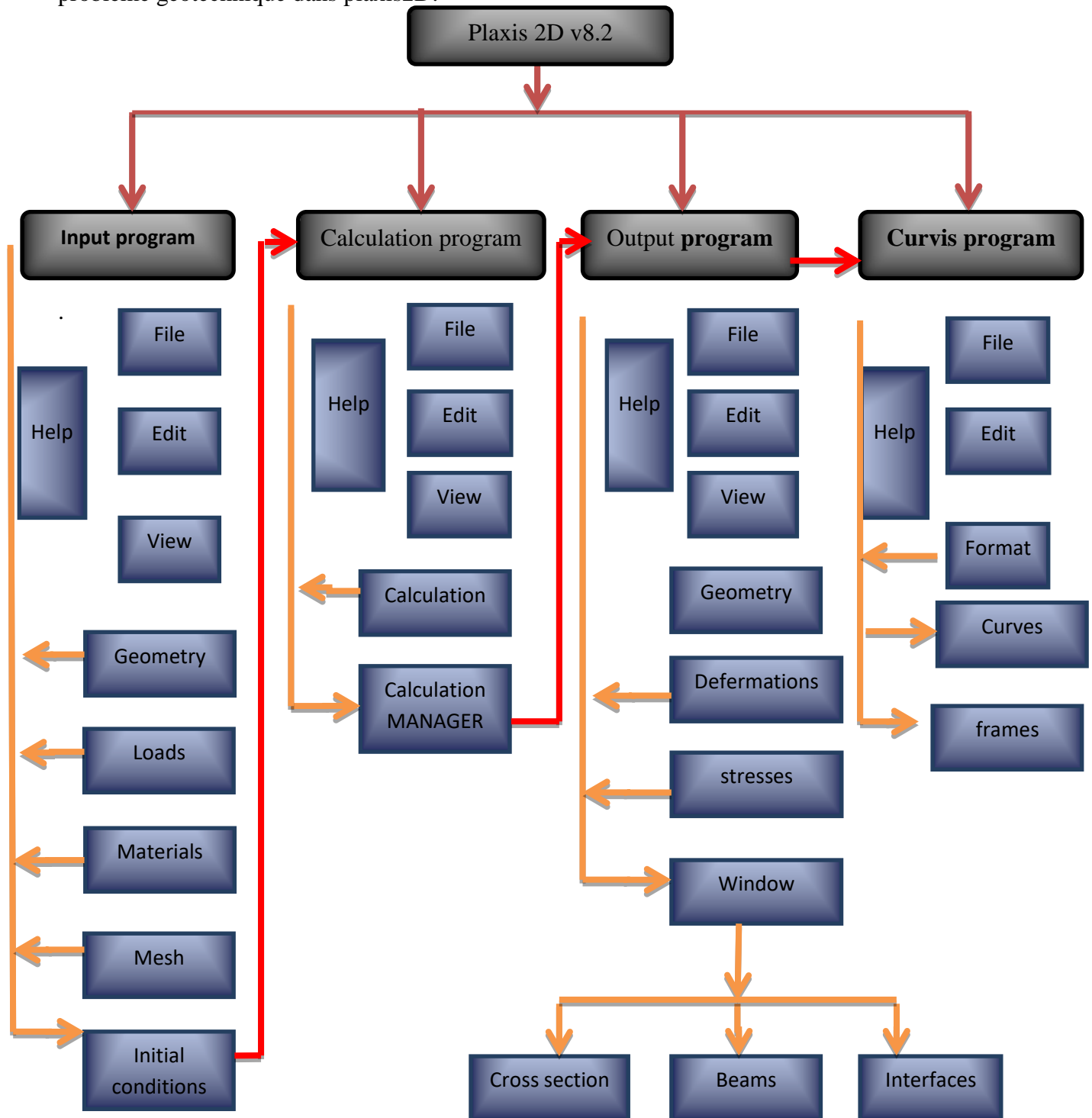


Figure II.2 : Présentation de la fenêtre plaxis2D

- La première fenêtre de Plaxis est structurée de quatre sous-programmes qui sont :
 - A. Input : Ils contiennent toutes les installations nécessaires pour la création et la modification de modèles géométriques, et la définition du maillage et des éléments finis et des conditions initiales
 - B. Calcul : contenant des outils pour faciliter la définition des phases et le début des procédures de calcul d'éléments finis.
 - C. Output : contient des outils pour visualiser les résultats et les étapes de calcul telles que les déplacements au niveau des nœuds, les contraintes, les forces... Etc.
 - D. Curves : sous-programme pour la construction des courbes charges-déplacements, chemins de contrainte ; graphique. Etc.

II.3. Code de Plaxis 2D

L'organigramme donné par la figure (II), montre le procédé général de résolution d'un problème géotechnique dans plaxis2D.



Plan du Code Plaxis 2D

II .4. Lois de comportement dans PLAXIS

Comme on la mentionnée dans l'introduction la modélisation du sol a pour objectif de déterminer un modèle de comportement et Le modèle est une description complète du comportement du sol.

Sauf les matériaux ont un comportement élastoplastique, caractérisé par l'apparition des déformations réversible élastique et irréversible plastique, et lorsque on parle de la surface de charge et que cette surface de charge n'évolue pas, on parle de loi élastique parfaitement plastique, c'est le cas du modèle de Mohr-Coulomb. et le modèle de sol avec écoulement. [16]

II.4.1. Modèle de Mohr-Coulomb

Le modèle bien connu de Mohr-Coulomb peut être considéré comme une approximation au premier ordre du comportement réel du sol. Cette loi élastique parfaitement plastique est utilisée pour simuler le comportement des sols cohérents à long terme (argiles et limons), des sols pulvérulents (sables et graviers) et de certaines roches et ce modèle souvent utilisé pour représenter la rupture par cisaillement dans les sols et les roches tendres.

(Magnan, 1997). [17]

Ce modèle nécessite la détermination de cinq paramètres qui sont :

- le module d'Young et le coefficient de poisson ν .
- la cohésion C et l'angle de frottement φ .
- l'angle de dilatation.

Les deux premiers paramètres sont des paramètres intrinsèques élastiques, les deux autres C et φ sont des caractéristiques mécaniques de résistance et l'angle de dilatation est nécessaire pour modéliser l'irréversibilité de l'accroissement volumique fréquemment observé pour les sols granulaire.

Ces paramètres sont des paramètres classiques de la géotechnique, dans la plupart du temps sont fournis par des essais de laboratoire.

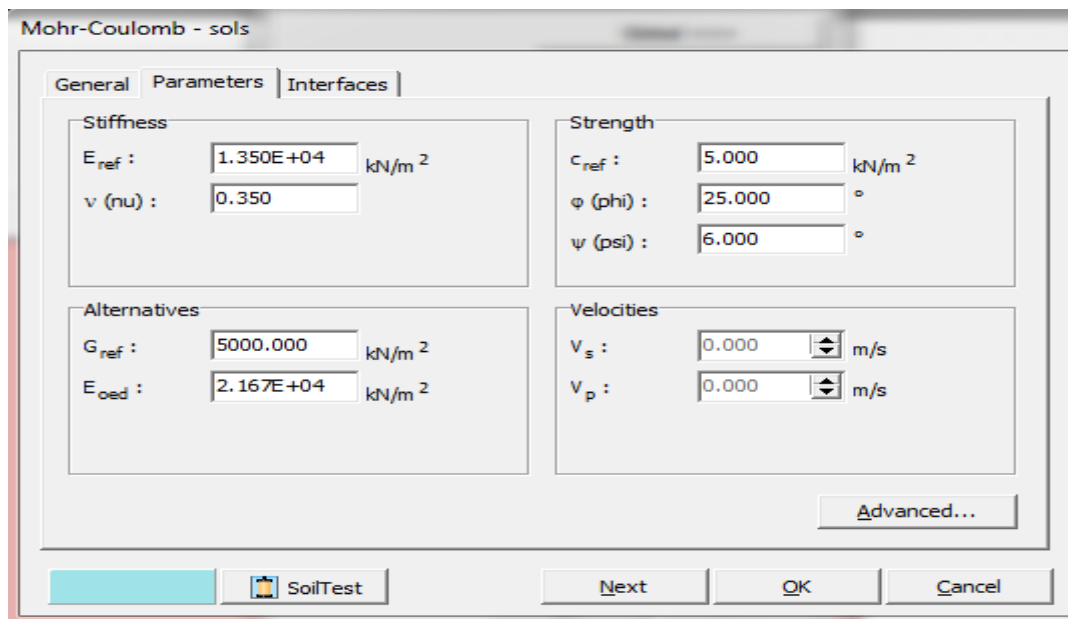


Figure II.3: Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.

A. Module d'Young E

Plaxis utilise le module d'Young comme module de déformation de référence dans le modèle élastique et le modèle Mohr-Coulomb et dans ce dernier le module est constant. Il apparaît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine qui correspond à G_{max} mesure dans des essais dynamique ou très faible déformation.

On observant la figure 3 en mécanique des sols la pente initial est appelée module tangent E_0 , et le module sécant à 50% de la résistance en compression est noté E_{50}

Pour des argiles sur consolidées ou sable dense avec un large domaine élastique, il est concret d'utiliser E_0 , alors que pour les sable lâches et les argiles normalement consolidées de préférences utiliser E_{50}

Les modules à employer dépendent alors du niveau de contrainte ou de niveau de déformation, le module dit tangent à l'origine E_0 n'est pas représentatif, ni le module moyen E_{50} , Donc il faut choisir un module représentatif et pour tenir de ce phénomène il est possible d'entrer la valeur de module par éléments.[17]

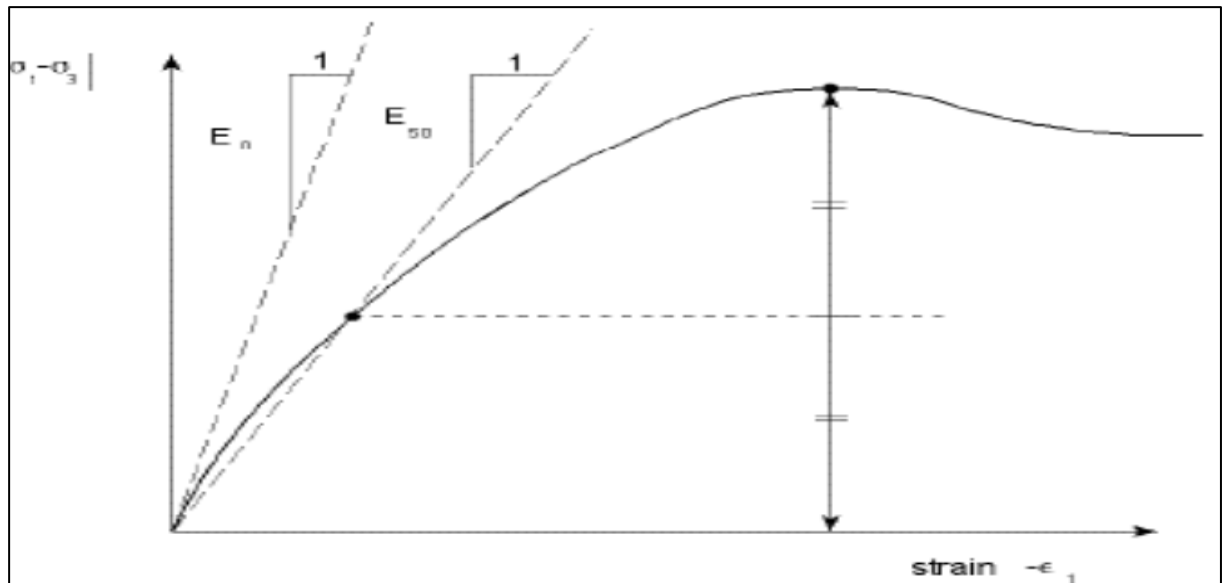


Figure II.4: Définition du module à 50% de la rupture (M. AL HUSEIN, 2001)

B. Coefficient de poisson ν

Pour les sols incompressibles le coefficient de poisson généralement tendre vers 0.50 (0.495) pour un matériau incompressible argile mis en évidence par Siméon Denis) notamment en décharge et la valeur de ν est très importante car elle intervient dans l'initialisation des contraintes, il est suggéré a une valeur de 0.2 à 0.4 pour le coefficient de poisson celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre.[17]

C. Angle de frottement ϕ

Dans les calculs analytiques l'angle de frottement avec argile saturé non drainé est égal à 0 ($\phi=0$)Accompagne un calcul prenant en compte la cohésion non drainé C_u .

En Plaxis l'angle de frottement à introduire est soit l'angle de Pic soit l'angle de frottement de palier, et les angles supérieures a 35degre peuvent considérablement allonger les temps de calcul, il peut être avisé de commencer des calculs avec des valeurs raisonnables d'angle de frottement et cette valeur de 35 est compatible avec les angles de frottement ϕ_{cv} (volume constant, au palier).[17]

D. Cohésion C

La cohésion a la dimension d'une contrainte, Plaxis peut manipuler des sols sans cohésion $C=0$ mais certaines option ne marche pas correctement, donc il est favorable d'attribuer même à des matériaux purement frottant une très faibles cohésion.

Pour les analyses non drainé avec $\varphi=0$ Plaxis offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur : ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur observée dans des différents profils en résistance de pointe de pénétromètre

Cette option réaliser avec des paramètres c-depth, une valeur nulle donne une cohésion constante, les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans le problème (kpa/m)

E. Angle de dilatation Ψ

L'angle de dilatation est généralement compris entre 0 et 1, les sables meubles et les argiles ont des valeurs de dilatance très faibles, seulement quelques degrés à presque aucun, voir nul.

En général l'angle de frottement est en fait est toujours supérieur à l'angle de dilatation, et la valeur de peut-être simplement exprimée déterminée à partir de la pente de dilatation observée dans les tests triaxiaux.

Cependant il peut être facilement évalué par la règle suivant :

- $\Psi = \varphi - 30^\circ$ pour $\varphi > 30^\circ$
- $\Psi = 0$ correspond à un matériau élastique parfaitement plastique
- $\Psi < 0$ Plaxis accepte des angles négatifs qui correspondent à des sables très lâches

• **Les contraintes de traction**

Le critère de Coulomb à trois dimensions suppose que la contrainte intermédiaire n'intervient pas. La forme du critère est celle d'une pyramide irrégulière construite autour de la trisectrice sur l'hexagone irrégulier de Mohr-Coulomb. (Figure II.5). [17]

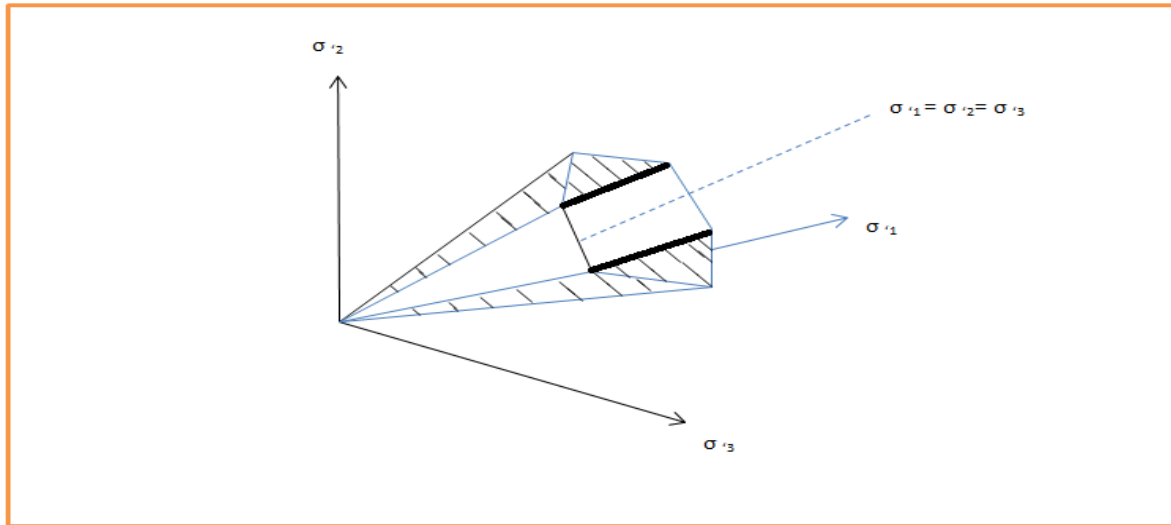


Figure II.5 : pyramide de Mohr-coulomb tracé $C=0$

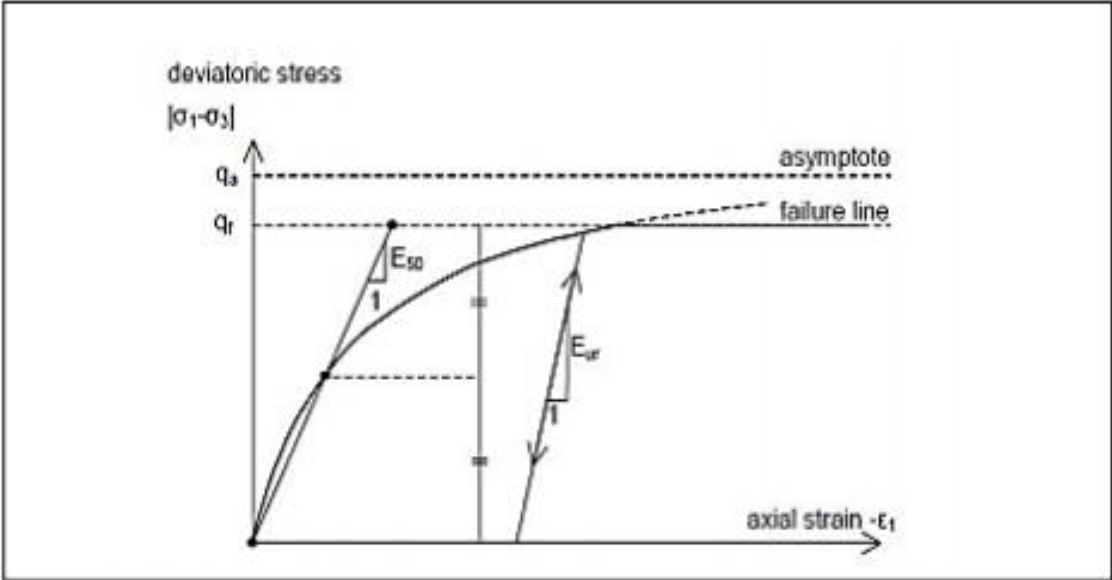
II .5. Modèle de sol avec écouissage(HSM)

Le modèle de sol avec écouissage est un modèle plus performant du modèle Mohr-coulomb, en particulier il présente la forme non linéaire de la courbe œnométrique contrainte-déformation par conséquent d'une part il considère l'évolution du modèle de déformation comme augmentation de la contrainte de cisaillement d'autre parte, l'évolution du modèle HSM est basé tant qu'il y a une courbure dans la courbe contrainte-déformation avant que la plasticité ne soit atteinte, la contrainte de cisaillement augmente et le module E_{50} est irréalisable.

L'implémentation de ce modèle dans le code de calcul Plaxis est présentée par Schanz et al. [18]. Précisons toutefois que le modèle Hardening Soil est un modèle constitutif de sol avancé basé sur le modèle de Duncan & Chang [19] mais modifié pour tenir compte de la plasticité du sol. Les plastifications peuvent être de deux natures : liées au cisaillement ou à la compression.

Le modèle HSM nécessite donc principalement les huit paramètres suivant, qui

Comme pour le modèle de Mohr-Coulomb sont identifiables à partir d'essais œnométriques ou triaxiaux comme illustré (figures II.6.a et II.6.b):



Figures II.6.a: présentation de HSM

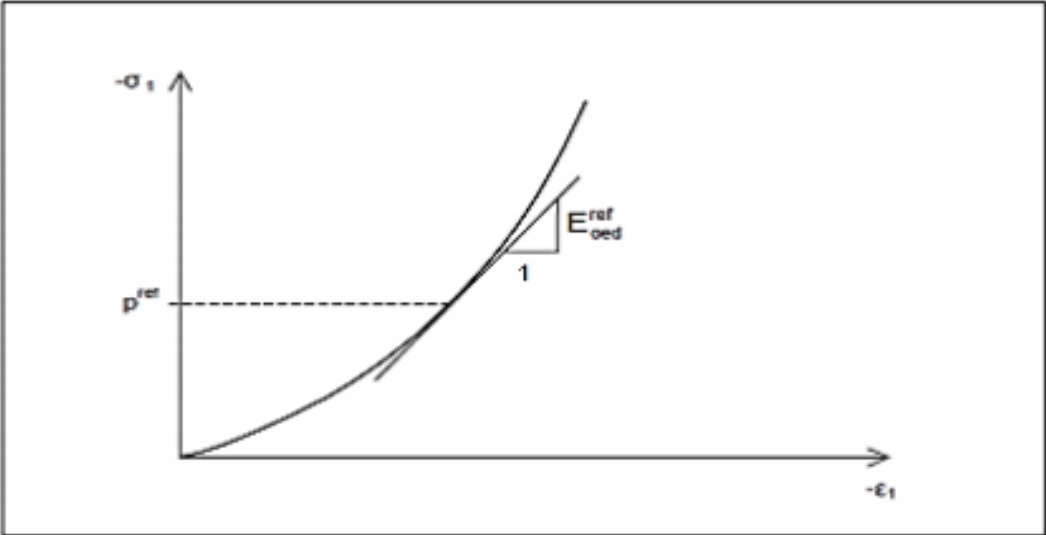


Figure II.6.b: Définition du module œnométrique tangent

A Les paramètres du Hardening Soil Model

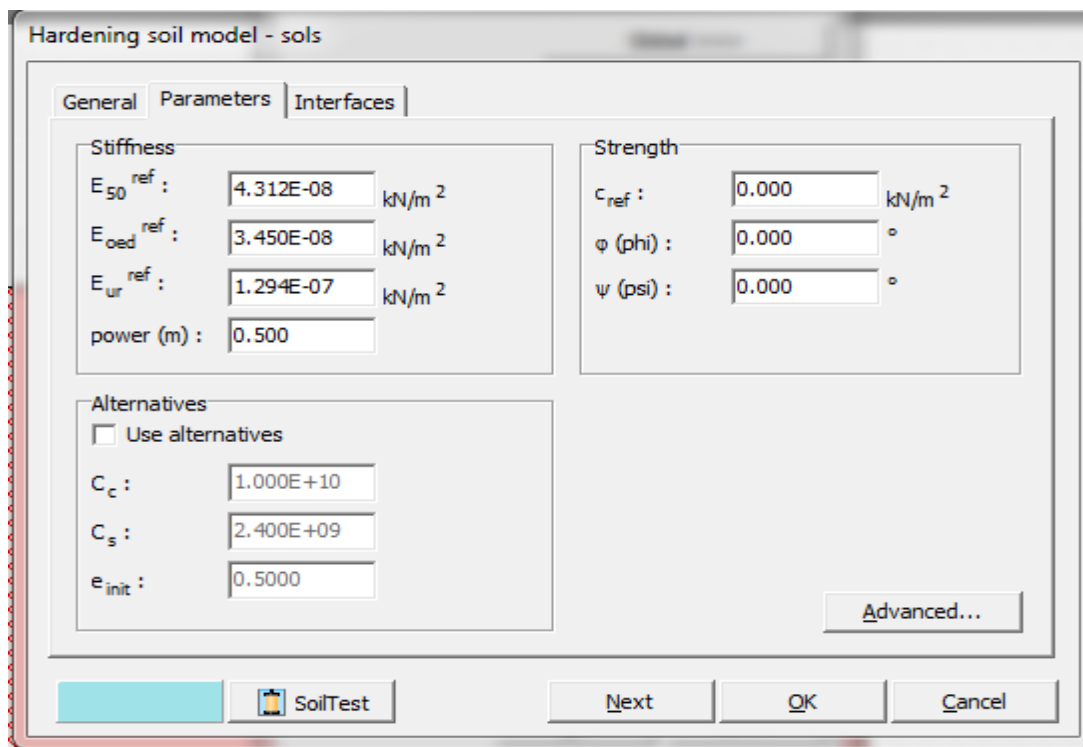


Figure II.7 : fenêtre des paramètres du hardening soil model

- Paramètres de Mohr-Coulomb

C : cohésion (effective)..... [kN/m²]

φ : angle de frottement effectif..... [°]

Ψ : angle de dilatance..... [°]

- Paramètres de rigidité :

E^{ref}₅₀: Module sécant dans un essai triaxial..... [kN/m²]

E^{ref}_{oed}: Module tangent dans un essai œdométrique..... [kN/m²]

m : Puissance (environ 0,58 pour les sables) [-]

- paramètres avancés

E^{ref}_{ur}: module en décharge [kN/m²]

V_{ur}: coefficient de poisson en décharge..... [-]

p^{ref} : Contrainte de référence [kN/m²]

II.6. Les types d'éléments de PLAXIS

On distingue deux types d'éléments dans PLAXIS :

-L'élément triangulaire à 6 nœuds et l'élément triangulaire à 15 nœuds.

Ces derniers sont utilisés pour modéliser les différentes couches de sol et d'autres éléments de volume.

L'élément à 15 nœuds permet une interprétation du quatrième ordre pour les déplacements, et l'intégration numérique est effectuée sur douze points de Gauss (points de contrainte). Pour le triangle à 6 nœuds, l'interpolation est du deuxième ordre et l'intégration numérique est effectuée sur trois points de Gauss.

Le triangle à 15 nœuds est un élément très précis qui a donné des résultats de haute qualité pour les contraintes sur plusieurs problèmes, tandis que le triangle à 6 nœuds offre de bons résultats pour les analyses de déformation standard, à condition qu'un nombre suffisant d'éléments soit utilisé.[14]

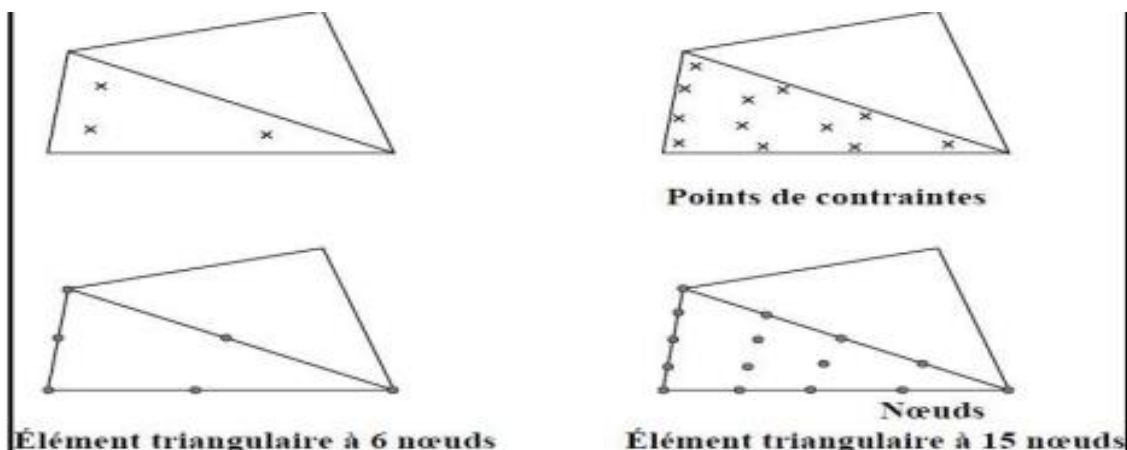


Figure II.8 : Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol.

II.7: Les éléments d'interface

Les interfaces sont composées d'éléments d'interface. La figure 52 montre comment les éléments d'interface sont connectés aux éléments de sol. Dans le cas d'éléments de sol à 15 nœuds, les éléments d'interface correspondants sont définis par cinq paires de nœuds, alors que pour les éléments de sols à 6 nœuds, les éléments d'interface sont définis par trois paires de nœuds, les éléments d'interface sont représentés avec une épaisseur finie, mais dans la formulation des éléments finis, les coordonnées de chaque paire de nœuds sont identiques, ce qui signifie que les éléments ont une épaisseur nulle.

Chaque interface a une épaisseur virtuelle, qui lui est assignée, et qui est définie comme le produit du facteur d'épaisseur virtuelle (Virtual thickness factor) par la taille moyenne de l'élément. La matrice de rigidité pour les éléments d'interface est obtenue au moyen de L'intégration de Newton- Cotes. La position des points de contrainte de Newton-Cotes coïncide avec les paires de nœuds. Par conséquent, cinq points de contrainte sont utilisés pour un élément d'interface à 15 nœuds alors que trois points de contrainte sont utilisés pour un élément d'interface à 6 nœuds.[14]

II .8 Maillage

La réalisation des maillages nécessite souvent de faire varier la forme et la taille des éléments pour décrire les structures de massif. Les éléments peuvent donc être déformés et avoir des longueurs de côté inégales. Si ces déformations ou distorsions deviennent trop importantes, des problèmes numériques peuvent compliquer la résolution.

Le maillage de la géométrie sous PLAXIS a été approuvé, afin de répondre aux conditions de précision des calculs et de vitesse optimale de résolution. A cet effet, le maillage a été densifié à proximité de l'ouvrage de retenue (la zone la plus sollicitée et la plus déformée) et progressivement élargi vers les limites du modèle [22].

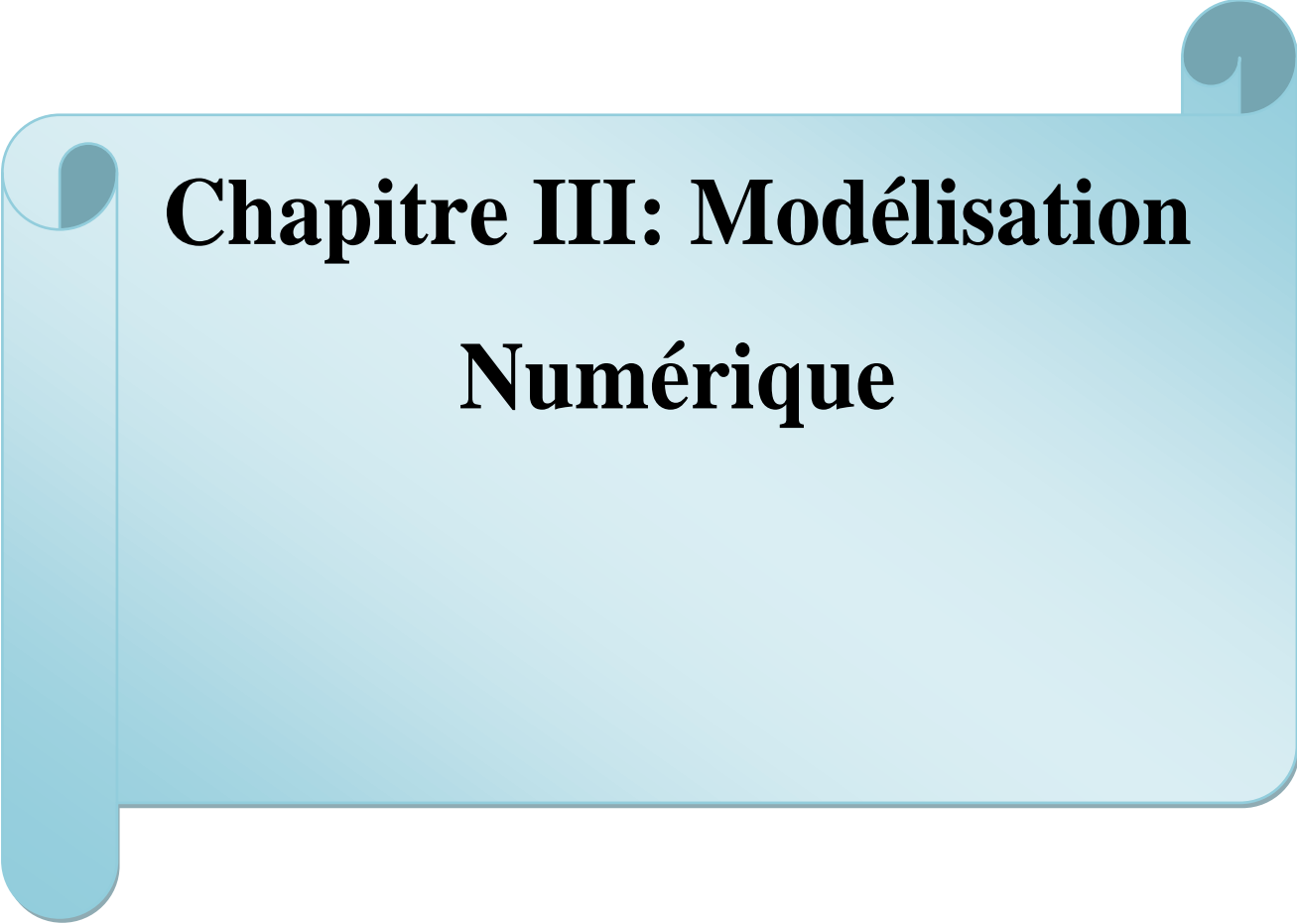
II .9. Conditions aux limites

Les conditions fixées aux limites du modèle sont des conditions de déplacement. Pour permettre la réinitialisation des contraintes sans perturbation par les limites, des déplacements verticaux sont autorisés sur les limites latérales. Les nœuds placés sur la limite horizontale inférieure sont bloqués. Comme la surface topographique est une surface libre, tout déplacement est toléré sur la limite supérieure.

II .10. Conclusion

Le sujet débordant dans ce chapitre était l'introduction d'une méthode numérique utilisée en géotechnique, la méthode des éléments finis Plaxis 2D, qui permet le passage d'un projet réel complexe au modèle numérique selon la nature du sol et le type d'ouvrage.

Le logiciel PLAXIS 2D V.8.2, représente un outil facile à utiliser, et il permet aussi l'analyse des problèmes géotechniques en 2D. Les procédures d'entrée graphiques simples permettent une génération rapide des modèles finis complexes, il s'agit d'un outil d'analyse non linéaire en élasto-plastique non standard et les fonctions de sortie améliorées présentent une présentation détaillée des résultats de calcul (déplacement de mur, pression des terres actives et la force de traction maximale requise aux renforcements).



Chapitre III: Modélisation Numérique

Introduction

Le travail présenté dans ce chapitre porte sur la modélisation numérique qui es conçue comme étant une étape incontournable qui conditionne la qualité de diagnostique ou d'une prédiction du réaction de sol et de la structure et l'analyse de comportement d'un massif de sol, supportant une superstructure R+9, par la méthode des éléments finies en utilisant le logiciel Plaxis 2D.

Le chapitre est consacré à l'étude du comportement d'un massif de sol sous l'influence d'une charge d'un bâtiment et une charge dynamique due à un séisme sans et avec renforcement de notre sol en utilisant les colonnes ballastés comme moyen de renforcement, et le code Plaxis sera utilisé dans ce chapitre dans le but d'analyser le comportement et la réponse de sol avec et sans renforcement.

III-PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

III.1. Situation géographique de la wilaya

La wilaya d'Alger occupe une position côtière entourée de 3 wilayas, au nord elle est limitée par la mer méditerranée, à l'est par la wilaya de Boumerdes, au sud par les Wilaya de Blida et à l'ouest par la wilaya de Tipaza.

- ✧ Alger bénéficie d'un climat méditerranéen Elle est connue par ses longs étés chauds et secs. Les hivers sont doux et humides, la neige est rare mais pas impossible. Les pluies sont abondantes et peuvent être diluviennes.
- ✧ La topographie de la côte algéroise est caractérisée par la succession à partir du rivage actuel et jusqu'à une altitude de plus de 300 mètres, d'une série de gradins, disposés les uns au-dessus des autres comme les marches d'un escalier.

Ces marches interrompent brusquement la continuité des pentes, en général très rapides, qui bordent le littoral algérois

- ✧ La figure ci-après donne un aperçu sur situation géographique de la wilaya d'Alger.

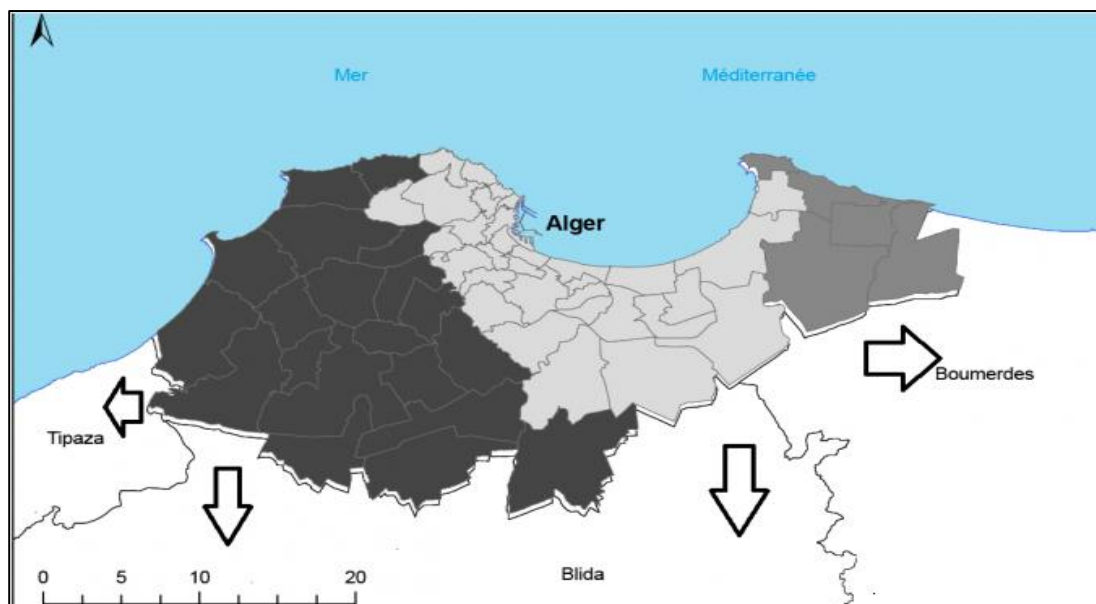


Figure III.1 : situation géographique de la wilaya (www.elbilad.net)

III.2. Description Du Site

III.2.a. Situation

Le projet en question se situe au niveau de la commune de Khraicia qui est située à 18 km au sud d'Alger-Centre 17km de Boufarik 65 km de Tipaza, Elle est rattachée administrativement à la Daïra de Draria. Wilaya d'Alger, il est localisé dans zone urbaine, et il est délimité comme suit :

- Au Nord et l'Est: par des habitations individuelles.
- Au Sud et L'Ouest : par le reste de terrain

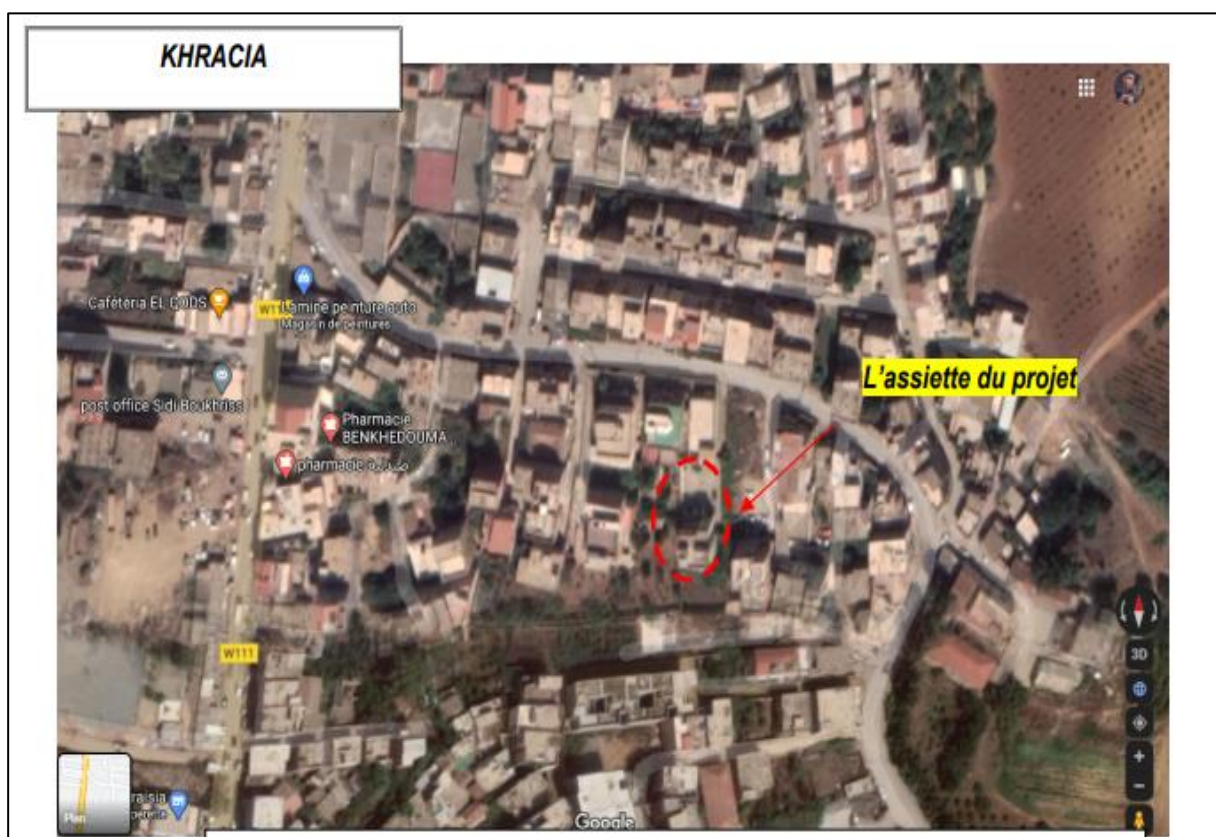


Figure III.2: Situation du projet (Photographie satellite du 27/10/2020-Source Google MAPS)

III.2.b. Topographie De Site

Le terrain d'étude présente une topographie plat, et ne présentant aucune anomalie. On note la présence d'une ancienne bâtisse qui va être démolé pour construire des logements promotionnels qui l'objet de notre étude.

III.3. Géologie Et Hydrogéologie

III.3.a. Géologie Régionale

La zone d'étude correspondant au zone de Khraicia fait partie du Sahel d'Alger, ce dernier est un bourrelet côtier constitué essentiellement par des dépôts néogènes datant du Pliocène et du Quaternaire, il correspond à un anticlinal qui est mis en place lors de la déformation post-Astienne.

La géologie de la région est décrite dans la notice de la feuille de Koléa n°41 éditée par les services de la carte géologique d'Algérie en 1901, elle comprend une bonne partie des collines tertiaires, le Sahel et presque toute la région centrale de la plaine de la Mitidja

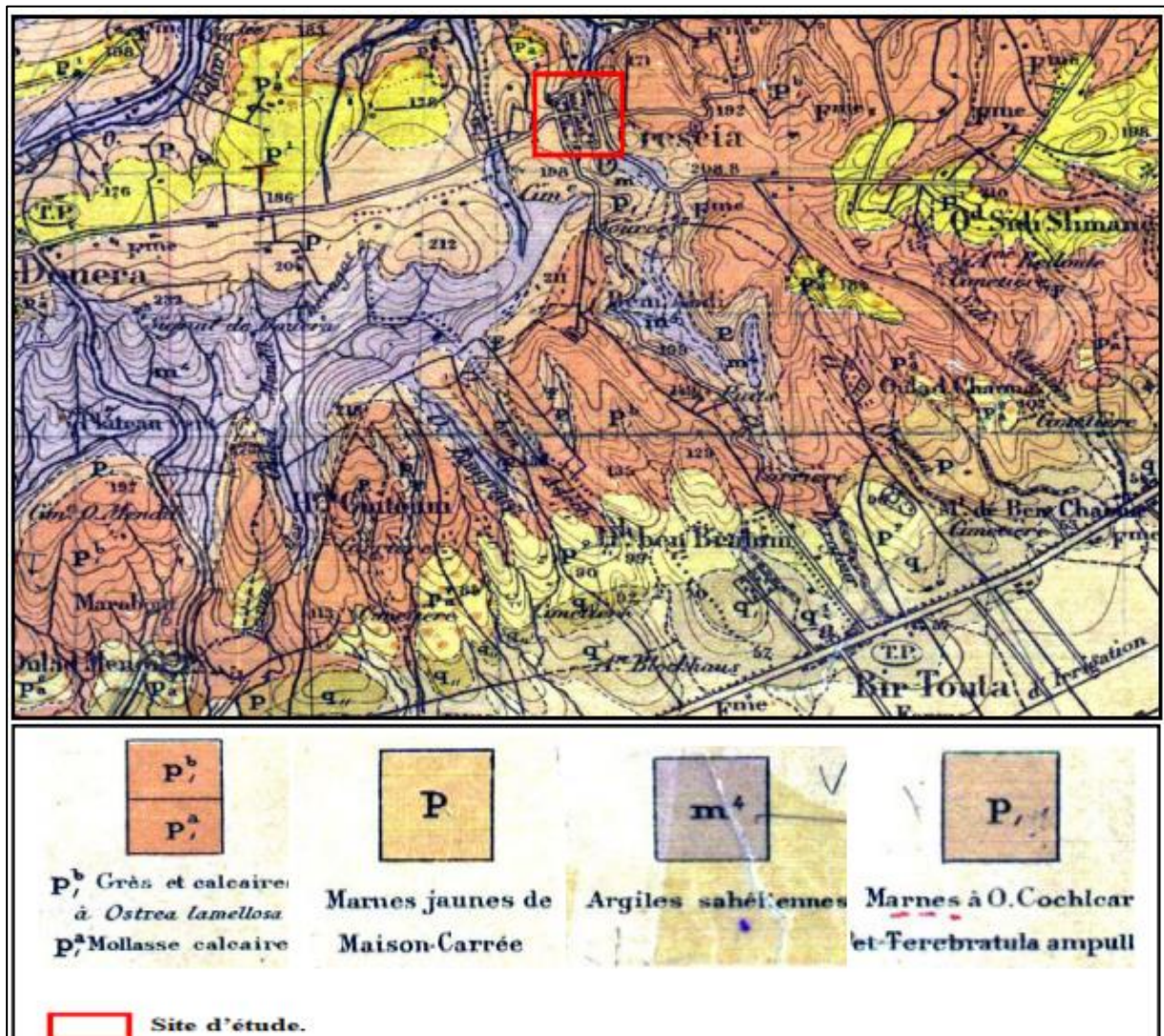


Figure III.3: Esquisse géologique de la région d'étude Extrait de la carte géologique de Koléa n°41

Les principales formations géologiques affleurant sur le site Ouled Fayet - Sud du plus anciennes au plus récentes sont les suivantes :

- **1-Le Miocène** : Représenté essentiellement par :

Les marnes grisâtres sahéliennes, cartographiées « m⁴ » : (argiles et marnes sahéliennes) correspondant à "P1" (nouvelle nomenclature) : formations du Pliocène inférieur. Ce faciès géologique est généralement marno-argileux ; de couleur bleuâtre ou verdâtre, ce dépôt marin riche en micro- fossiles assez homogène.

- **2-Le Plaisancier** : représenté par :

Les marnes à Térébratule « P' » : ce faciès marneux du Plaisancier, occupe la base de l'étage dont il peut représenter la plus grande épaisseur, l'assise débute souvent par une couche glauconies, riche en fossiles bien conservés, au-dessous viennent les marnes bleues souvent sableuses, également fossilifères, puis des marnes jaunes renfermant presque partout des fossiles : pecten...etc.

- **3-L'Astien**: représenté par plusieurs termes lithologiques, le faciès le plus remarquable dans notre site est représenté par :

Les dépôts caillouteux du Plateau d'Oued Fayet « P¹_a »; Ils proviennent d'une nappe étendue d'alluvions anciennes, formées de graviers de grés crétacés mélangés à une argile rougeâtre, et constituant la couverture du plateau de Mahelma.

III.3.b. Hydrogéologie

Le site appartient au bassin versant Algérois, il chevauche sur le sous bassin versant côtiers de Bouzareah. Le terrain est parcouru par un réseau hydrographique caractérisé par la présence d'un oued sec et de nombreuses chaabats, ce réseau se situe dans la zone marneuse imperméable ce qui favorise l'écoulement de surface. Le site étant constitué par un substratum marneux argileux imperméable à l'infiltration des eaux, recouvert par des formations sableuses et calcareuses pouvant emmagasiner des eaux d'infiltrations et par conséquence une éventuelle présence d'eau probable.

1-Hydrogéologie du site

Lors d'investigations sur site, aucun niveau d'eau n'a été mis en évidence au droit de sondage réalisé. Compte tenu de la géologie et la prédominance du caractère argileux et étanche des terrains qui délimite le site étudié ne favorise pas la présence de nappe d'eau importante au niveau de ce dernier. Mais des circulations et/ou d'infiltrations d'eau, sont toutefois possibles au sein des formations en surface du site.

III.4. Sismicité de la région

D'après le Règlement Parasismique Algérien (RPA 99/ Addenda 2003), publié par le Centre de Génie Parasismique C.G.S, le territoire national a été subdivisé en cinq (05) zones de sismicité croissante, définies ci-dessous :

- Zone 0 : sismicité négligeable.
- Zone I : sismicité faible.
- Zone II a et II b : sismicité moyenne.
- Zone III : sismicité élevée

Le niveau minimal de protection sismique accordé à un ouvrage dépend de sa situation et de son importance vis-à-vis des objectifs fixés. Tout ouvrage qui relève du domaine d'application des règles parasismiques algériennes RPA 99/2003 doit être classé dans l'un des quatre groupes définis ci-après :

- Groupe 1A : Ouvrages d'importance vitale.
- Groupe 1B : Ouvrages de grande importance.
- Groupe 2 : Ouvrages courants ou d'importance moyenne.
- Groupe 3 : Ouvrages de faible importance.

Comme présenté dans le tableau 01 les coefficients d'accélération (A) à prendre en considération dans le calcul des ouvrages dépendront du type de l'ouvrage (groupe d'usage) et de la sismicité de la zone

Tableau.III.1 : Les Zones Sismique

<i>Groupe</i>	<i>Zone I</i>	<i>Zone IIa</i>	<i>Zone IIb</i>	<i>Zone III</i>
<i>1A</i>	<i>0.15</i>	<i>0.25</i>	<i>0.30</i>	<i>0.40</i>
<i>1B</i>	<i>0.12</i>	<i>0.20</i>	<i>0.25</i>	<i>0.30</i>
<i>2</i>	<i>0.10</i>	<i>0.15</i>	<i>0.20</i>	<i>0.25</i>
<i>3</i>	<i>0.07</i>	<i>0.10</i>	<i>0.14</i>	<i>0.18</i>

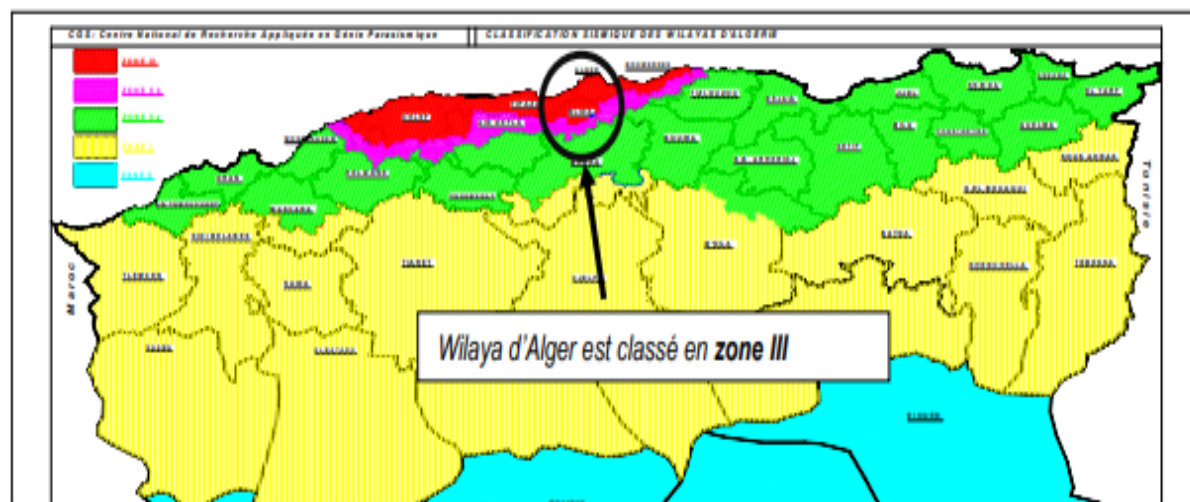


Figure III.4: Nouvelle carte de zonage ; RPA version 2003 Après le séisme de boumerdes.

III.5. Simulation numérique

III.5.1. Présentation du cas d'étude d'un massif du sol avec et sans renforcement

Le cas étudié consiste à analyser le comportement d'un massif du sol sans et avec renforcement par colonnes ballastées sous chargement d'un bâtiment en béton armé (R+9) et une charge dynamique sous l'effet d'un accélérogramme de séisme de Boumerdes avec une accélération 0.3g introduit dans le code de calcul Plaxis, ce bâtiment a une hauteur de 31.54m et une largeur de 21 m, implanté dans une couche de sol d'une hauteur de 16 m et une largeur de 25m, le profil de sol se décompose en une couche de 9m d'argile qui repose sur une couche de marne d'une hauteur de 7m.

III.6. Etude de l'effet des charges sur la stabilité de sol

Dans ce qui suit, le but recherché a été de mieux comprendre le rôle des colonnes ballastées dans un sol pour l'augmentation de la capacité portante de sol étudié ainsi que la réduction du tassement en introduisant une charge d'une superstructure et une charge dynamique.

La figure III.5 montre les différentes couches de sol d'implantation, ainsi que la profondeur de chacune d'elles et l'emplacement de la nappe.

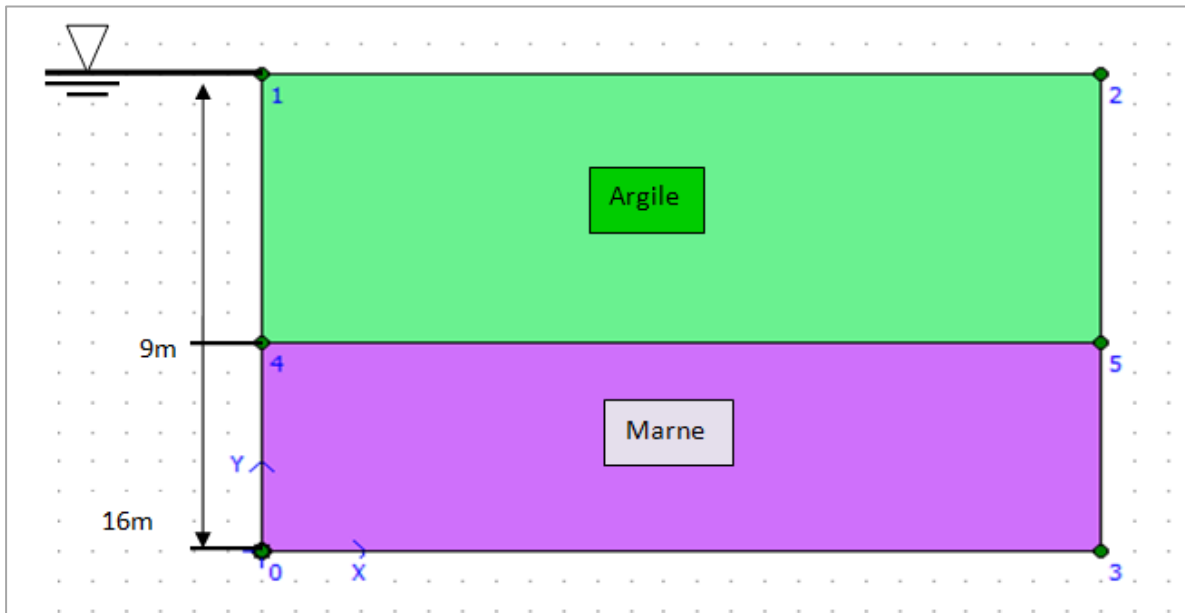


Figure III.5: Les différentes couches de sol et leurs profondeurs.

III.6 .1. Caractéristique de sol

Les caractéristiques mécaniques du sol, colonne et des fondations sont résumées dans le tableau III.2.

. Tableau III.2 : Propriétés mécanique des matériaux utilisés dans la modélisation.

Caractéristiques des matériaux	Argile	Marne	Ballast	Béton	Matelas de répartition
Modèle de comportement	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	Linear-Elastic	Linear-Elastic
Type	UnDrained	UnDrained	drained	Non-porous	Non-porous
Module E_{ref} (KN/m ²)	300	500	2000	32100	2000
Masse volumique sec γ (KN/m ³)	18	17	16	24	20
Masse volumique saturé γ_{sat} (KN/m ³)	19	17.5	17	-	21
Angle de frottement ϕ (°)	5	25	39	-	-
Angle de dilataance ψ (°)	0	0	75	-	-
Cohésion C' (Kpa)	75	40	5	-	-
Coefficient de Poisson ν	0.01	0.35	0.33	0.25	0.30

Perméabilité horizontale k_x (m/jour)	1×10^{-3}	3×10^{-5}	3×10^{-3}	-	3×10^{-3}
Perméabilité verticale k_y (m/jour)	1×10^{-3}	1×10^{-5}	3×10^{-3}	-	3×10^{-3}
Facteur de réduction de l'interface R_{inter}	1	1	1	1	1

III.6.2 Les charges appliquées

➤ Charge Verticale

Notre structure est un bâtiment de (R+9) avec les charges suivantes :

Charge permanente	Charge d'exploitation
G=30030.793 kN	Q=5836.173 kN

En applique sur le sol une charge de bâtiment qui égale a 85 KN/m^2

➤ Charge dynamique horizontal

A la base de notre modèle adopté en appliquer une charge dynamique qui es représenté par l'accélérogramme de séisme de Boumerdes 2003.

III.7. Modélisation

Comme on l'a mentionné dans le chapitre précédent, le logiciel Plaxis contient quatre programmes à utiliser au cour de la modélisation

III.7.A. 1^{er} cas d'étude

Le comportement d'un massif de sol sans renforcement

1-Saisie des donnes

-En lance Plaxis Input

-En choisie * New Project*

-General Setting:

1-General Settings : pour les caractéristiques générales : en choisie calcule en déformation plane (plane strain) Eléments à 15 nœuds la Figure III.6.a.

2-Dimension : en prend un modèle de 16m de hauteur et 25m de largeur la Figure III.6.b

-Modèle : on définit d'abord le cadre extérieure de notre sol et la fondation de 0.5m à l'aide d'une souris en utilisant l'outil *Geometry line*

-Condition aux limites : On choisit les conditions aux limites par défaut c'est à dire déplacement libre sur les cotées verticaux et fixé au fond.

-La modélisation numérique par le code de calcul PLAXIS, comme tout autre code, exige la définition de quelques paramètres.(Le Tableau) montre les différents paramètres. Figure III.7

1. Pour la charge de bâtiment en a :

Pour appliquer cette charge de bâtiment comme une charge répartie sur notre fondation on a devisé la somme des deux charges sur la surface de notre sol on a obtenu une charge de 85kn/m^2

Et pour ajouter cette charge répartie sur notre radier en appuyant sur « Distributed load-load système A ».Figure III.8

-Et pour la charge dynamique en donne un déplacement horizontale de 3kn/m^2 en définit en appuyant *Set dynamic load système*.Figure III.9

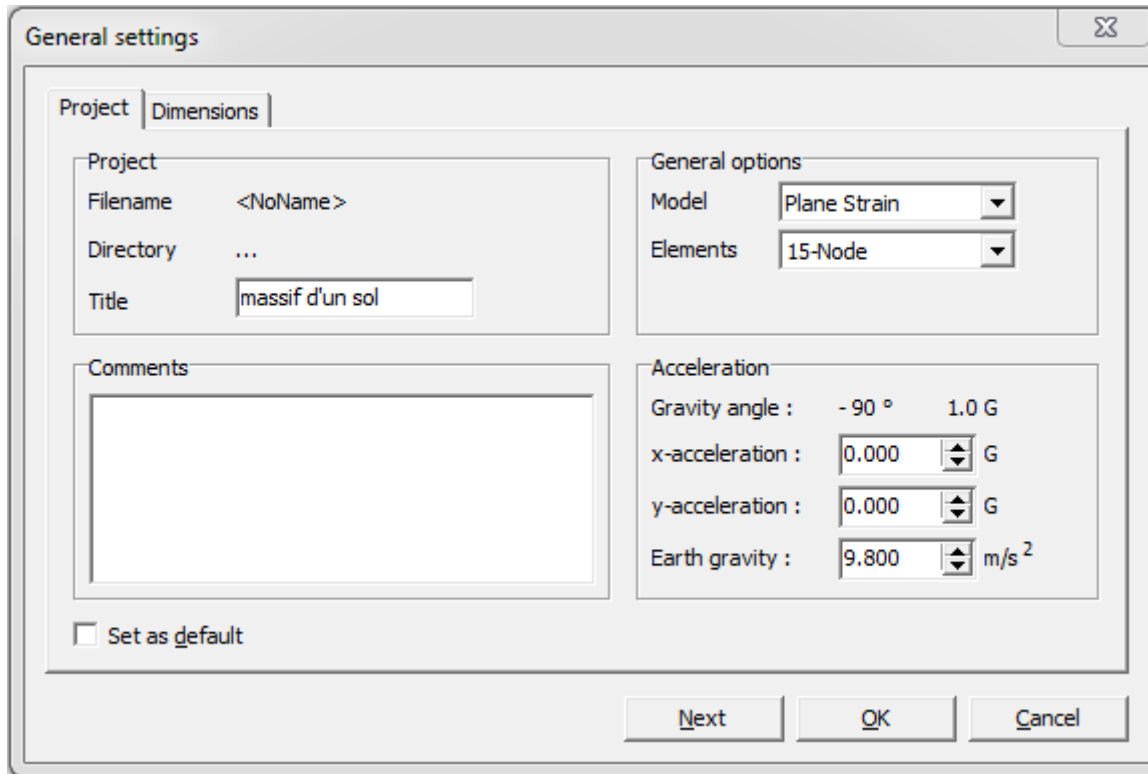


Figure III.6.a : paramètres des caractéristiques générales.

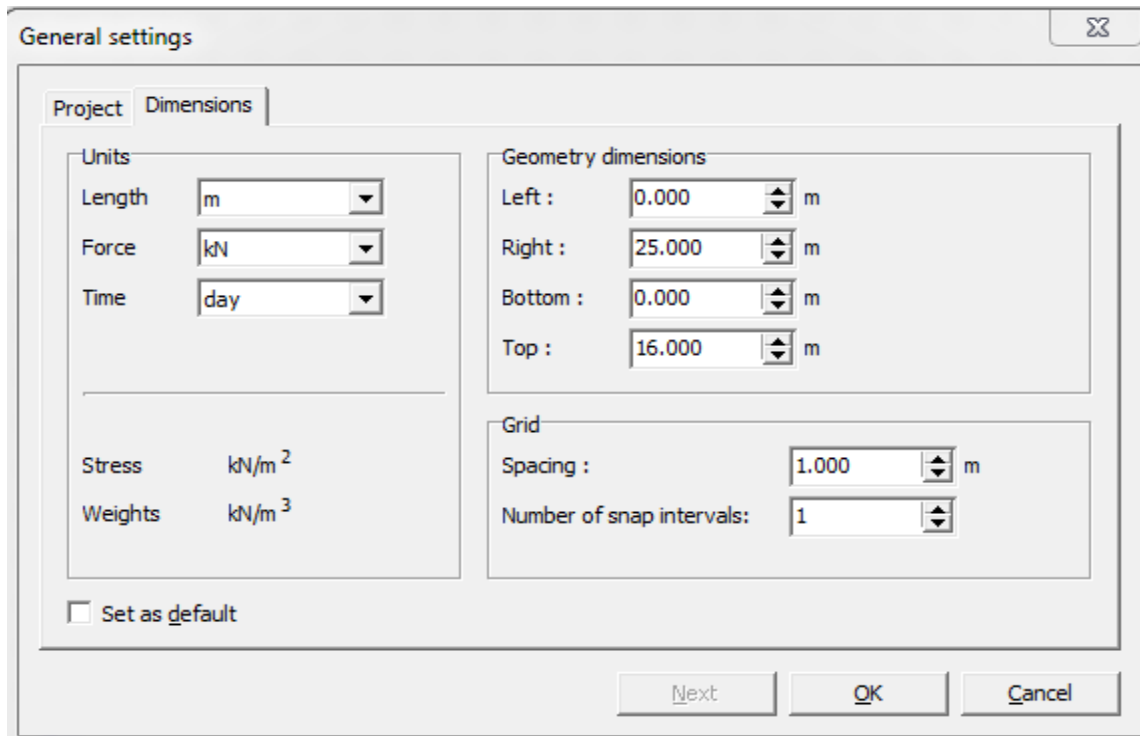


Figure III.6.b: paramètres de dimensionnement

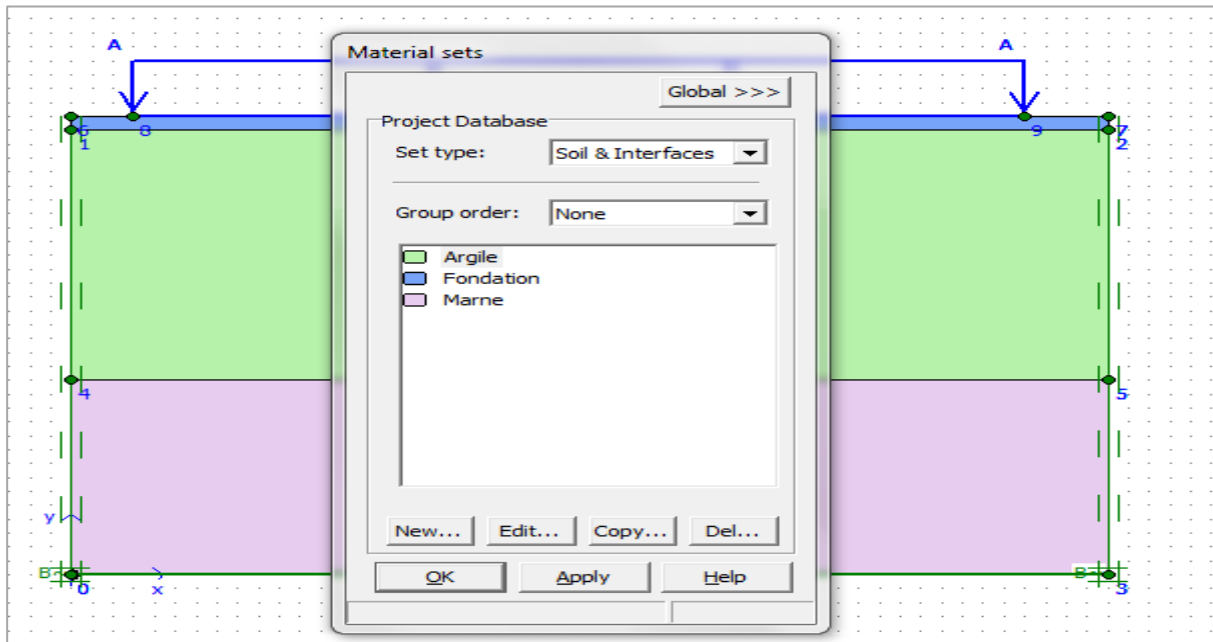


Figure III.7: Définition des matériaux du modèle

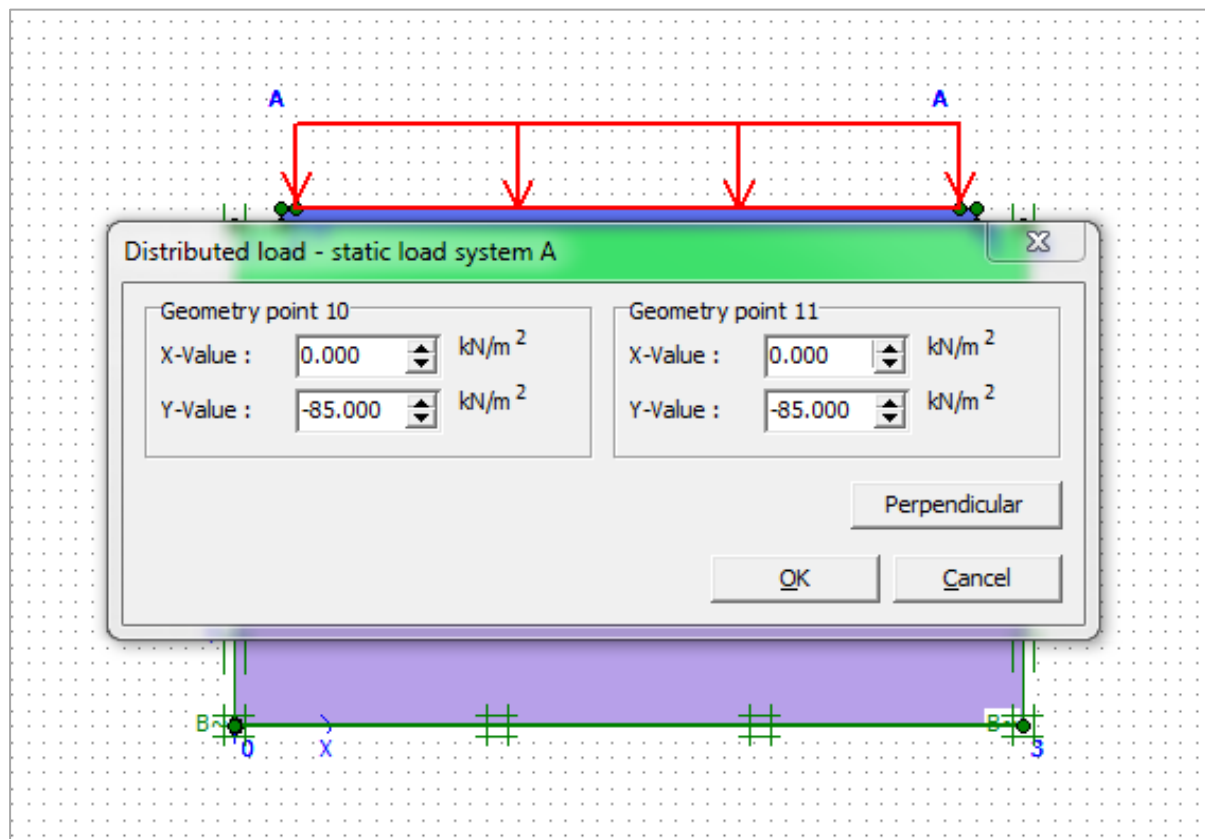


Figure III.8: Application de la charge verticale

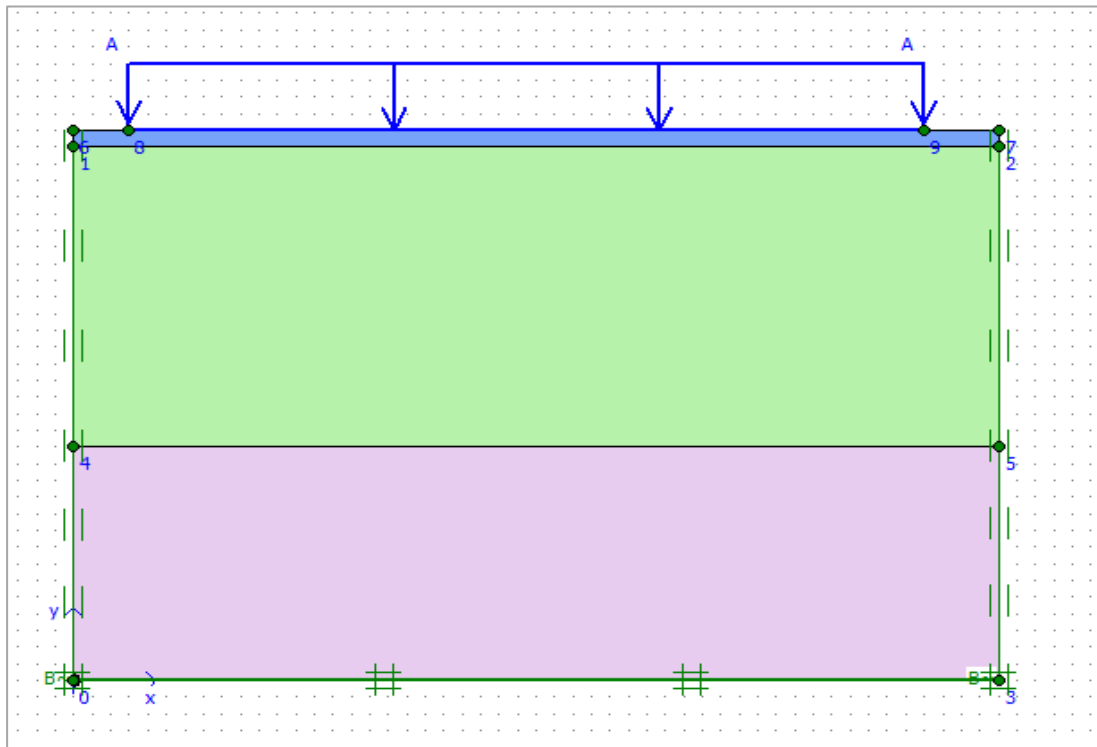


Figure III.9: Géométrie de modèle.

2-Le maillage

Après c'est étape précédente en lance la génération automatique du maillage Figure III.10

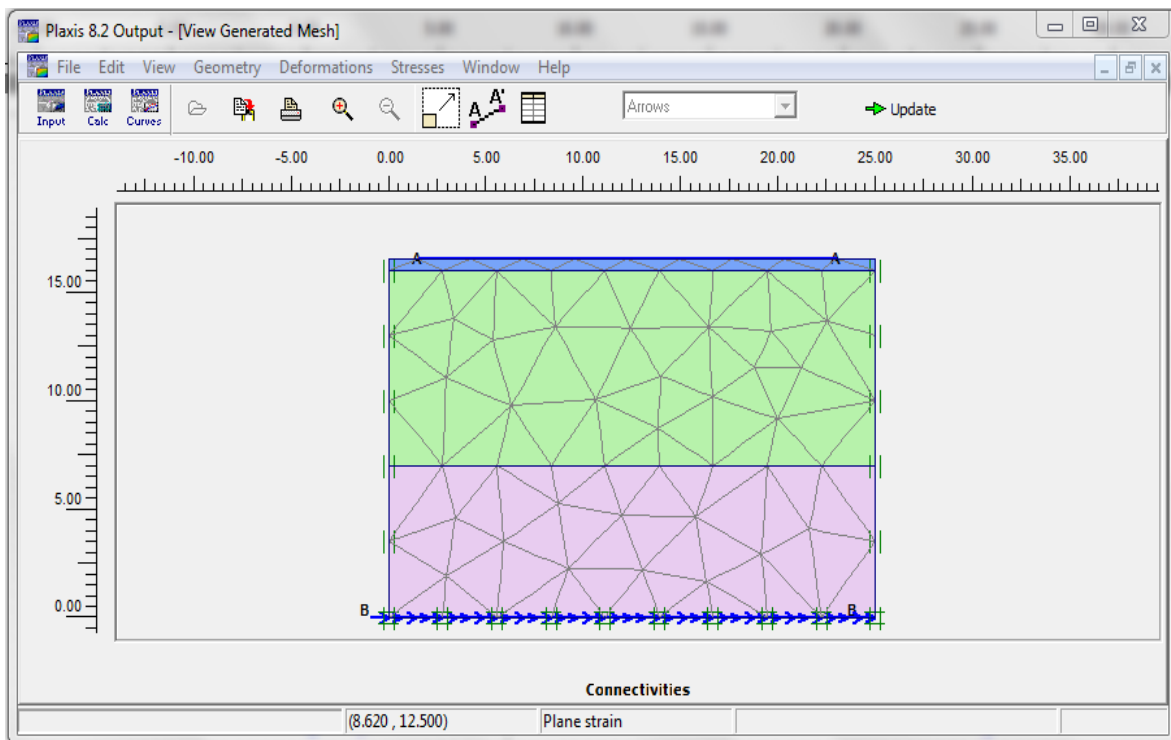


Figure III.10 : maillage d modèle

3-Conditions initiales

On confirme la valeur de 10Kn/m² pour le poids volumique de l'eau, les conditions hydrauliques initiales sont générées sur la base d'une nappe phréatique située au sommet de notre sol.

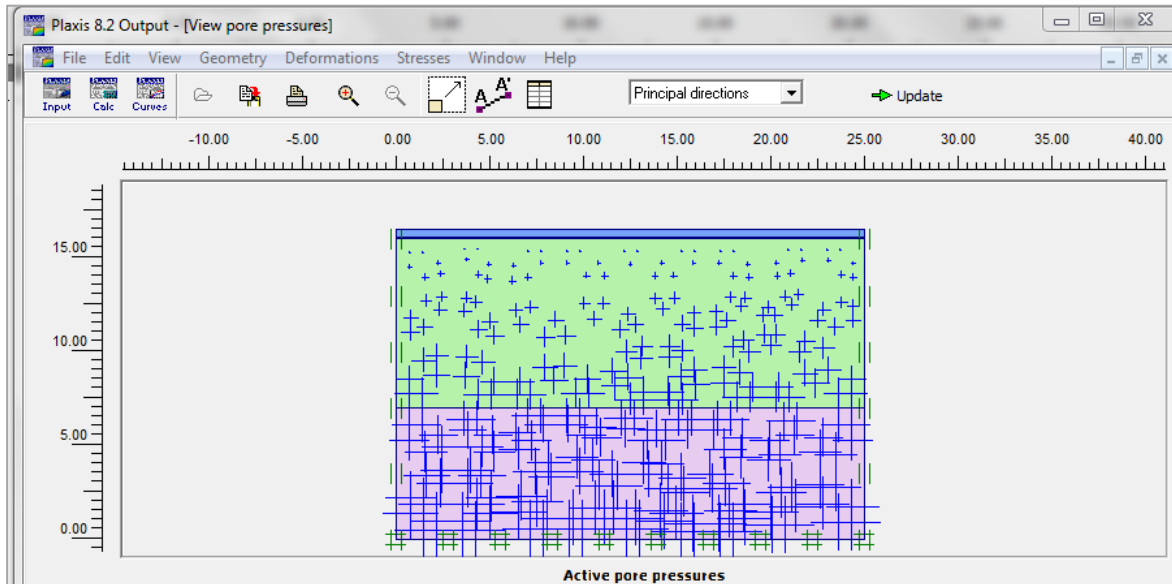


Figure III.11: Répartition des pressions interstitielles

Et en Final on doit enregistrer les données avant de rentrer dans le programme de calcul

4-Calculs

- ✧ Après le saisir des données sur le 1^{ère} programme qui est (*input*), en passe à la 2^{ème} partie qui est la partie de calcul (*calculions program*) ou en désigne les noms de nous phases et leur type de calcul
- ✧ Le choix des points :

Le choix des cordones des points (Figure III.9)

-avoir les graphes de déplacement nous avons choisis les points A, B, C, D.

-les graphes des contraintes nous avons choisis les points E, F, G, H.

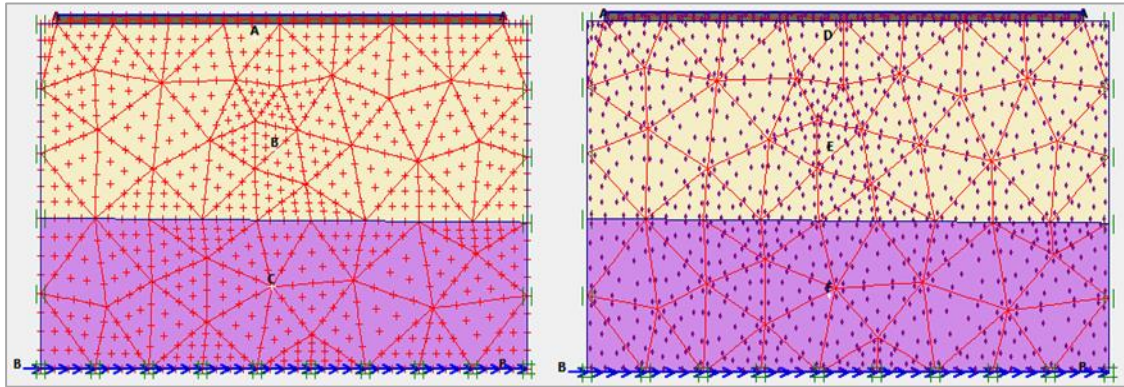


Figure III.12: La disposition des points choisis pour un sol sans colonnes

III.7.B. 2^{ème} cas d'étude

Le comportement d'un massif de sol avec renforcement par colonnes ballastées

1-Saisie des données

On appliquant les mêmes étapes de modélisation du «1^{er} cas d'étude» sauf à cette étape en ajoutant Des colonnes ballastées et un matelas de Répartition (Figure III.15) dans les caractéristique son en Tableau

Les couches de sols représentés à la figure III.15 sont traités par un réseau de colonnes ballastées avec un maillage carré (1.4m x1.4m) (Figure I.28.b) qui conduit à un diamètre du domaine d'influence de la colonne

$$\text{En } d_e = 1.13 \times d \quad \text{Donc } d_e = 1.13 \times 1.4 = 1.582 \text{m}$$

$$\text{Aire total : } A = \pi \frac{d_e^2}{4} = 2 \text{m}^2$$

$$\text{Aire de la colonne : } A_c = \pi \frac{D_c^2}{4} = 0.40 \text{m}^2 \text{ avec } D_c = 0.70 \text{m}$$

$$\text{Air de sol : } A_s = A - A_c = 1.6 \text{m}^2$$

Avec la longueur de la colonne $L_c = 9.7 \text{m}$

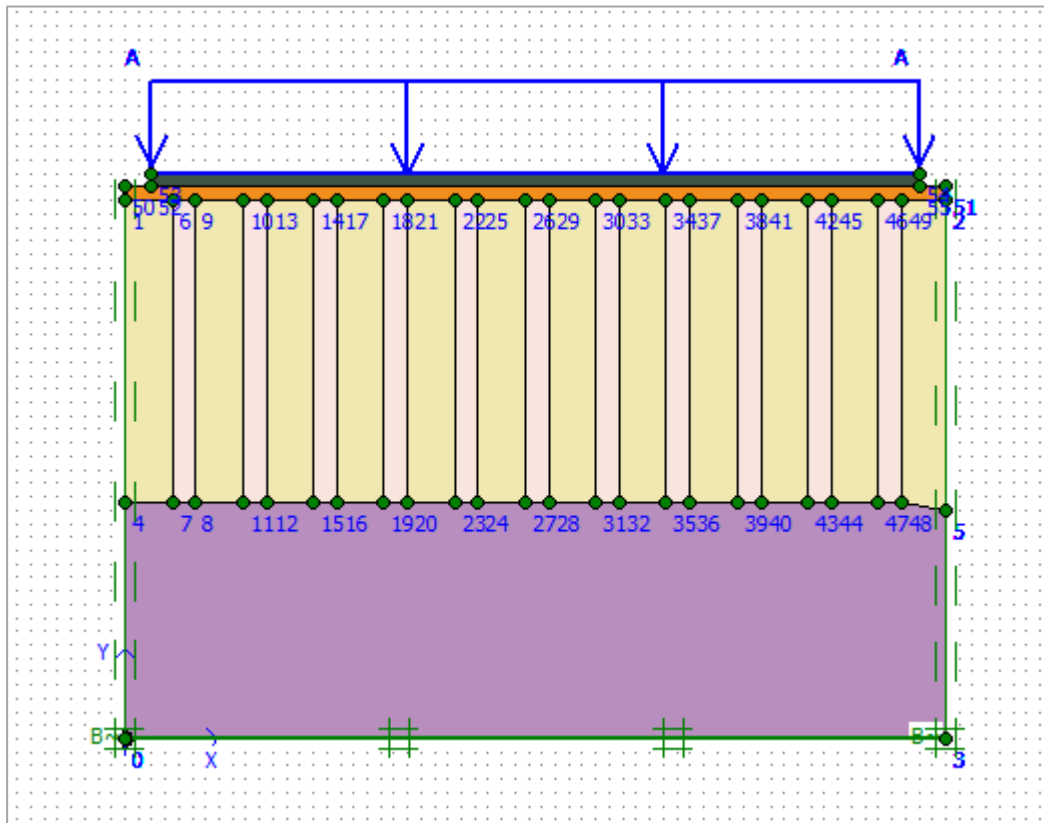


Figure III.13: la géométrie d'un massif de sol avec colonnes ballastées

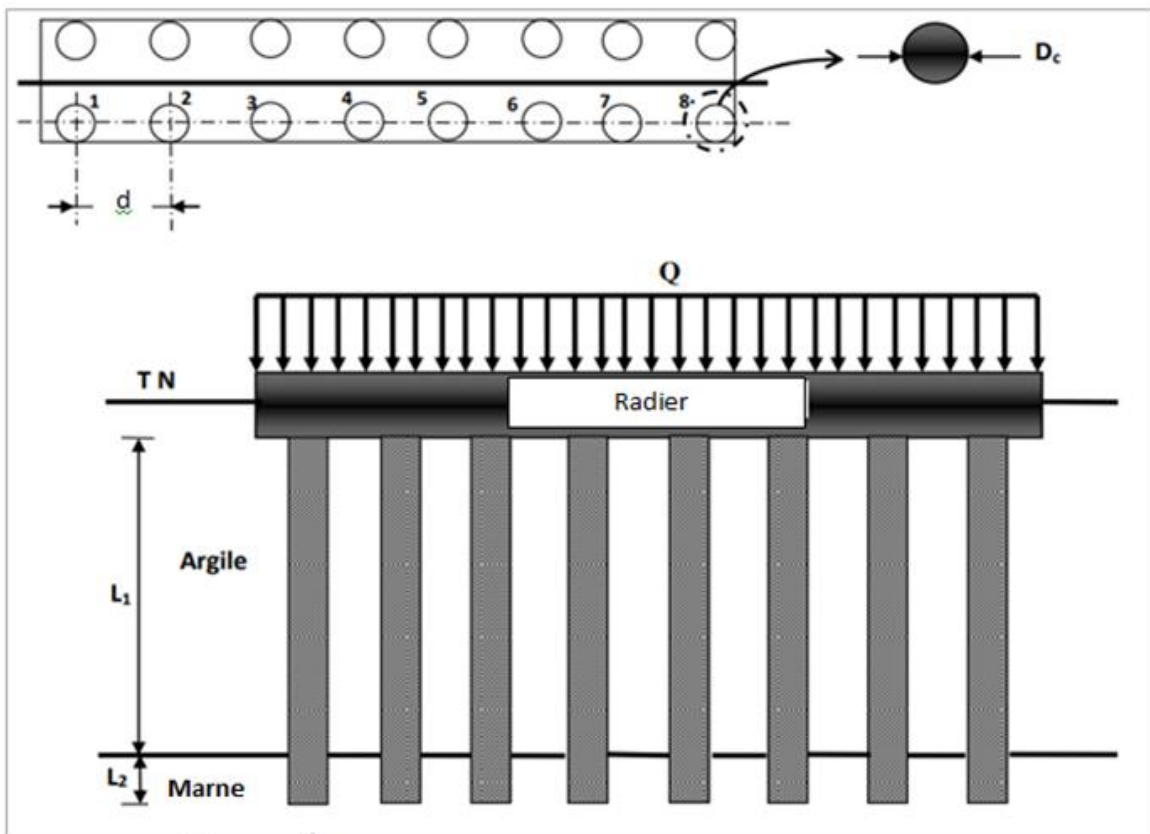


Figure III.14: Le modèle géométrique

2-Le maillage

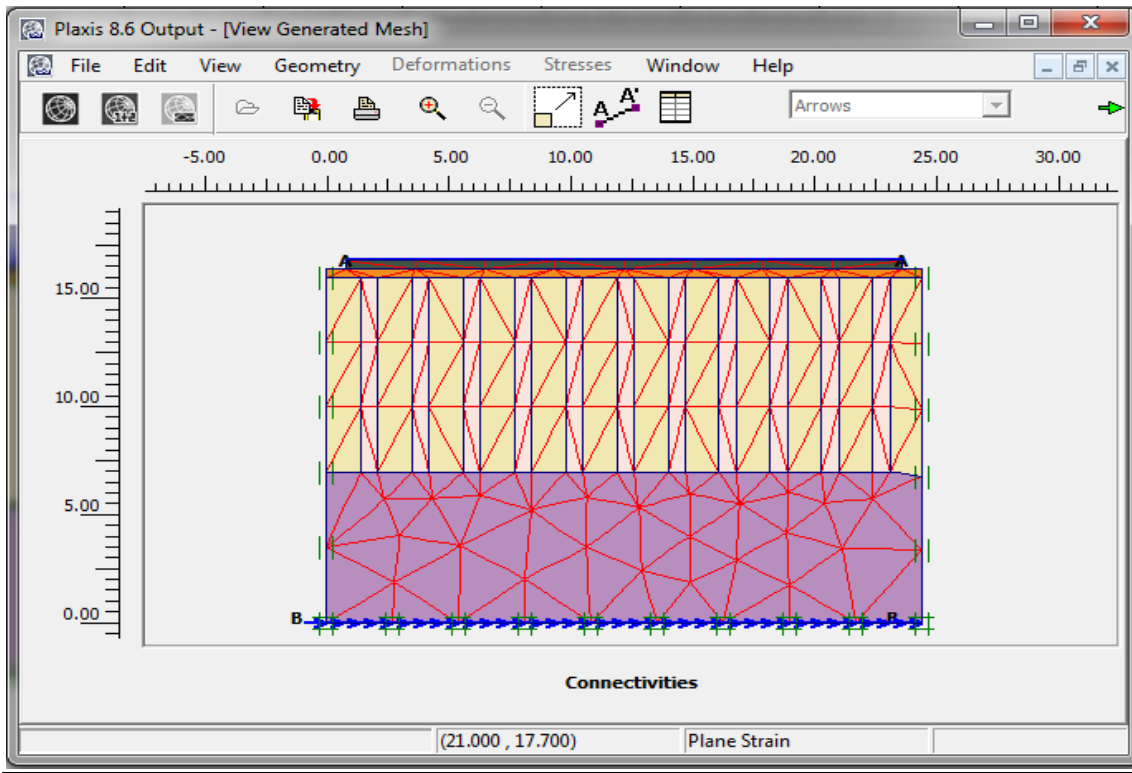


Figure III.15: maillage du modèle

3-Conditions initiales

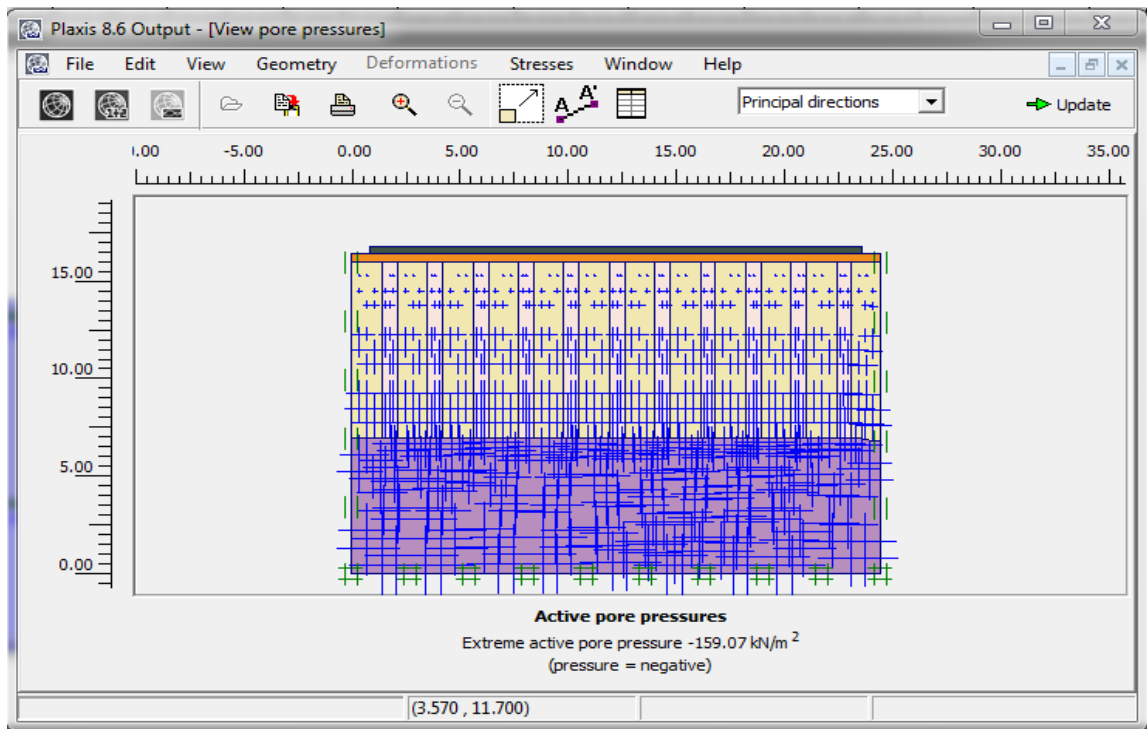


Figure III.16: Répartition des pressions interstitielles

4-Calculs

- ✧ En désigne les noms de nous phases et leur type de calcul
- ✧ Sur la 6eme phase qui est la phase dynamique en fait introduire l'accélérogramme séisme

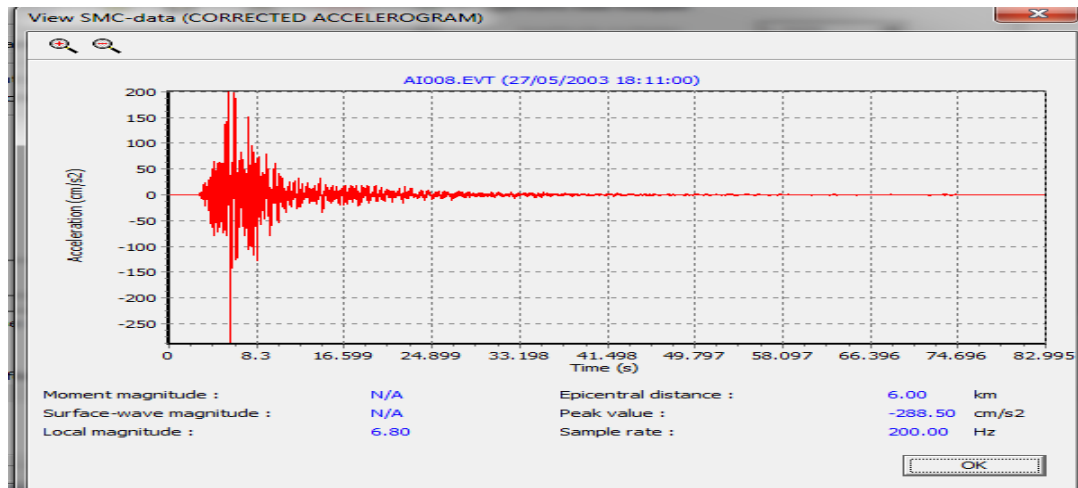


Figure III.17: Accélérogramme.

- ✧ Le choix des points :

Le choix des coordonnées des points a été un choix identique à celle du massif sans colonne ballastées

-avoir les graphes de déplacement nous avons choisis les points A, B, C, D.

-les graphes des contraintes nous avons choisis les points E, F, G, H.

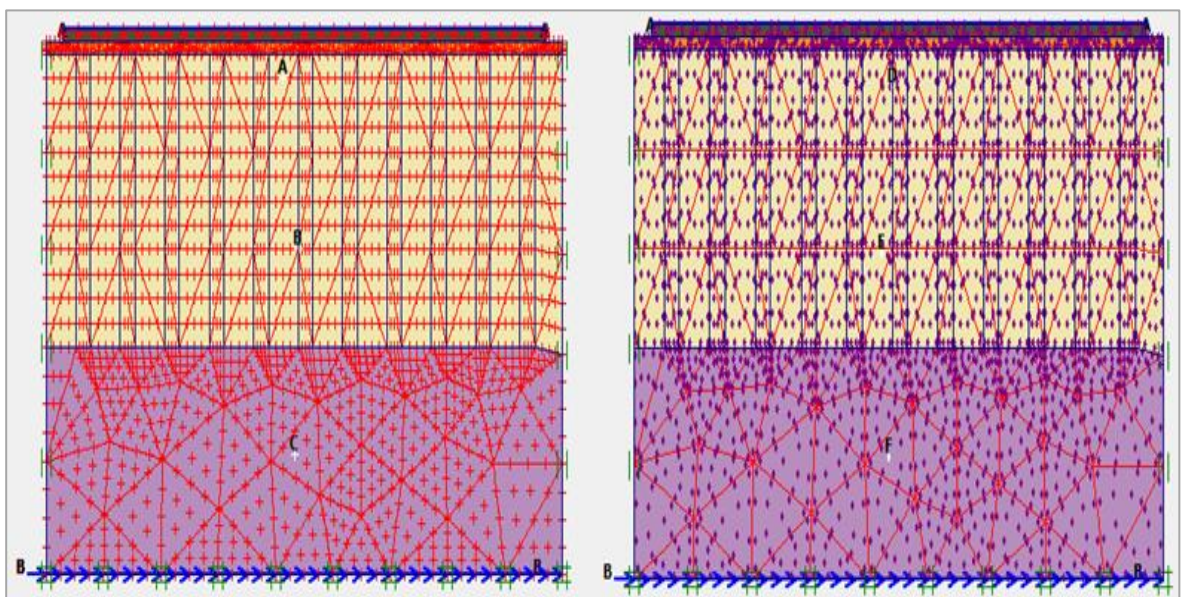


Figure III.18: La disposition des points choisis pour un sol sans colonnes

III.8. Conclusion

L'objectif de chapitre de modélisation numérique sur le point de vue fonctionnel, c'est de montré les étapes ou les actions effectuées sur le logiciel et sur le point de vue structurel c'est de décrire les caractéristique de chaque matériaux et les point de différence entre eux en fin sur le point de vue comportemental c'est de modéliser le problème selon le type de loi de comportement des matériaux utiliser dans le modèle géométrique.



Chapitre IV: Résultat et Discussion

IV. Représentation des résultats obtenus sous forme des schémas et des courbes

IV.1. Déplacement

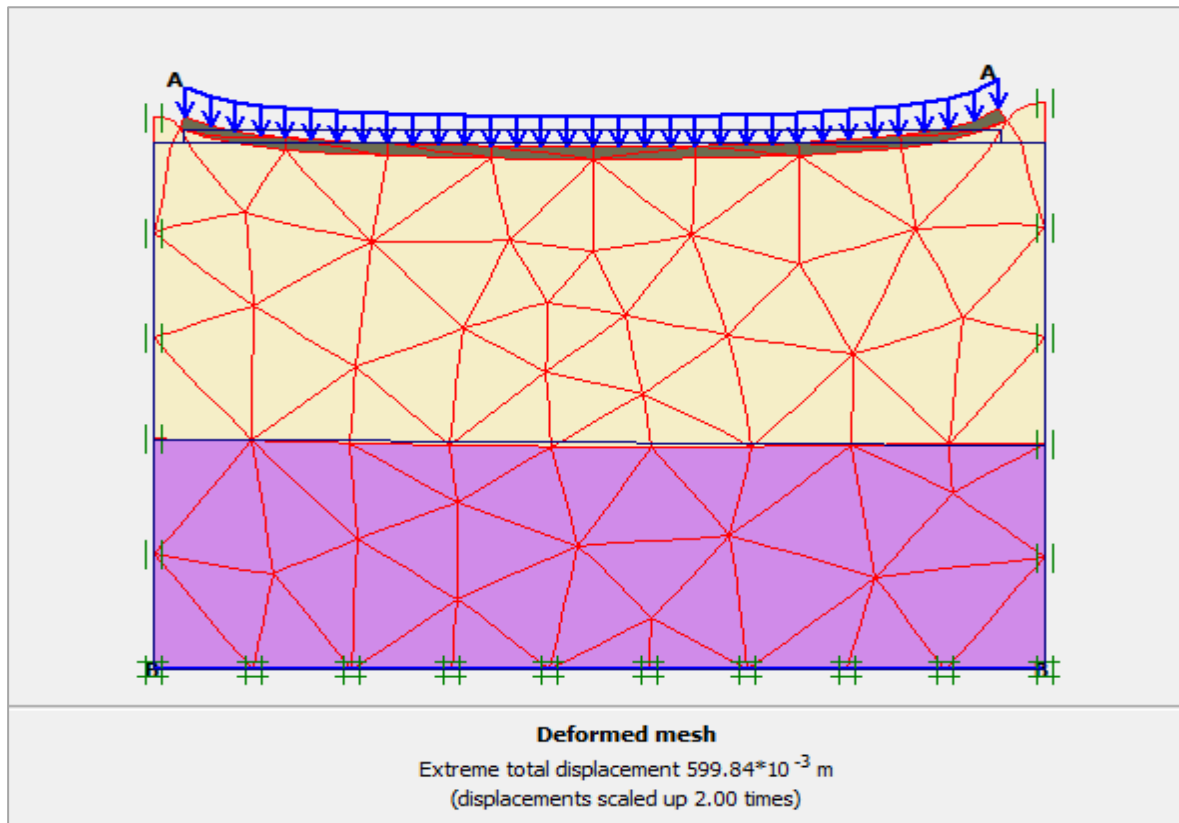


Figure IV.1.a : Déformation du maillage pour le sol sans colonnes ballastées

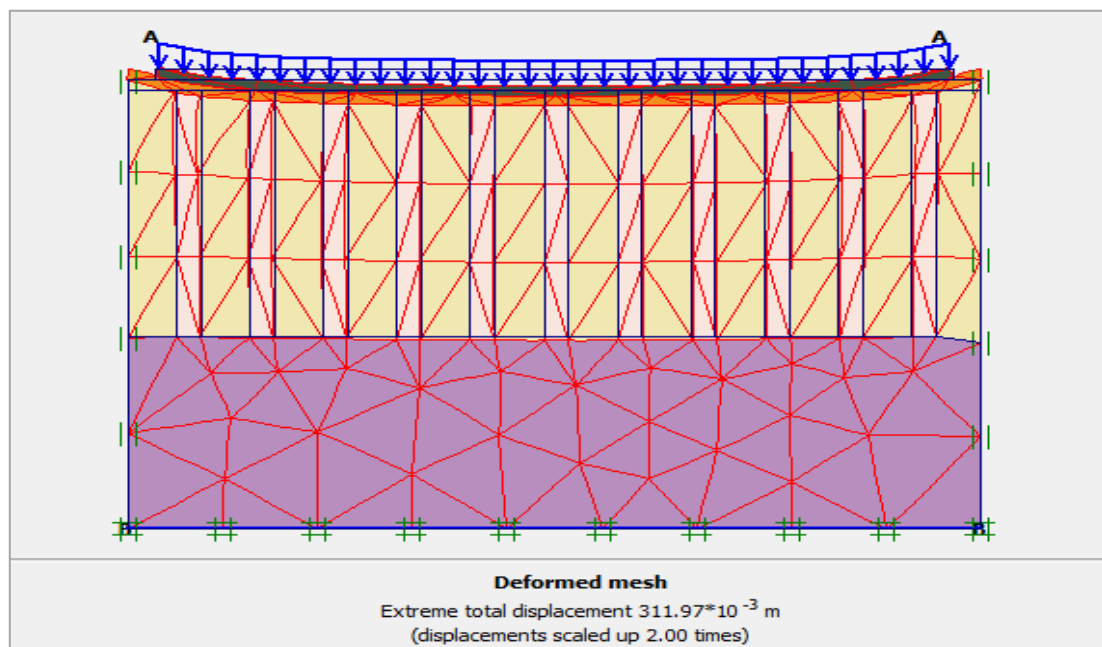


Figure IV.1.b: Déformation du maillage pour le sol avec colonnes ballastées.

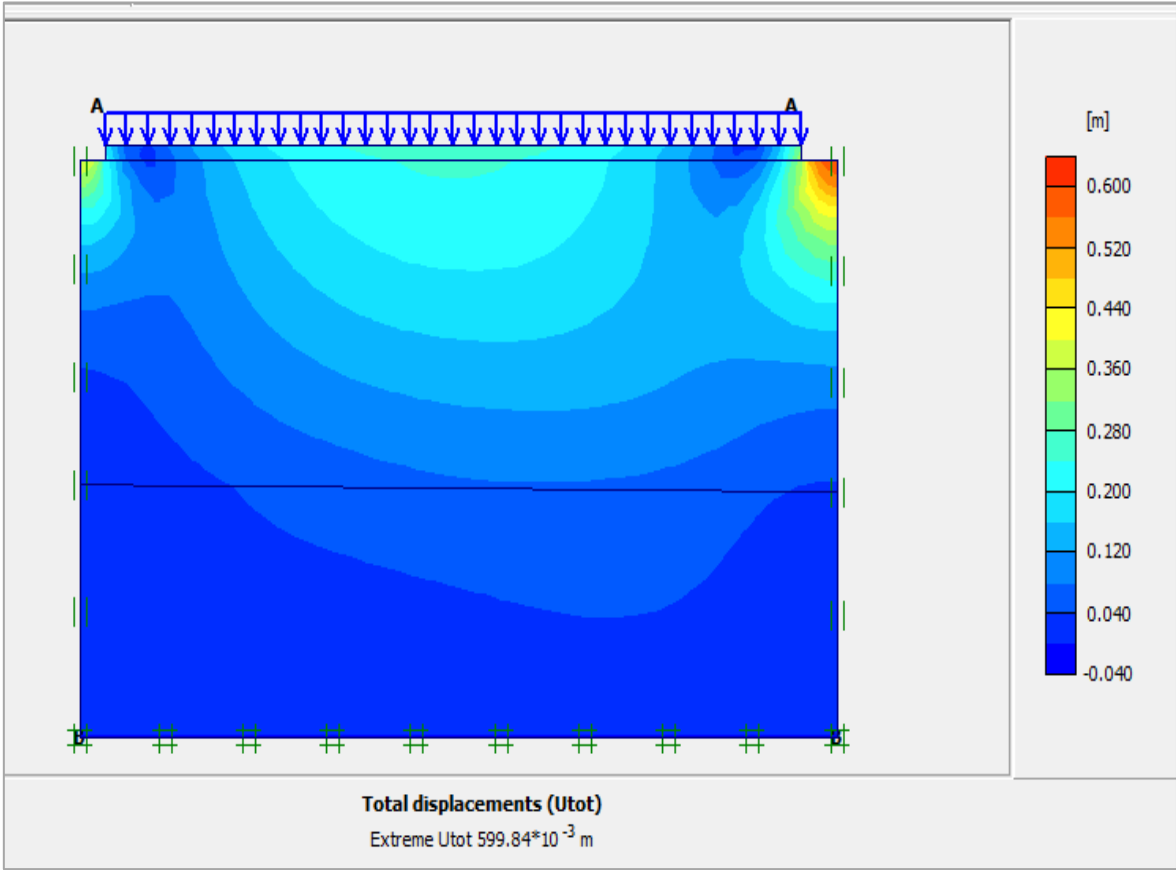


Figure IV.2.a : Représentation de déplacement totale SC

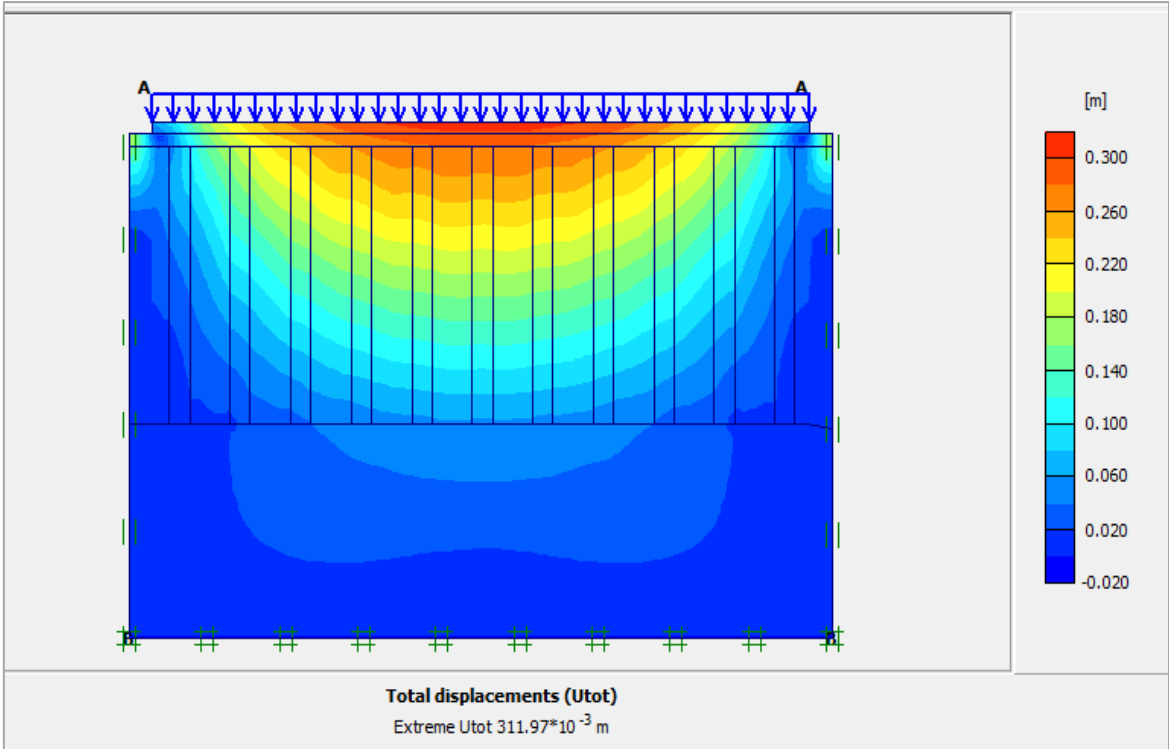


Figure IV.2.b: Représentation de déplacement totale AC

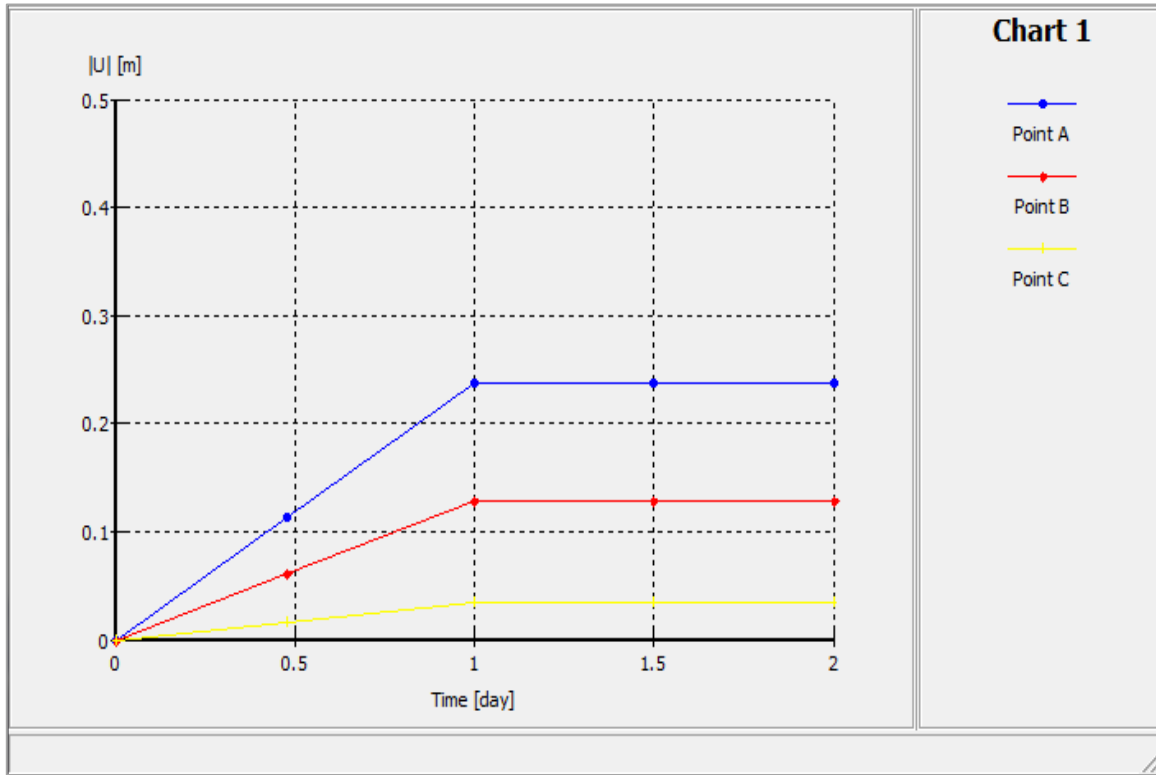


Figure IV.3.a : Courbe de Déplacement total SC

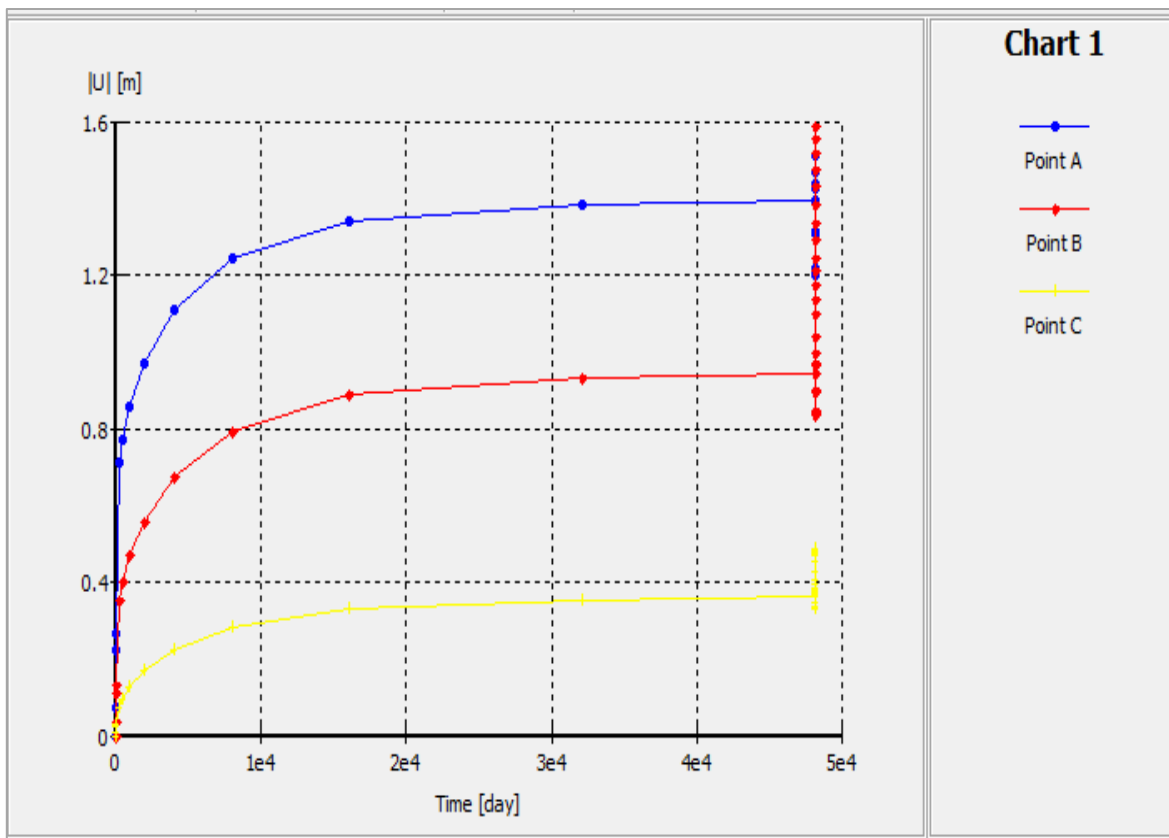


Figure IV.3.b : Courbe de Déplacement total AC

Interprétation des résultats

D'après les différents résultats obtenus, on constate que :

- Dans les figure IV.1.a et figures IV.1.b on observe que le déplacement total pour le sol sans colonnes ballastées est plus grand que par rapport au déplacement de sol avec colonnes ballastées
- Dans les figures IV.3.a et figure IV.3.b les courbe nous a montré une variation linéaire puis elle se stabilise dans un temps long en revanche dans le 2^{ème} cas la courbe atteint une valeur maximale ensuite elle chute considérablement

On conclue que les colonnes ballastées jouent un rôle important dans la réduction des tassements. Ce qui indique que la présence des colonnes va induire une augmentation de la résistance de sol en augmentant ces caractéristiques mécaniques.

IV.2. Accélération

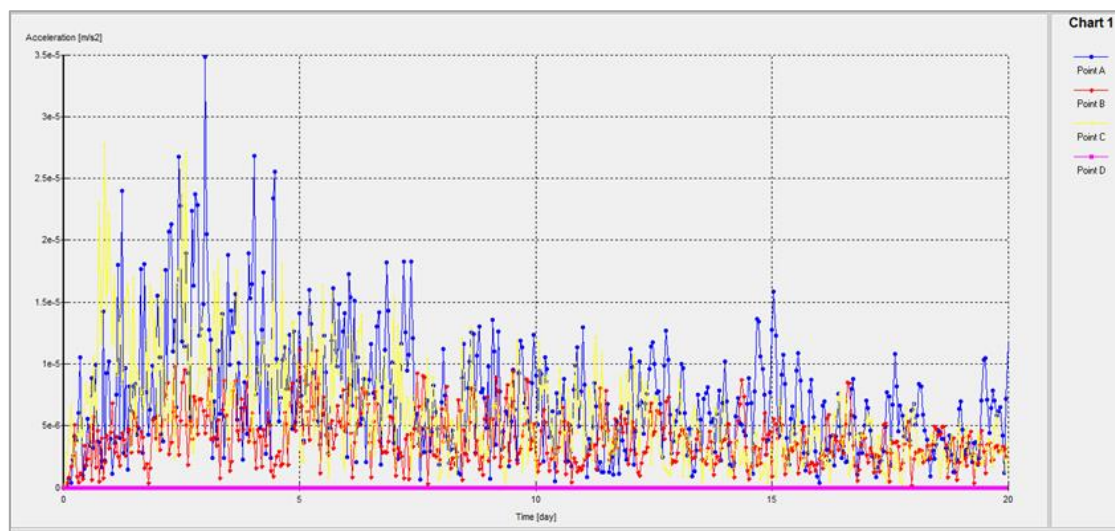


Figure IV.4.a: Représentation de l'accélération dans un sol SC

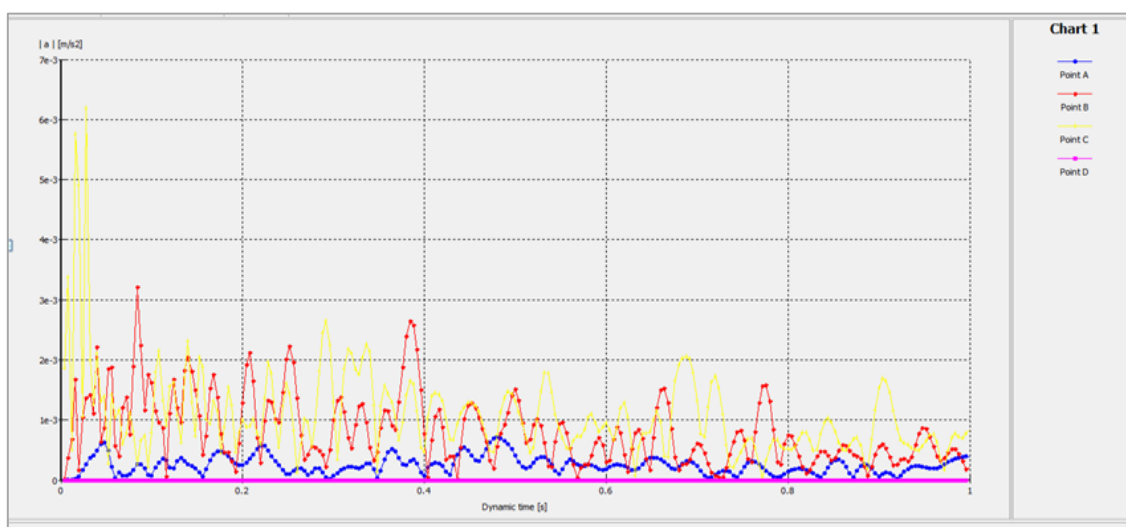


Figure IV.4.b: Représentation de l'accélération dans un sol AC

Interprétation des résultats

En analysant les ondes de l'accélération des figures IV.4.a et IV.4.b, on constate que la propagation des ondes est important dans le sol SC dans une période de temps très large par contre dans le sol renforcé par colonnes ballastées la propagation des ondes est très faible. Donc d'après c'est résultats de l'accélération on conclue que les colonnes Ballastées diminue la propagation rapide des ondes.

IV.3. Pression active

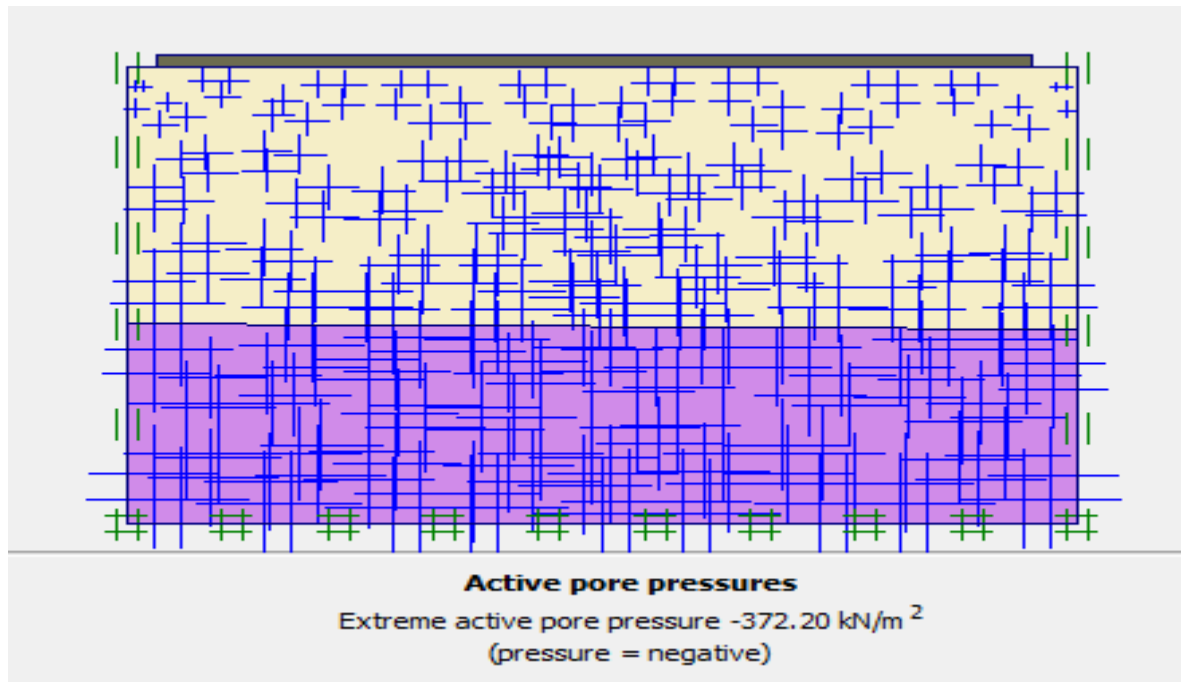


Figure IV.5.a: Représentation de la pression active dans le sol SC

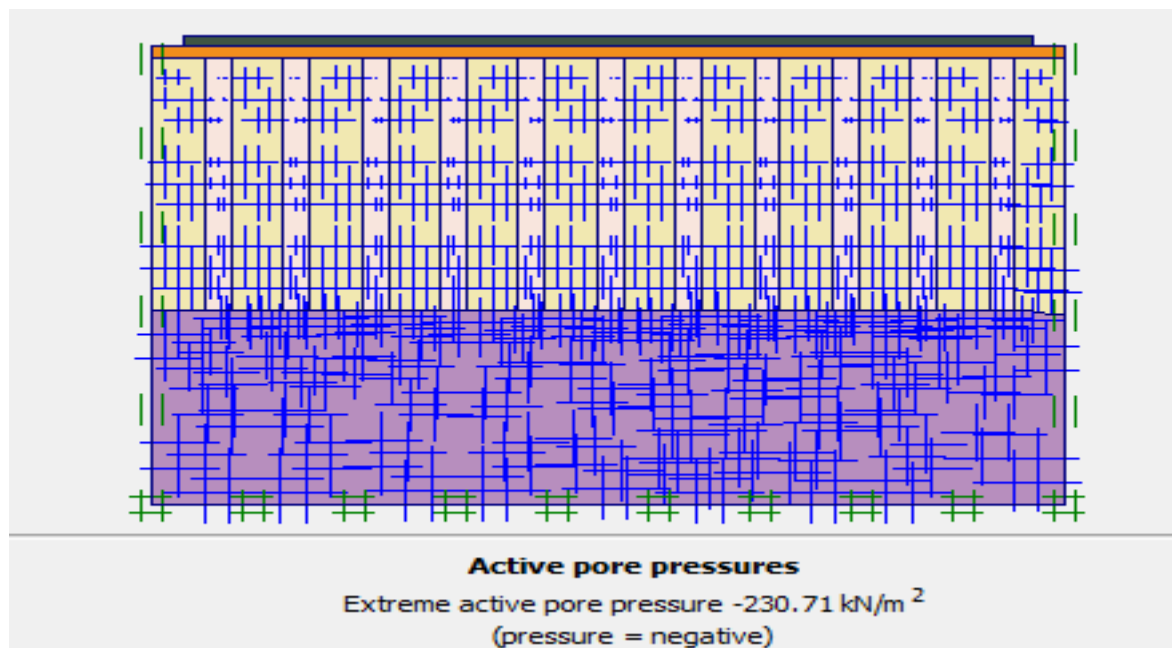


Figure IV.5.b: Représentation de la pression active dans le sol AC

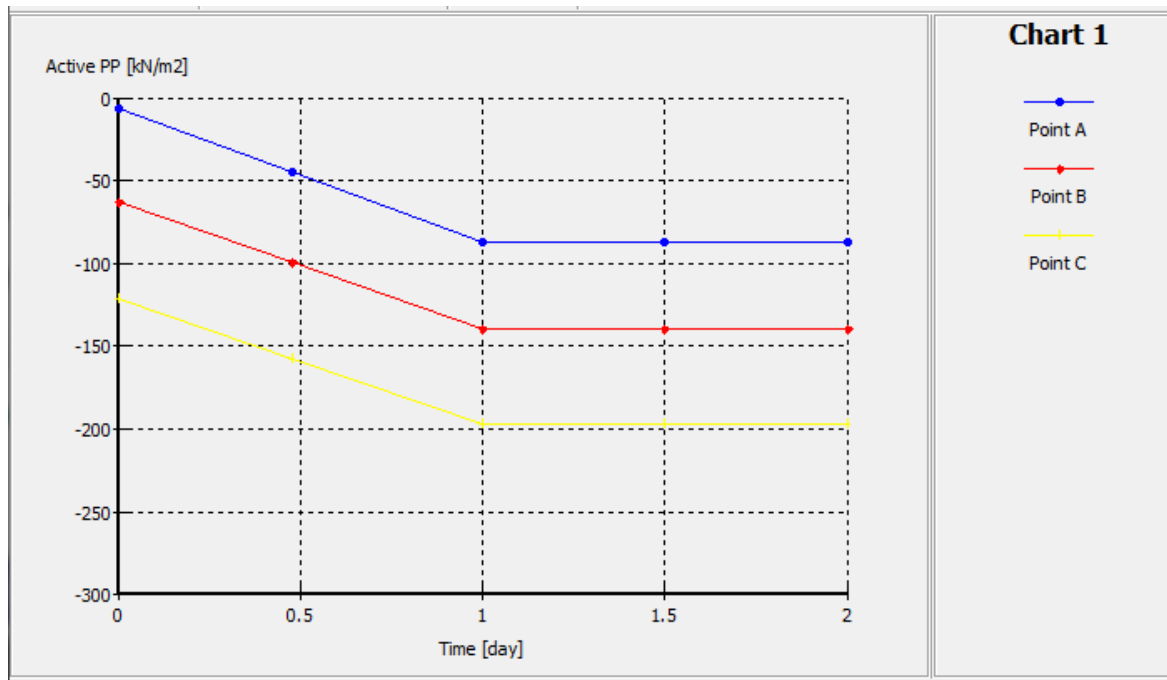


Figure IV.6.a : Courbe de la pression active pour le sol SC

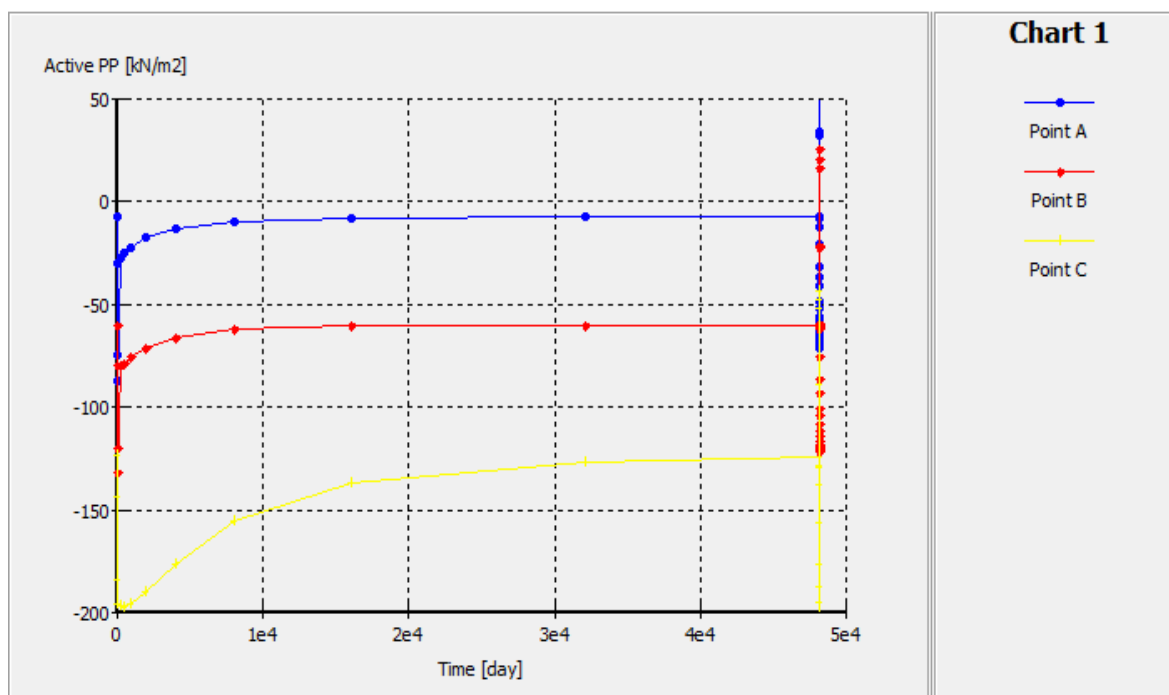


Figure IV.6.b : Courbe de la pression active pour le sol AC

Interprétation des résultats

D'après les différents résultats obtenus, on constate que :

- Dans les quatre figures ci-dessus on observe que la pression active pour le sol sans colonnes ballastées est plus petites par rapport à la pression active de sol renforcé avec colonnes ballastées. On conclue que les colonnes ballastées contribue à la dissipation rapide des pressions interstitielle dans un temps plus petites pour accélérer la consolidation.

IV.4. Chargement gravitaire

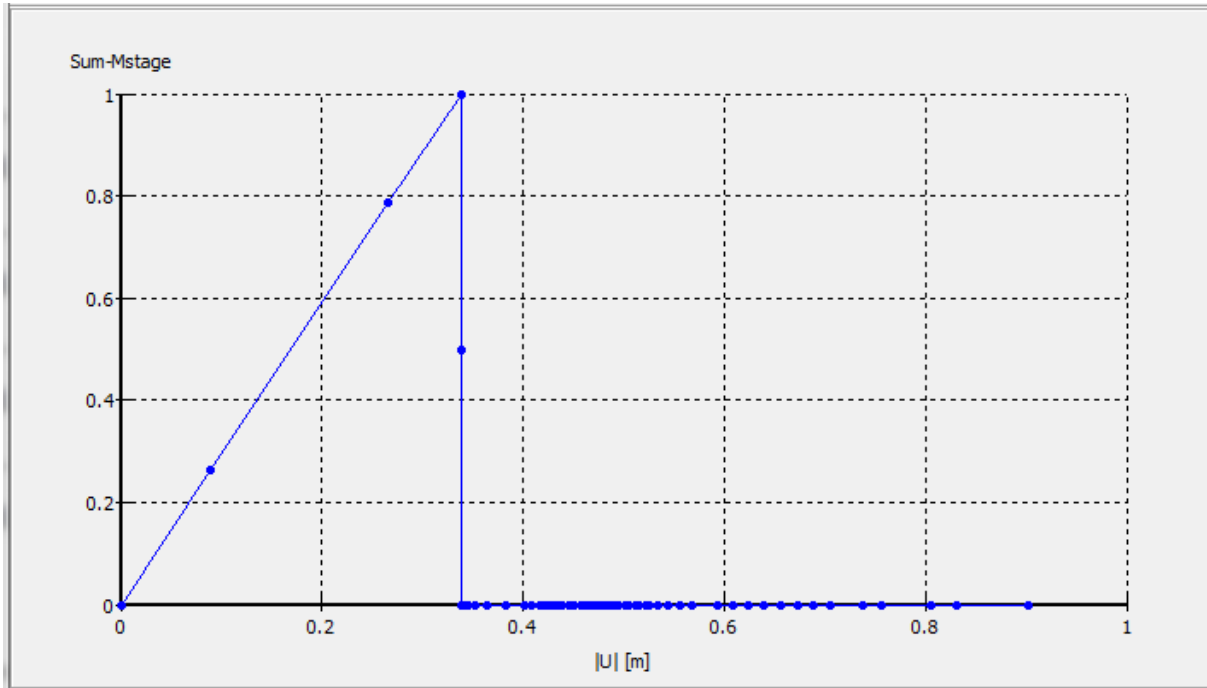


Figure IV.7.a : courbe Mstage-déplacement SC

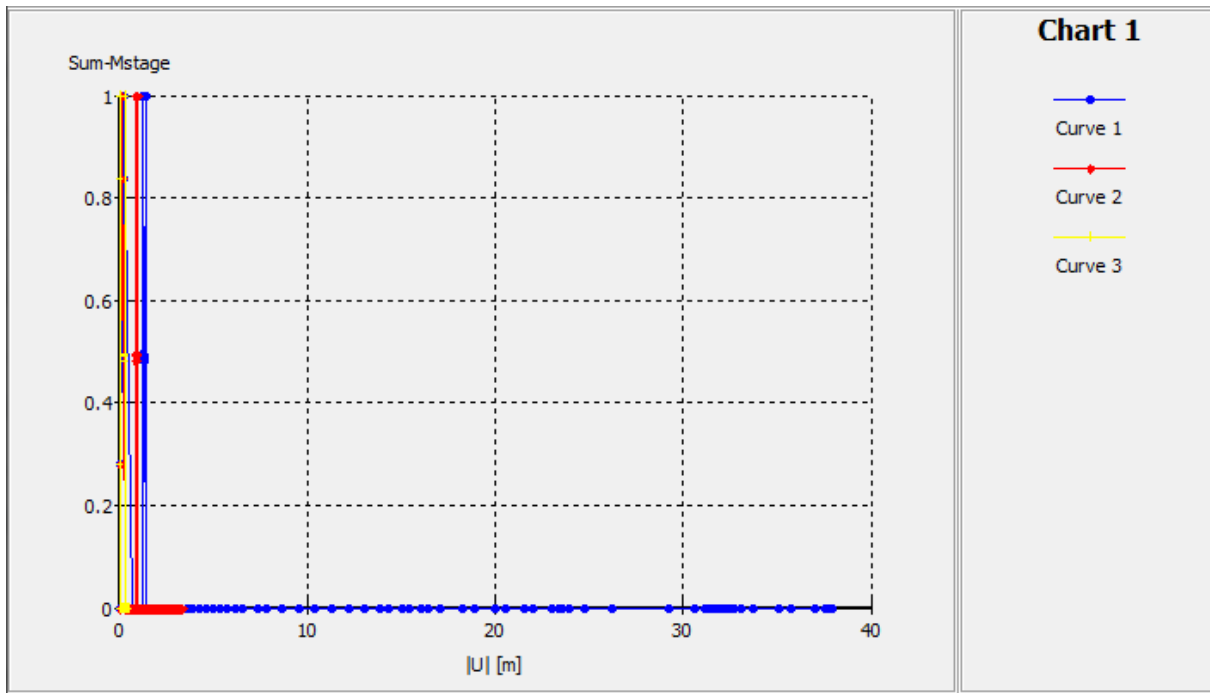


Figure IV.7.b : courbe Mstage-déplacement AC

Interprétation des résultats

D'après les deux courbes des Figure IV.7.a et la Figure IV.7.b on constate que M_{stage} croit linéairement dans les phases de construction. Et le vecteur déplacement diminuer dans le cas de sol renforcé.



Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Au cours de ce projet, cette étude nous a permis de rassembler plusieurs connaissances sur l'amélioration et le renforcement des sols à savoir le renforcement par colonnes ballastées qui est un procédé facile à mettre en œuvre, relativement rapide et surtout économique et plus respectueux vis-à-vis de l'environnement et qui est vraiment une solution au problème des sols médiocres des faibles propriétés.

Nous avons vu grâce à la synthèse bibliographique qui fait l'objet de premiers chapitres du mémoire, les fondamentaux principes du renforcement des sols mous par des colonnes ballastées. Les différents procédés d'exécution à savoir l'installation des colonnes par voie sèche et l'installation avec injection de l'eau (par voie humide) ont été présentés ainsi que les champs d'application de ce type de renforcement et leurs diverses utilisations dans le domaine de génie civil et l'effet positif de l'amélioration des sols mous et leurs avantages.

Dans le deuxième Chapitre, une brève présentation a été donnée sur le logiciel Plaxis 2D et certaines lois de comportement décrites essentiellement pour la simulation du comportement des massifs de sols soumis aux différents chargements.

Dans le Chapitre III Pour une bonne compréhension des différentes démarches utilisées dans la modélisation de notre cas qui nous avons pris comme cas pratique d'étude le projet de renforcement de sol par colonnes ballastées sous un bâtiment (R+9) de 20 logements promotionnels Khraicia-Alger, Les données géotechniques ont clairement montré que le sol n'avait pas les propriétés mécaniques suffisantes pour supporter les charges transmises par la superstructure. De plus les tassements prévisibles estimés par diverses méthodes conduisent à des valeurs inacceptables liées aux tolérances de construction. Face à ces contraintes faible capacité portante et de tassement excessif, le renforcement des sols par la technique des colonnes ballastées s'impose.

En fin dans le Chapitre IV et D'après les résultats obtenus dans la présente étude, en comparant le sol sans et avec renforcement par colonne ballastées :

- Réduction de déplacement vertical (réduction de tassement le massif renforcé que le massif non renforcé (accélération de consolidation)
- La diminution des propagations des ondes dans le sol renforcé

Conclusion générale

- Les colonnes ballastées augmentent les caractéristiques de sol ce qui induit une augmentation de la capacité portante

-La dissipation rapide des pressions interstitielle dans le massif du sol renforcé que le massif non renforcé.



Référence Bibliographique

Référence Bibliographique

- [1] Colonnes ballastées, Ammar Dhouib et Francis Blondeau, Presses des Ponts et Chaussées 2005.
- [2] Juan Carlos Mécanismes de tassement du ballast et sa variabilité. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01067945>, (Quezada.2014)
- [3] Dhouib.A et Francis Blondeau, Colonnes ballastées : mis en œuvre, domaines d'application, comportement, justification, contrôle, axes de recherche et développement, Presses des Ponts et Chaussées, 3 mai 2005, 264 p
- [4] Dhouib.A. (2005). Discussion au sujet de l'article « Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et ouvrages sensibles au tassement ». Revue française de géotechnique N° 111, pp. 3-16, 2^e semestre 2005
- [5] Document Keller, les techniques d'amélioration des sols, (décem, 2004).
- [6] Document Keller: La technique du Vibro-compactage, (janv , 2005).
- [7] Document Keller: Le procédé de la colonne ballastée. (Janv, 2005).
- [8] Documents Techniques Unifiés (DTU n°13.2) (1978). Fondations profondes : Colonnes ballastées. Chap. VIII. Paris, pp.57-59.
- [9] J-M.DebatS — the Vibroflotation Group, France W.S.Degen —VibroSystems Inc., USA
- [10] Dhouib.A et Francis Blondeau, Colonnes ballastées : ch2-comportement des colonnes ballastées, 3 mai 2005, p35.
- [11] BALAAM N. P., POULOS H. G., (1978), Methods of analysis of single stone columns, Univ. of Sydney, School of Civil Engineering, Research Report R 335.
- [12] Dhouib.A et Francis Blondeau, Colonnes ballastées : ch2-comportement des colonnes/comportement en zone sismique p80 ,2005.
- [13] Soil Liquefaction web site :[Archive], depts.washington.edu (consulte le 25 novembre 2017)
- [14] CHAIR, A & GACEM, Med.A (2020). Etude d'un cas de soutènement Sous charge horizontale (cas statique et cas dynamique) avec logiciel Plaxis 2D master, département de génie civil, Université AKLI MOHENDOULHADJ, BOUIRA.



Référence Bibliographique

- [15] le Comité de Direction de terra sol, avantage des logiciels Plaxis 2D ,3D. Repéré à <https://www.terrasol.fr/catalogue/plaxis-2d>
- [16]R.B.J Brink grève (2003). PLAXIS essential for geotechnical Professional (Manuel PLAXIS 2D Français), Université de technologie de Delft & Plaxis bv, Pays Bas.
- [17]Etienne. F, Pratique éclairée des éléments finis en Géotechnique, Paris 17-19novembre 2004
- [18]SCHANZ, T, VERMEER, P.A and BONNIER, P.G (1999) formulation and verification of the hardening soil model. In Computational Géotechnique, pp. 281–290
- [19]DUNCAN, J.M and CHANG, Y.Y (1970) nonlinear analysis of stress and strain in soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, Vol., pp.1629
- [20] Roy E. Hunt: Géotechnique Engineering Investigation Handbook, Second Edition(CRC Press, 2005).
- [21]Animation of the CPT by Prof. William A.
- [22]Kitch<https://www.youtube.com/watch?v=S5Zt2qo63qY>,(26 avr 2015)

Résumé

Résumé

Le présent sujet s'intéresse à l'étude de comportement d'un massif de sol renforcé par des colonnes ballastées. Notre étude consiste à faire une modélisation numérique bidimensionnel d'un sol de deux couche (couche d'argile de 9 mètres sous une couche d'une marne de 7 mètres) avec l'application d'une charge uniformément répartie sur une surface de radier d'un bâtiment et une charge dynamique à la base de modèle géométrique en utilisant le code de calcul Plaxis 2D.V8. Les résultats obtenus nous montrons l'objectif et l'influence de renforcement.

Mots-clés : Colonnes Ballastées, Comportement, Charge dynamique, Renforcement.

Abstract

The present topic focuses on the behavior study of a soil mass reinforced by ballasted columns. Our study consists of a twodimensional numerical modeling of a twolayer soil (9meter clay layer under a 7meter marl layer) with the application of a uniformly distributed load on a floor surface of a building and a dynamic load at the geometric model base using the 2D.V8 Plaxis calculation code.

Keywords: Ballasted Columns, Behavior, Dynamic Load, Reinforcement.

الملخص

يهتم هذا الموضوع بدراسة سلوك كتلة التربة المقواة بأعمدة حجرية. تتمثل دراستنا في عمل نمذجة رقمية ثنائية الأبعاد لتربة من طبقتين (طبقة من الطين 9 أمتار تحت طبقة مارل 7 أمتار) مع تطبيق حمولة موزعة بشكل موحد على سطح طوف من المبنى و حمل ديناميكي يعتمد على نموذج هندسي باستخدام كود حساب Plaxis 2D. V8

النتائج التي تم الحصول عليها تظهر هدف و تأثير التعزيز.

الكلمات الدالة: الأعمدة الحجرية. السلوك. الحمل الديناميكي. التعزيز.