الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTEUTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN SCIENCES DE LA MER

OPTION : AMENAGEMENT DU LITTORAL

Etude géotechnique pour la consolidation d'un terre-plein littoral au port d'Alger

Préparé par :

Melle AMARNI Nadia

Soutenu le 22/10/2014 à 8h30 devant le jury suivant :

M HEMDANE. Y	Maître de Conférences **(ENSSMAL) Président**
M HELLEL. M	Maître de Conférences **(ENSSMAL) Promoteur**
M MEZOUAR. K	Maître de Conférences **(ENSSMAL) Examinateur**
M OUBAICHE. E-H	Attaché de Recherche **(CGS) Examinateur**
M BOUKHROUF. M	Ingénieur chargé d'études **(CTTP) Invité**

Promotion : 2013/2014

Remerciements

*Je rends grâce à **Dieu** le tout puissant, pour m'avoir accordé la santé le courage la patience et la volonté jusqu'à l'aboutissement de mes études, et l'accomplissement de ce modeste travail.*

Je remercie chaleureusement tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce travail, en commençant par :

***Mr. HELLAL M,** maître de Conférences (ENSSMAL), qui m'a fait l'honneur d'avoir accepté d'encadrer ce travail, et pour ses précieux conseils. **Mr. HEMDANE Y,** maître de Conférences (ENSSMAL), qui a bien voulu présider le jury. **Mr. MEZOUAR K,** maître de Conférences (ENSSMAL), et **Mr. OUBAICHE. E-H** Attaché de Recherche (CGS) pour avoir accepté d'examiner ce manuscrit et de participer à ce jury.*

***Mr. MACHANE D,** (CGS), pour m'avoir aidé, et pour toutes ses explication.*

***Mr. BOUKHROUF M,** qui m'a fait une grande confiance de m'avoir fourni les données, et d'avoir sacrifié beaucoup de son temps pour m'expliquer le moindre détail des données et pour son soutien moral. Veuillez accepter Monsieur ma profonde gratitude,*

***Mr. FERNANE L,** qui m'a proposé ce thème et qui m'a encouragé à travailler là-dessus et qui m'a aidé dans sa réalisation en m'apprenant la manipulation de plusieurs logiciels, ainsi pour son soutien moral. Veuillez accepter Monsieur, ma profonde gratitude.*

*Mes profondes reconnaissances au personnel de la bibliothèque de l'ENSSMAL **CHERIF, FATIMA,** et **YOUCEF**...*

Enfin mes vifs remerciements, à toutes les personnes qui m'ont aidé du près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude.

Dédicaces

*A mes très chers **parents** pour leurs affection et leurs précieux conseils, qui veillent toujours à ma réussite voyez à travers ce travail mon amour sincère et ma gratitude profonde*

*A mes sœurs: **LILA, AKILA, SARAH***

*À mes frères: **MOUHEND, HMED, AMAR***

*A mes grands mers **TASADIT** et **DOUDJA***

*Amon fiancé: **LOUNES**, pour son aide et pour le soutien moral et à toutes sa famille.*

A tous mes autres proches et à mes amis qui sont très chers chacun le sait sans cité les noms

Et spécialement à vous qui vous êtes en train de lire ce modeste travail à ce moment

Table des matières

Introduction générale.. ……9

CHAPITRE I : Généralités..... 10

I. Présentation de la zone d'étude 11

I.1. Situation géographique de la baie d'Alger..... 11

I.2. Situation géographique de la zone d'étude 11

I.3. Aperçu géologique 12

I.4. Aperçu sismotectonique ..... .15

I.4.1. Aperçu sur la sismicité historique ..... .15

II.4.2. Tectonique régionale et failles actives 15

II.4.3. Classification des zones sismiques 18

CHAPITREII : Caractérisation géologique du site d'étude 20

Introduction 21

II.1. Géologie du site d'étude 21

I.2. Lithologie du sous-sol du site d'étude..... 22

II.2.1. Coupes lithologiques corrélatives Nord-Sud..... 23

II.2.2. Coupes lithologiques corrélatives Est-Ouest..... 25

Conclusion..... 26

CHAPITRE III : Caractérisations géotechniques du site d'étude..... 28

Introduction 29

III.1. Etude géotechnique du sol allochtone 29

III.1.1. Etude géotechnique du remblai de l'ancienne darse N°7..... 30

III.1.2. Etude géotechnique de remblai de môle El- Hadjar..... 33

III.2. Etude géotechnique du sol Autochtone 37

III.2.1. Etude géotechnique de grés..... 37

III.2.1. Etude géotechnique des marnes..... 38

Conclusion……42

CHAPITRE IV: Renforcement du sol de la zone d'étude par colonnes ballastées…….…… 43
Introduction 44
IV.1.1. Définition des colonnes ballastées 44
IV.1.2.Domaines d'application 44
IV.1.3. Objectif des colonnes ballastées 45
IV.1.4.Maillage des colonnes ballastées……45
IV.1.5.Techniques de mise en œuvre 46
IV.1.6. Avantages des colonnes ballastées 48
IV.2. Résultats obtenus dans les planches d'essais 48
IV.2.1. ZONE1 (Remblai de l'ancienne darse N°7) 49
IV.2.2. ZONE 2 (Remblai de la partie Nord et centre de môle El -Hadjar) 50
IV.2.3.ZONE 3 (Remblai de la zone la Plus intérieure du terminal) 51
IV.2.4. ZONE 4 (Remblai de la partie Sud-ouest du terminal (inclusions sableuses sous passage gréseux) 51
IV.3. Contrôle des colonnes ballastées 52
IV.3.1.Avant la réalisation des colonnes ballastées (contrôles du matériel d'Apport) 52
IV.3.2. Pendant la réalisation des colonnes ballastées (autocontrôle) 52
IV.3.3.Après la réalisation des colonnes ballastées (contrôle de résistance) 53
Conclusion 56
Conclusion générale 57
Références bibliographiques 60
Annexes……63

Liste des figures

Figure 1: Présentation de la Baie d'Alger et localisation de la zone d'étude (cadre en rouge) sur un fond d'une carte marine (Juin 2009)

Figure 2: localisation de la zone d'etude dans le port d'Alger

Figure 3: Carte géologique de la Baie d'Alger et ses environs (compilée par JICA, 2006)

Figure 4: Carte sismotectonique de la région d'Alger (Cheikh Lounis, 2011 in CGS, 2014)

Figure 5: Cadre tectonique de la région d'Alger et ces environs**,** En trait noire les failles sur terre, [F.B: faille du sud de la Mitidja, F.S: faille de Sahel, F.TH faille de Thénia] (Meghraoui, 1988). En trait rouge les failles en mer, mise en évidence par la campagne Maradja. L'étoile noire indique l'épicentre du séisme du 21 mai 2003, (Domzig, 2006 in Hellel, 2010)

Figure 6: Classification sismique des wilayas d'Algérie (CGS, 2003)

Figure 7: Schéma représentatif du phénomène de liquéfaction

Figure 8: Mise en place des grands portiques des quais

Figure 9:Lithostrtigraphie du la région du port d'Alger, extraite de la carte géologique de la Baie d'Alger (JICA 2006)

Figure 10: Localisation des sondages carottés (cercle rose), les essais au pénétromètre statique (triangle jaune), des coupes N-S (traits bleu), et des coupes E-W (traits vert) dans la zone de TAC du port d'Alger

Figure 11: Coupe lithologique corrélative AA' de direction N-S avec localisation des sondages carottés (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)

Figure 12: Coupe lithologique corrélative BB' de direction N-S avec localisation des sondages carottés (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)

Figure 13: Coupe lithologique corrélative CC' de direction N-S avec localisation des sondages carottés (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)

Figure 14: Coupe lithologique corrélative DD' de direction E-O avec localisation des sondages carottés (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)

Figure 15: Coupe lithologique corrélative EE' de direction E-O avec localisation des sondages carottés (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)

Figure 16: Coupe lithologique corrélative FF' de direction E-O avec localisation des sondages carottés (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)

Figure 17: Coupe lithologique corrélative GG' de direction E-O avec localisation des sondages carottés (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)

Figure 18: Situation de l'ancienne darse n°7 et Môle El Hadjar dans le Terminal à Conteneurs du port d'Alger
Figure 19 : Echantillons du sol prélevés au sondage Sc24 entre la surface et 5,2 m de profondeur
Figure 20: Fuseau granulométrique représentatif du remblai de l'ancienne darse N°7
Figure 21 : Echantillons du sol prélevés au sondage Sc11 entre 5,4 m et 11,4 m de profondeur
Figure 22: Echantillons du sol prélevés au sondage Sc16 entre la surface et 5,4 m de profondeur
Figure 23 : Fuseau granulométrique représentatif de remblai de môle El-Hadjar
Figure 24 : Echantillons du sol prélevés au sondage Sc08 entre 11,5 m et 14,6 m de profondeur
Figure 25 : Echantillons du sol prélevés au sondage Sc20 à partir de 6,8 m de profondeur
Figure 26: Fuseau granulométrique représentatif des marnes de terminal à conteneurs du port d'Alger
Figure 27: Types de sols à améliorer par colonnes ballastées (Document de Keller^{R}in Zighmi 2012)
Figure 28: Domaine d'influence pour l'étude des réseaux de colonnes ballastées (Vincent Six;2006)
Figure 29: Mise en place d'une colonne ballasté par voie humide, (Vincent Six; 2006).
Figure 30: Emplacement des planches d'essais dans le terminal à conteneurs du port d'Alger
Figure 31: Exemple d'enregistrement de paramètres à l'aide de vibreur Keller

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des principaux séismes de la région Algéroise durant la période : 1365 - 1940, (USGS, CRAAG et al., in Boudiaf 1996) 15
Tableau 2 : Résultats de cisaillement direct obtenus pour le remblai de l'ancienne darse 32
Tableau 3 : Résultats des essais œdométriques obtenuus pour le remblai de l'ancienne dars 32
Tableau 4 : Résultats des essais pressiomètriques obtenus pour le remblai de l'ancienne darse 33
Tableau 5 : Résultats de cisaillement direct obtenus pour le remblai du môle El Hadjar 35
Tableau 6 : Résultats des essais œdométriques obtenus pour le remblai du môle El Hadjar..36
Tableau 7 : Résultats d'essais pressiomètriques obtenus pour le remblai du môle El Hadjar.36
Tableau 8 : Résultats des essais uni axiale obtenus pour les grés..... 37
Tableau 9 : Résultats des essais triaxiaux consolidés non drainés pour les marnes 40
Tableau 10 : Résultats d'essais triaxiaux non consolidés non drainés pour les marnes..... 40
Tableau 11 : Résultats d'essais de compression uniaxiale pour les marnes..... 40
Tableau 12 : Résultats d'essais œdométriques obtenus pour les marnes 41
Tableau 13 : Résultats d'essais pressiomètriques non drainés obtenus pour les marnes 41
Tableau 14 : Résultats des CPT obtenus sur les colonnes ballastées..... 54
Tableau 15 : Résultats des CPT obtenus sur le sol qui se trouve entre les colonnes ballastées 55
Tableau 16 : Résultats des essais de controle 55
Tableau 17 : résultats d'essai de consolidation de remblai de môle El HADJAR avant et après la réalisation des colonnes ballastées 56
Tableau 18: Résultats des essais géotechniques effectué sur les déférentes couches du sol de la zone du TAC……59

Introduction Générale

Introduction Générale

Durant le séisme de 21 Mai 2003, le terminal à Conteneurs du port d'Alger a subi le phénomène de liquéfaction au niveau de l'Ancienne DARSE N°7, et cela a engendré des remontés de sable (environ 200 m^3), induisant un tassement d'environ 60 cm à 80 cm dans cette zone et des déformations au niveau de môle El-Hadjar.

Ce problème nécessite le renforcement de ce sol afin d'éviter la résurgence de ce phénomène et faciliter les activités portuaire. Pour que le port d'Alger répande aux normes internationales et vu l'importance du dispositif qui va être mis en place, notamment les grands portiques sur les quai 30 et 31, il est indispensable de réduire les tassements et d'éliminer le risque de liquéfaction en cas d'un séisme.

Des études ont été menées, concernant la nature du sol de la zone du Terminal à Conteneurs du port d'Alger (TAC), Les résultats obtenus révèlent que le traitement de ce sol peut s'effectuer par la méthode des colonnes ballastées à voie humide.

Le but de ce travail est de faire une synthèse générale sur le comportement physique et mécanique du sol de la zone du TAC du port d'Alger on évaluant les caractéristiques géotechniques du sol. A cet effet, nous avons exploités les résultats d'une campagne géotechnique récente (2013).

Le travail qui va être présenté dans ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le chapitre I est consacré à la description géographique et géologique de la baie d'Alger à laquelle appartient notre zone d'étude, zone du TAC.

Le deuxième chapitre qui est axé sur la caractérisation géologique du site d'étude, en détaillant la lithologie du site d'étude, suivi d'un troisième chapitre qui résume les caractéristiques géotechnique du site d'étude.

Le quatrième chapitre détaille la méthode de renforcement utilisée pour améliorer les caractéristiques géotechniques du sol de notre zone d'étude (TAC).

Le travail s'achève avec une conclusion et quelques recommandations à suivre.

CHAPITRE I :
Généralités

I. Présentation de la zone d'étude

I.1. Situation géographique de la baie d'Alger

La baie d'Alger à laquelle s'appartient notre zone d'étude, le port d'Alger, se situe au centre du littoral algérien, elle se trouve entre Cap Matifou à l'Est, et Cap Caxine à l'ouest et ses cordonnées géographique sont 36°20'30" et 36°48'50" latitude Nord, 03°03'40" et 03°14'00" longitude Est.

Le port d'Alger se localise à l'ouest de la baie d'Alger (figure 1), il est protégé par le massif de Bouzareah. Ce port constitue une véritable Plate-forme de développement économique et des échanges extérieurs.

Il est protégé contre les intempéries par quatre (04) jetées et un brise-lames.

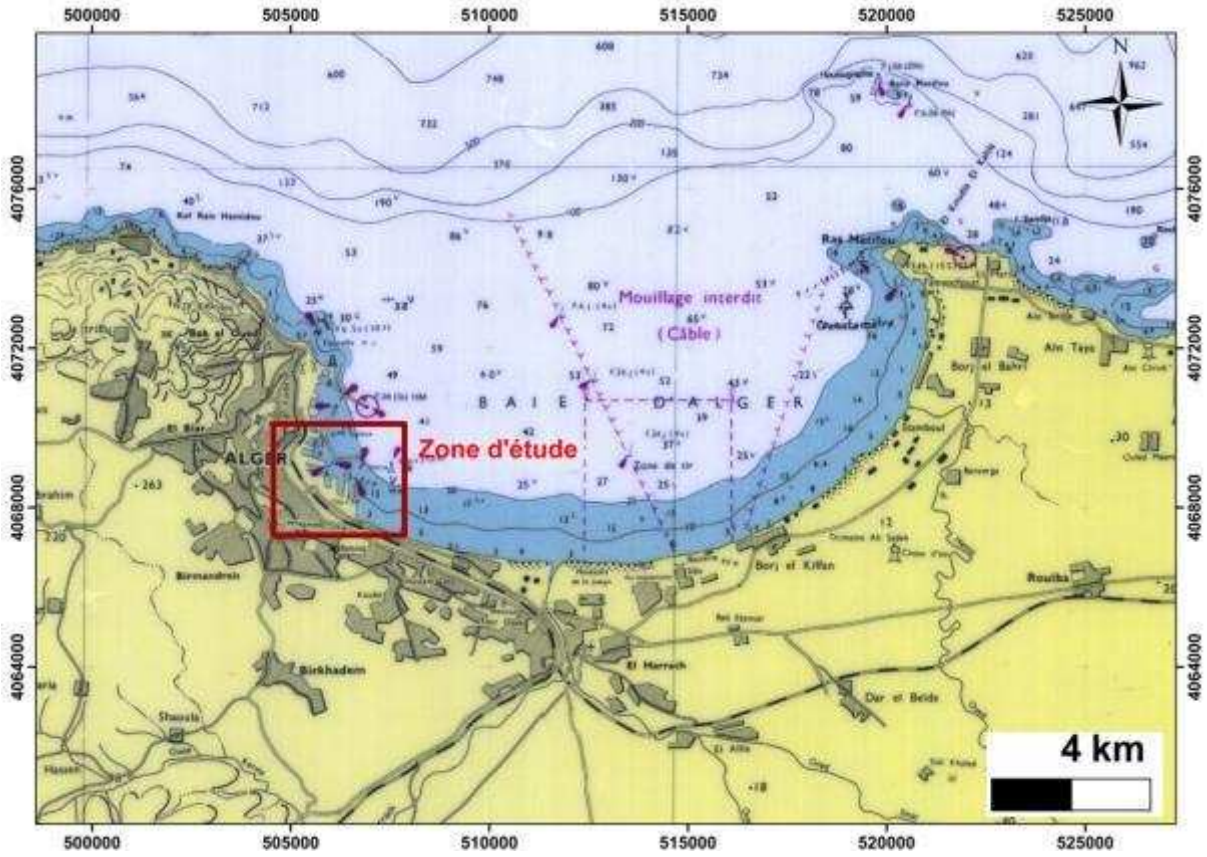


Figure 1: Présentation de la Baie d'Alger et localisation de la zone d'étude (cadre en rouge) sur un fond d'une carte marine (Juin 2009)

I.2. Situation géographique de la zone d'étude

Notre zone d'étude concerne la zone du TAC (Terminal A Conteneurs) du port d'Alger, cette zone se localise dans la partie Ouest de la baie d'Alger, elle est limité au Nord par le quai n°30 qui fait face au bassin de Mustapha, au Sud par la route nationale n°6, à l'Est par le quai n°31, et à l'ouest par le grand môle (figure 2).

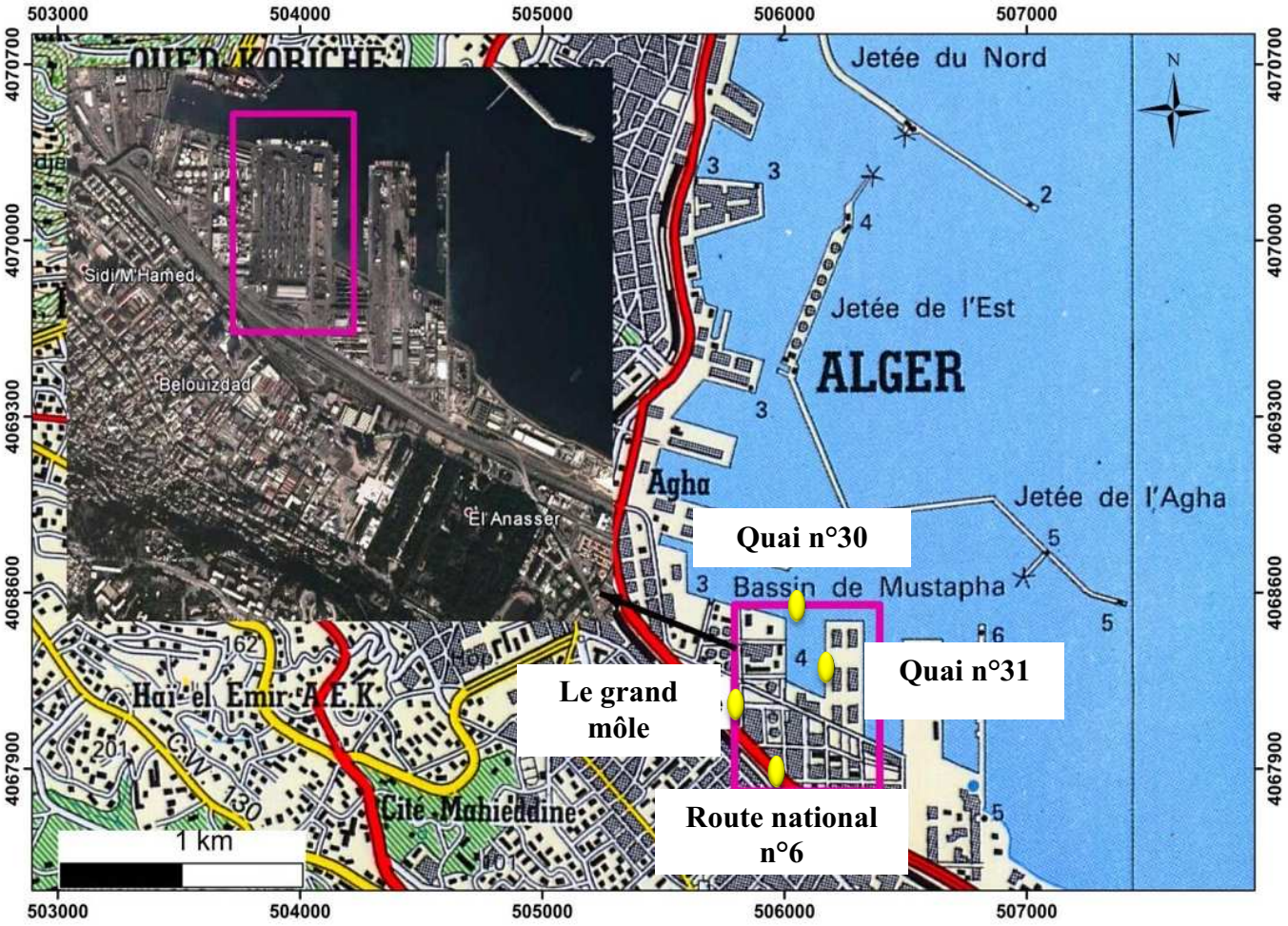


Figure 2: localisation de la zone d'etude dans le port d'Alger

Du point de vue morphologique, le site d'étude est plat, son altitude est faible, varié entre 2 et 3 mètre environ.

I.3. Aperçu géologique

La région d'Alger peut être présentée comme un dôme métamorphique primaire bordé par des assises sédimentaires d'âge Tertiaire et Quaternaire (figure 3) [Charakdji et Djenidi, 2006].

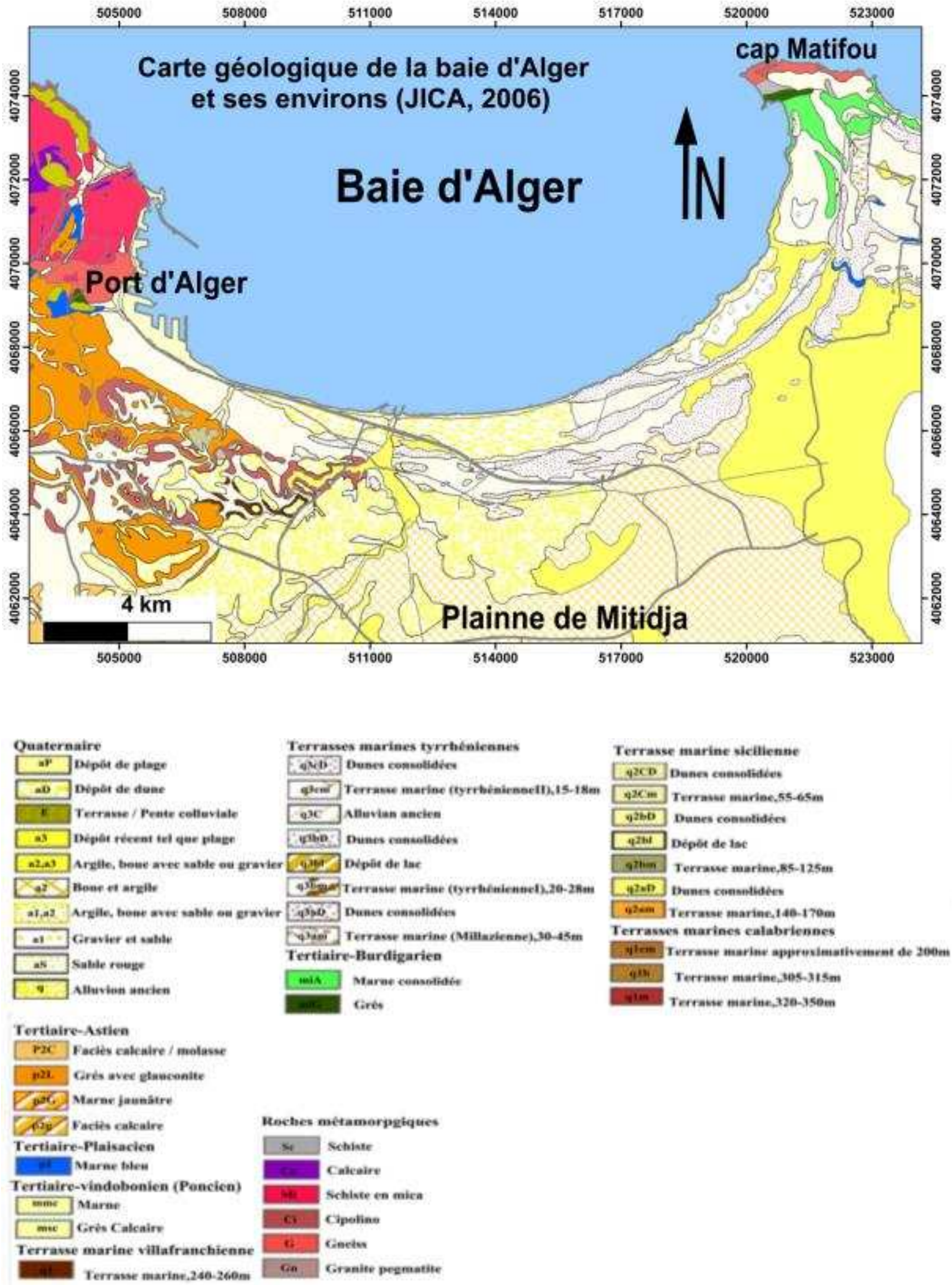


Figure 3: Carte géologique de la Baie d'Alger et ses environs [compilée par JICA, 2006]

A. Le Primaire

Le socle métamorphique est d'âge Primaire. Il est composé principalement de schistes, micaschistes, gneiss et granite. Il s'agit d'une formation très tectonisée qui affleure entre Ain Benian et le port d'Alger, en passant par Bouzareah [Boudiaf, 1996].

B. Le Secondaire

Le Secondaire n'affleure pas dans la région d'Alger à l'exception des bordures de la Mitidja, où sont constitués de calcaires et de marno-calcaires [Ameziane et Balit, 2006].

C. Le Tertiaire

Le Tertiaire de la région d'Alger est marqué par une lacune de l'Eocène et de l'Oligocène, il comprend le Miocène et le Pliocène, qui recouvrent en discordance les faciès métamorphiques. Il est représenté par des grés grossiers sableux qui affleurent très peu sur la bordure Sud de la plaine de la Mitidja [Ikhlef et Mokrani, 2006].

- **Le Miocène**

Il est matérialisé par des grés et conglomérats très cimentés, il affleure dans le ravin de l'oued Koraich et à Ain Taya à la base des falaises littorales [Benallal et Ourabia, 1989].

- **Le Pliocène inferieur (Plaisancien)**

Il est formé essentiellement par des marnes bleues pouvant atteindre 1000 mètres [Glangeaud et al, 1952 in JICA, 2006]. Le Plaisancien forme le substratum subsident du bassin de la Mitidja [Benallal et Ourabia, 1989 in Boukhrouf, 2012].

- **Le Pliocène supérieur (Astien)**

Il est bien développé dans la partie Sud du Sahel et apparaît très peu sur la bordure Sud de la Plaine de la Mitidja [Ikhlef et Mokrani, 2006]. Epais de 100 à 150 mètres, l'Astien est séparé du Plaisancien par un niveau à glauconies dont l'épaisseur peut atteindre 04 mètres [Hamga et Sayad, 2006]. Il se présente sous forme de marnes jaunâtres, de calcaires sableux, parfois riches en bivalves et de molasse [Glangeaud et al, 1952 in JICA, 2006].

D. Le Quaternaire

Les formations du Quaternaire résultent de l'érosion de l'Atlas Blidéen et de l'accumulation des produits de cette érosion dans la Mitidja et le Sahel, le Quaternaire est constitué :

- des dépôts continentaux détritiques, représentés par des sols rouges gréso-carbonnatés, et une formation de marnes et cailloutis, qui est une série laguno-fluviale, comblant, en partie, le synclinorium mitidjien. Cette formation est d'âge Sicilien [Aymé, 1964].
- de terrasses marines formées par la consolidation des dunes et des dépôts alluviaux contenant du sable, des graviers, des conglomérats et des microconglomérats à ciment calcaire [Djediat, 1996 in Benidir et Fernane, 2010].
- de dépôts récents comme les plages, les dunes, les terrasses marines récentes et les dépôts des rivières essentiellement formés de sable, de vase et d'argile [Djediat, 1996 in JICA, 2006].

I.4. Aperçu sismotectonique

I.4.1. Aperçu sur la sismicité historique

La région d'Alger à subit plusieurs séismes importants à travers son histoire (Tableau 1). Le séisme le plus ancien enregistré est celui d'Alger de 1365 qui a détruit une grande partie de la ville et provoqué un tsunami. Le dernier séisme enregistré est celui de Zemmouri, du 21 mai 2003 (Ms=6,8) qui a fait 2 278 morts et plusieurs milliers de blessés.

Tableau 1: Liste des principaux séismes de la région Algéroise durant la période : 1365 – 1940, (USGS, CRAAG et al 2003)

Date	Hr	Min	Sc	Lat(°)	Long(°)	Ms	I_0	Localisation
02-01-1365	19	00	00.0	36°42'00"	3°06'00"	-	-	Alger
10-03-1673	21	00	00.0	36°42'00"	3°06'00"	-	VII	Alger
00-05-1716	00	00	00.0	36°42'00"	3°06'00"	-	VIII	Alger
15-05-1854	15	00	00.0	36°30'00"	2°54'00'	-	VII	Alger
28-05-1940	10	15	36.0	36°48'00"	3°01480"	5.0	III	Alger

II.4.2. Tectonique régionale et failles actives

L'Algérie du Nord se situe dans une région marquée par la présence de plusieurs failles (Figure 4). Nous assistons actuellement à un mouvement de convergence entre les plaques Tectoniques Africaine et Eurasienne. La vitesse de raccourcissement entre les deux plaques est estimée entre 5 et 6 mm/an dans la région d'Alger [Domzig, 2006]. Le rapprochement des deux plaques se manifeste sous forme de séismes de magnitude plus ou moins élevée, dont le maximum est celui de Zemmouri (Ms 6.8).

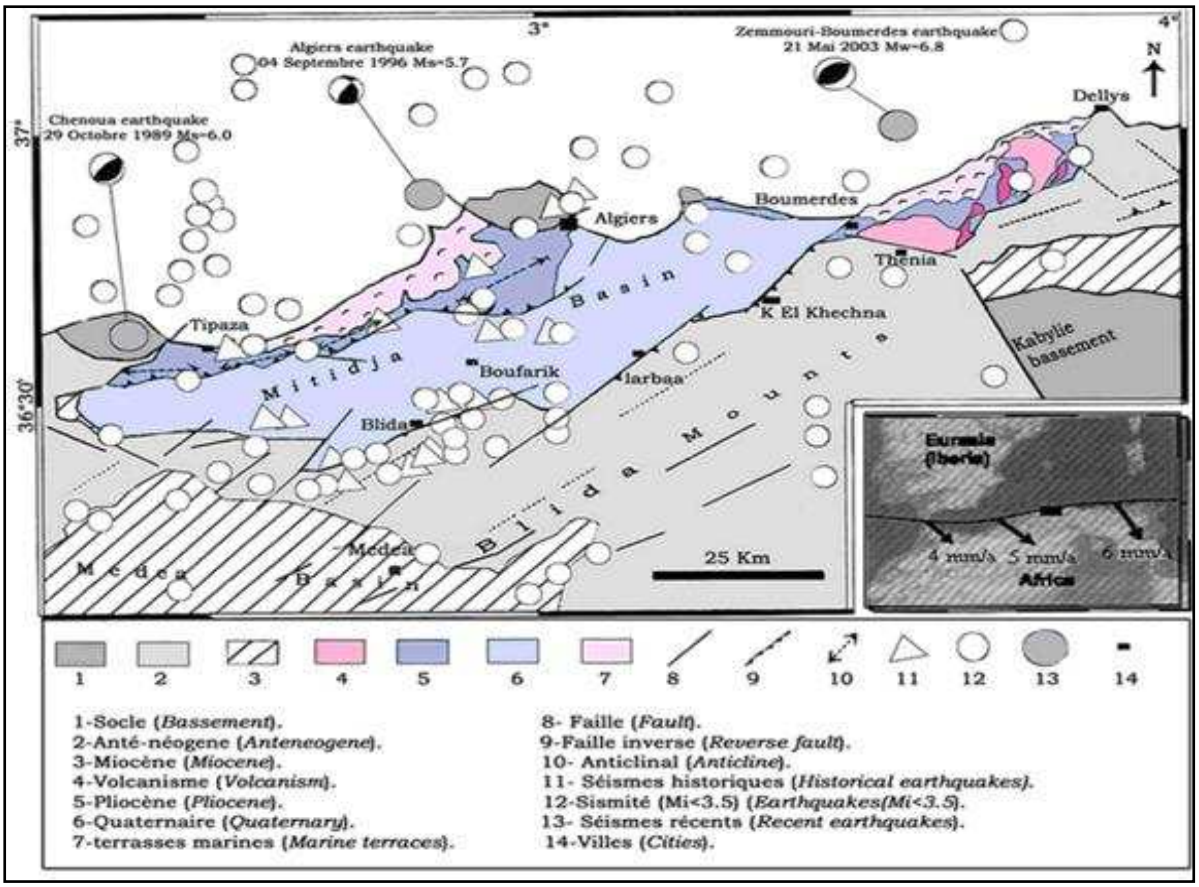


Figure 4: Carte sismotectonique de la région d'Alger [Cheikh Lounis, 2011 In CGS, 2014]

Les cartes sismo-tectonique de l'Algérois font état de deux types de failles. D'une part des failles décrochantes comme celle de Thénia, et d'autre part des failles chevauchantes comme celles bordant la Mitidja et le Sahel, qui se continueraient en mer au large de la côte entre Boumerdès et Dellys [Geomatrix, 2006 in Benidir et Fernane, 2010], et les principales failles actives dans l'Algérois sont:

A. La faille de Tipaza

Appelée aussi faille de Chenoua, elle constitue la limite entre la morpho-structure de surrection de Chenoua et le bassin de subsidence de la Mitidja (figure 5). Cette faille à une orientation Nord-Est, [Domzig et al, 2006].

B. La faille du Sahel

La faille du Sahel marque l'interface entre le bassin de Mitidja au sud et le Sahel d'Alger au Nord (figure 5). Sa longueur est de 63 km et se prolonge depuis le Mont Chenoua, jusqu'à la baie d'Alger son altitude est de 200 m environ. [Glangeaud, Aymé et al, 1952].

C. La faille de Thénia

Dite aussi la faille de Cap Matifou, c'est une structure cassante d'âge Quaternaire, d'une direction WNW-ESE et qui passe près de la ville de Boumerdes (figure 5). Elle s'étend de la baie d'Alger à l'Oued Isser sur une longueur total d'environ 35 Km, d'une forme rectiligne à pente raide, son élévation est de 50 à 80 m. [Deverchères et al, 2005].

D. La faille de Blida

La faille de Blida (Mitidja du sud) marque une interface entre le bassin de Mitidja au Nord et l'atlas blidien au sud (figure 5). L'Atlas blidien est une chaîne en topographie escarpée qui s'élève de 1500 m. Sa longueur est d'environ 41 Km [Géomatrix, 2006].

E. La faille offshore de Zemmouri

Méconnue jusqu'à sa mise en évidence par les deux campagnes Maradja (2003 et 2005). Sa structure serait celle d'un pli-faille. Le taux de déplacement de cette faille serait de 0,2mm/an, et sa direction est NE-SW (figure 5). Elle pourrait émerger à environ 15 kilomètres en mer [Semane, 2005], et serait à l'origine du séisme du 21 mai 2003.

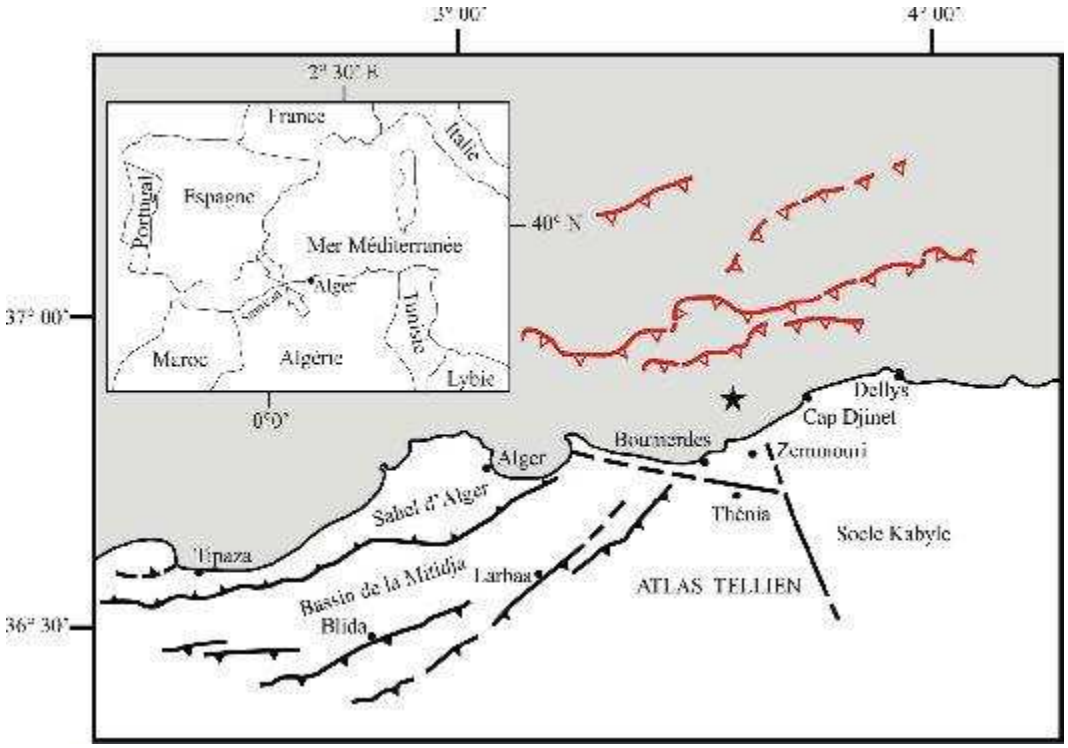


Figure 5: Cadre tectonique de la région d'Alger et ces environ En trait noire les failles onshore : (F.B : faille de la Mitidja, F.S : faille de Sahel, F.TH : faille de Thénia) [Meghraoui, 1988]. En trait rouge les failles en mer, mise en évidence par la campagne Maradja .L'étoile noire indique l'épicentre du séisme du 21 mai 2003, [Domzig, 2006 in Hellel, 2010]

II.4.3. Classification des zones sismiques

Le territoire national est divisé en quatre zones de séismicité croissante, définies sur la carte de zonage sismique de l'Algérie (figure 6) [C.G.S, 2003].

Zone 0: sismicité négligeable **Zone I:** sismicité faible

Zone IIa: sismicité moyenne **ZoneIIb:** sismicité moyenne

Zone III: sismicité élevée

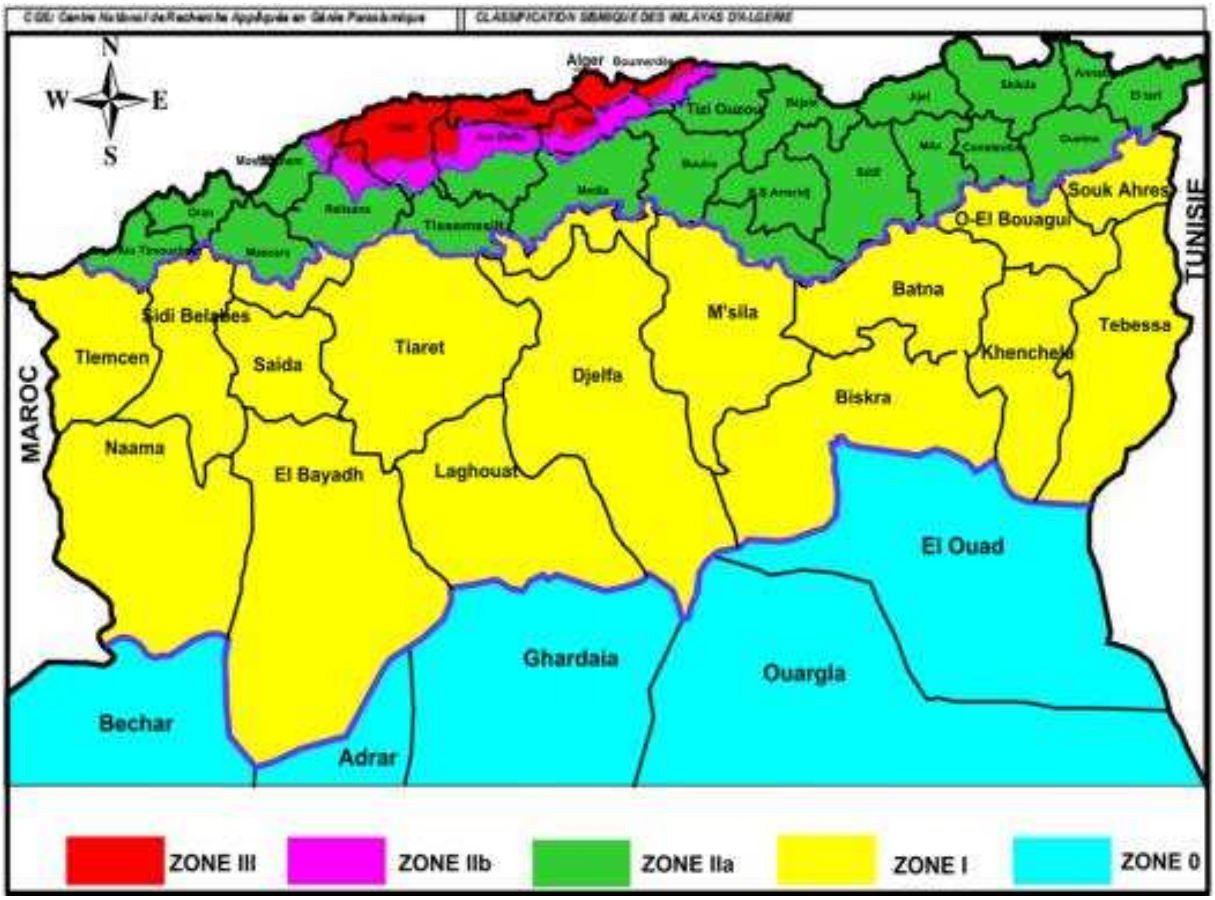


Figure 6: Classification sismique des wilayas d'Algérie [CGS, 2003]

Durant le séisme de 21 Mai 2003, le terminal à Conteneurs du port d'Alger à subit le phénomène de liquéfaction au niveau de l'Ancienne DARSE N°7, et cela a engendré des remontés de sable (environ 200 m^3) (figure 7), induisant un tassement d'environ 60 cm à 80 cm dans cette zone et des déformations au niveau de môle El Hadjar.

Ce problème nécessite le renforcement de ce sol afin d'éviter la résurgence de ce phénomène et faciliter le trafic portuaire. Pour que le port d'Alger répande aux normes internationales et vu l'importance du dispositif qui va être mis en place, notamment les grands portiques sur les quai 30 et 31(figure 8), il est indispensable d'éliminer le risque de liquéfaction en cas d'un séisme.

Il existe plusieurs techniques de renforcement du sol, parmi ces techniques en peut citer le vibro-compactage (vibro-flottation), le jet grouting, et les colonnes ballastées.

Dans notre cas, on va s'intéresser à la technique de renforcement des sols par les colonnes ballastées.

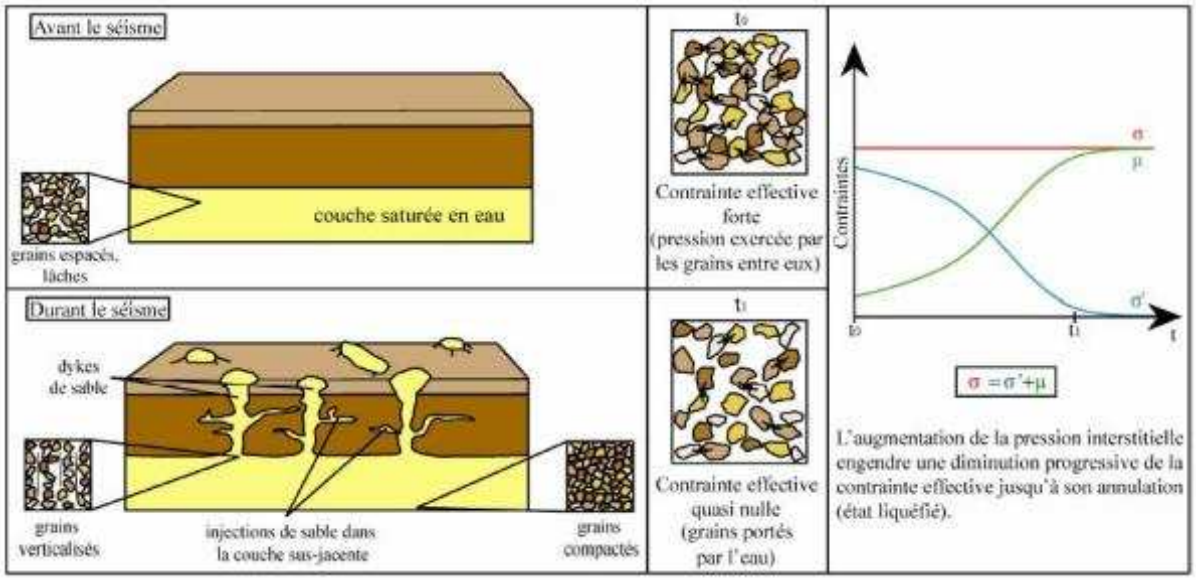


Figure 7: Schéma représentatif du phénomène de liquéfaction

Figure 8: Mise en place des grands portiques des quais

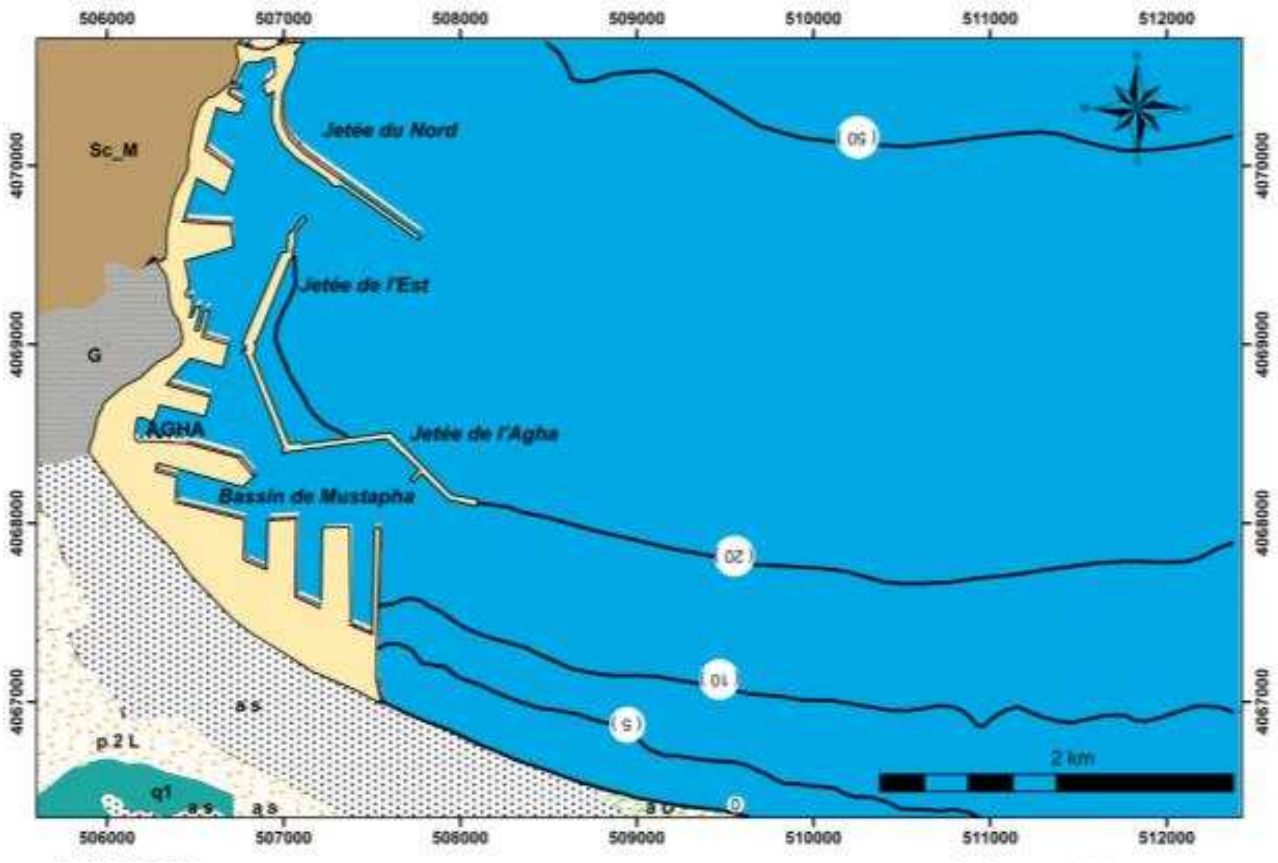
CHAPITRE II : Caractérisation géologique du site d'étude

Introduction

Il est nécessaire d'obtenir des informations sur les couches géologiques du sous-sol, avant la réalisation de n'importe quel projet. En effet, en connaissant la nature du sous-sol et le comportement géotechnique des couches, le dimensionnement des ouvrages pourra se faire correctement.

II.1. Géologie du site d'étude

La carte géologique du port d'Alger (Figure 9), révèle trois formations géologiques dominantes qui sont: le Quaternaire affleure au sud par des dépôts de dunes et de sable rouge. Ainsi que des terrasses marines et des formations de grés avec glauconite de Tertiaire. Alors que les roches métamorphiques du Primaire présentent dans la partie Nord-ouest par les schistes, et dans la partie Ouest par le gneiss.



Légende :

Primaire	Tertiaire	Quaternaire
Sc_M : Schistes en Mica	q1 : Terrasse marine 240-260 m	a D : Dépôts de dunes
G: Gneiss	p2L: Grés avec glouconite	a S: Sable rouge

Figure 9: Lithostrtigraphie de la zone du port d'Alger, extraite de la carte géologique de la Baie d'Alger [JICA, 2006]

II.2. Lithologie du sous-sol du site d'étude

La synthèse des diverses études géologiques, et géotechniques réalisées dans le terminal à conteneurs du port d'Alger, à savoir : la compagne géotechnique effectuée par le LEM en 2006, par EGIS Géotechnique en 2009, le projet JICA, ainsi que les résultats de la campagne geotéchnique complimentaire éffectuée en 2013, nous a permis d'établir la succession lithologique du sous-sol dans notre site d'étude. Sept coupes lithologiques corrélatives ont été ainsi réalisées (Figure 10)

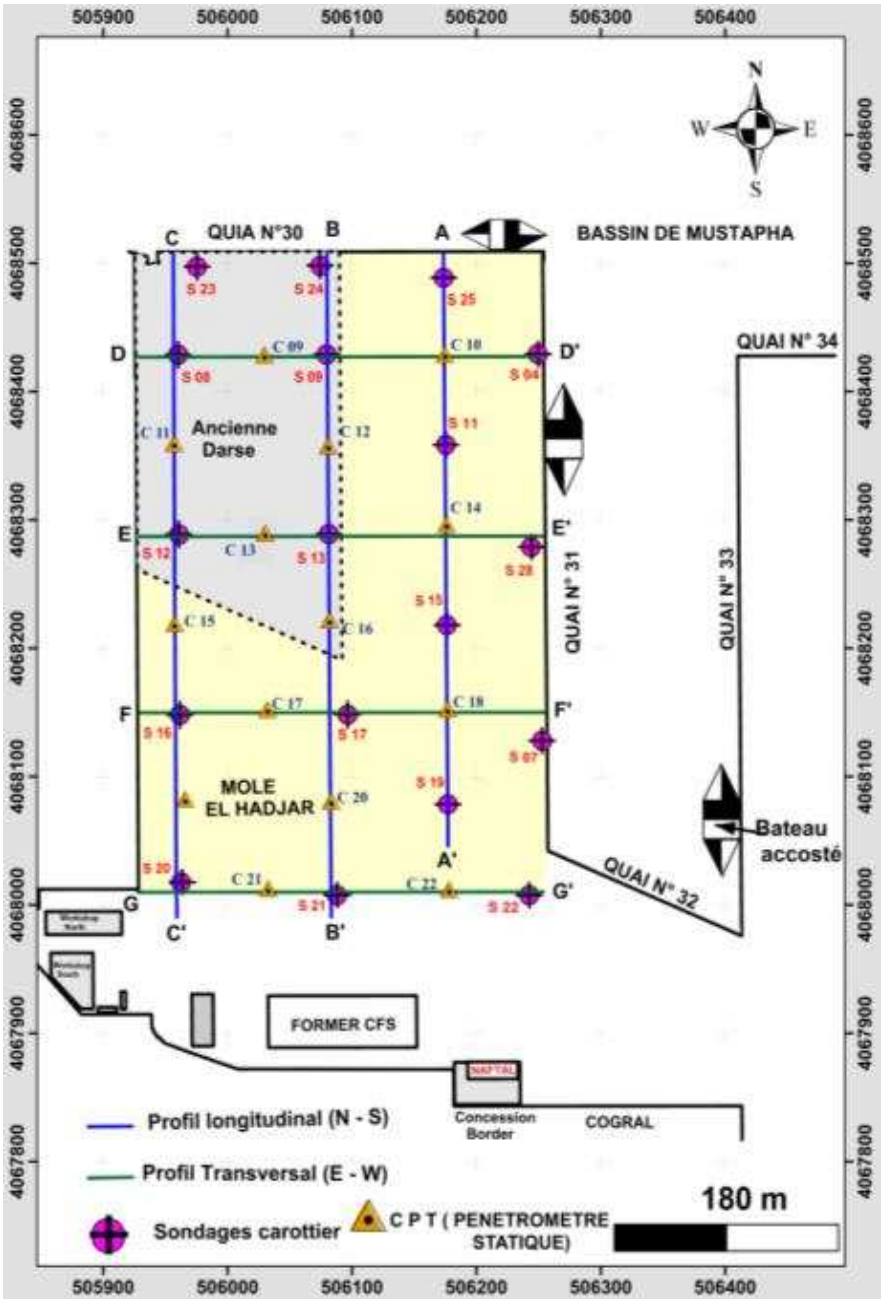


Figure10: Localisation des sondages carottés (cercle rose), les essais au pénétromètre statique (triangle jaune), des coupes N-S (traits bleu), et des coupes E-O (traits vert) dans la zone du TAC

II.2.1. Coupes lithologiques corrélatives Nord-Sud

Trois coupes Nord-Sud ont été réalisées qui sont: coupe AA', coupe BB', et coupe CC' (figure 11, 12,13).

A. Coupe AA'

La corrélation des sondages carottés, Sc11, Sc15, Sc19 (Figure 11), a permis de définir de haut en bas la succession lithologique suivante (Figure 11):

- un remblai homogène, présent sur l'étendue de la coupe, d'une épaisseur qui diminue en allant vers le Sud (14,5m au Nord et 11m au Sud au droit de sondage Sc19).
- une couche de grés se présente le long de la coupe d'une épaisseur moyenne de 2,25 m. Cette dernière est épaisse au centre et mince sur les extrémités Nord et Sud.
- une unité des marnes qui se trouve à une profondeur qui diminue en allant du Nord vers le Sud, son toit se trouve à une profondeur de 16m au Nord et de 12m au Sud.

Notons qu'une nappe d'eau est détectée le long de tout le terminal à 2,5 mètres de profondeur, et cela due au niveau de la mer qui apparait à ce niveau.

B. Coupe BB'

La corrélation des sondages carottés, Sc24, Sc09, Sc13, Sc17, Sc21 (Figure 12), a permis de définir de haut en bas la succession lithologique suivante (Figure 12) :

- un remblai hétérogène, présent sur l'étendue de la coupe, cette couche est épaisse à l'extrémité Nord (environ 15m) et son épaisseur diminue en allant vers le sud (6,5m).
- une fine couche de grés de 1m en moyenne qui se trouve uniquement dans la partie sud.
- une unité des marnes qui se trouve à une profondeur qui diminue en allant du Nord vers le Sud, son toit se trouve à une profondeur de 15,3m au droit de Sondage Sc24 au Nord et au centre, et a 10,5m au droit de Sc21 au Sud.

C. Coupe CC'

La corrélation des sondages carottés, Sc08, Sc12, Sc16, Sc20 (Figure 13), a permis de définir de haut en bas la succession lithologique suivante (Figure 13) :

- un remblai homogène au Nord et hétérogène au Sud, présent sur l'étendue de la coupe, cette couche est épaisse au Nord (12m) et diminue en allant vers le sud (7m).
- une couche de grés de 2,5m au Nord et de 1,3m au centre. Cette couche est absente au Sud.
- une unité des marnes qui possède un toit proche de la surface au Sud par rapport au Nord.

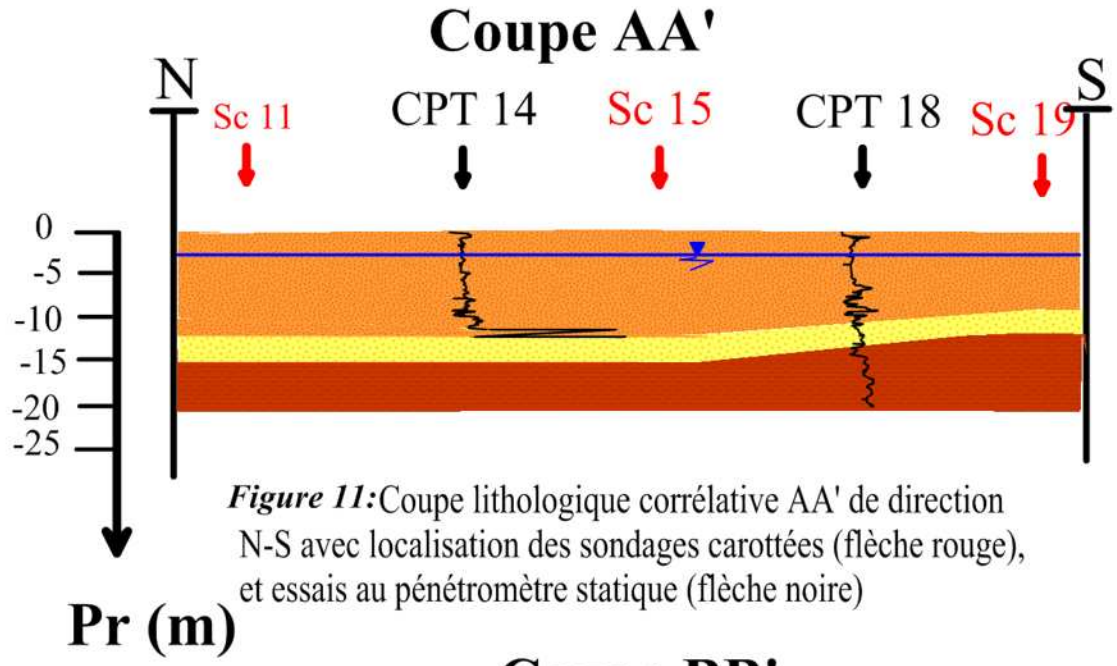


Figure 11: Coupe lithologique corrélative AA' de direction N-S avec localisation des sondages carottées (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)

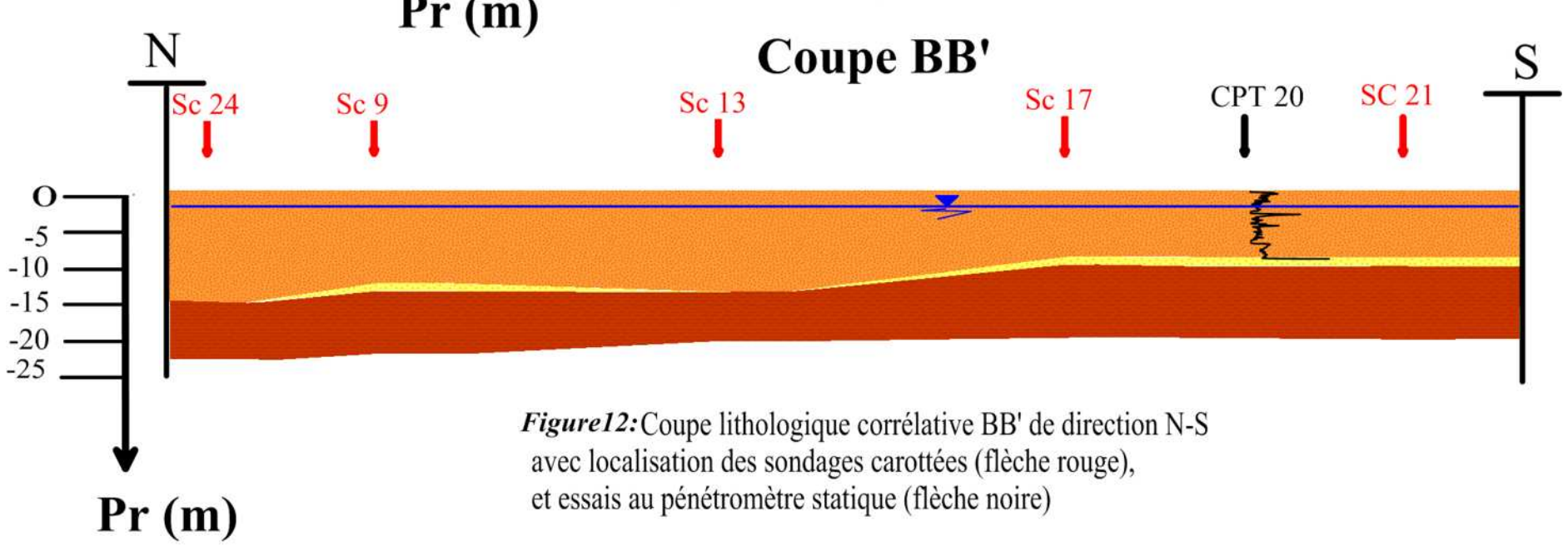


Figure12: Coupe lithologique corrélative BB' de direction N-S avec localisation des sondages carottées (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)

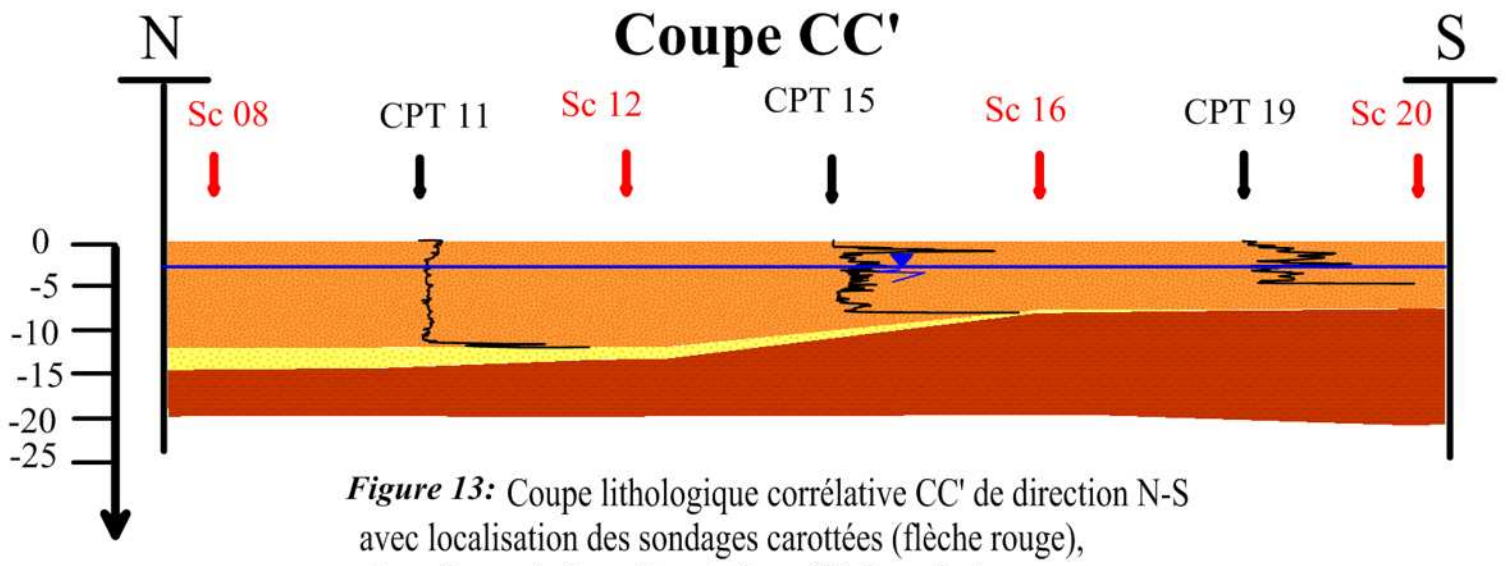
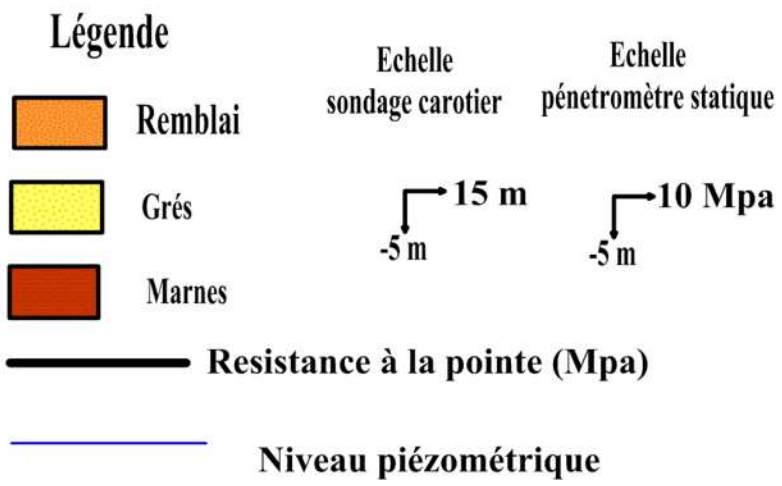


Figure 13: Coupe lithologique corrélative CC' de direction N-S avec localisation des sondages carottées (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)



II.2.2. Coupes lithologiques corrélatives Est-Ouest

Quatre coupes Est-Ouest ont été réalisées qui sont: coupe DD', coupe EE', coupe FF', et coupe GG' (figure 14, 15, 16,17).

A. Coupe DD'

La corrélation des sondages carottés, Sc04, Sc09, Sc08 (Figure 14), a permis de définir de haut en bas la succession lithologique suivante (figure14) :

-un remblai présent sur l'étendue de la coupe, qui est hétérogène à l'Est (remblai de l'Ancienne Darse) et homogène à l'ouest (remblai de môle el Hadjar), d'une épaisseur qui diminue en allant vers le ouest (16m à l'Est et 12m au ouest).

- une couche de grés se présente à l'ouest et au centre d'une épaisseur moyenne de 2m, celle-ci est absente à l'Est

- une unité des marnes qui se trouve à une profondeur qui diminue en allant de l'Est en ouest, son toit se trouve à une profondeur de 17m au droit de Sc04 à l'Est et de 15m au droit de Sc08 en ouest.

B. Coupe EE'

La corrélation des sondages carottés, Sc28, Sc13, Sc12 (Figure 15), a permis de définir de haut en bas la succession lithologique suivante (figure15) :

- un remblai présent sur l'étendue de la coupe, hétérogène à l'Est (remblai de l'ancienne darse) et homogène à l'ouest (remblai de môle El Hadjar), cette couche est épaisse à l'Est (17m) et diminue eu allant vers le Ouest (13m).

- une fine couche de grés de 1 mètre en moyenne dans la partie ouest, et que l'on ne trouve pas au centre et à l'Est.

- une unité des marnes qui se trouve à une profondeur qui diminue en allant de l'Est en ouest.

C. Coupe FF'

La corrélation des sondages carottés, Sc07, Sc17, Sc16 (Figure 16), a permis de définir de haut en bas la succession lithologique suivante (Figure 16) :

- un remblai se présent sur l'étendue de la coupe hétérogène à l'Est (remblai de l'ancienne darse) et homogène au centre et à l'ouest (remblai de Môle El Hadjar), d'une épaisseur qui diminue en allant vers l'Ouest (15m à l'Est et 8m à l'Ouest).

- une couche de grés à l'Ouest et au centre d'une épaisseur moyenne de 2m. Cette couche est absente à l'Est.

-une unité des marnes qui se trouve à une profondeur de 13 m à l'Est et de 8 m en moyenne au centre et à l'Ouest.

D. Coupe GG'

La corrélation des sondages carottés, Sc22, Sc21, Sc20 (Figure 17), a permis de définir de haut en bas la succession lithologique suivante (figure 17) :

- un remblai homogène présent sur l'étendue de la coupe d'une épaisseur qui diminue en allant vers l'Ouest (11,5 m à l'Est et 8,5 m à l'ouest).
- une fine couche de grés au centre d'une épaisseur de 1,5m, et qui est absente à l'Est et à l'ouest.
- une unité des marnes qui se trouve à une profondeur de 15m à l'Est et de 11m à l'Ouest.

Conclusion

Les coupes lithologiques corrélatives fondées sur la base des sondages carottés réalisées dans notre zone d'étude nous informent sur l'existence de trois couches de sol, une couche allochtone et deux autres autochtones.

Le sol allochtone est constitué d'une couche de remblai hétérogène au niveau de l'ancienne darse et homogène au niveau du môle El Hadjar, cette couche apparait le long de tout le terminal, de la surface jusqu'à 15m de profondeur au Nord, et diminue en allant vers le sud (environ 8 m), et diminuer aussi en allant de l'Est vers l'ouest. Dans cette couche apparait une nappe phréatique à environ 2,5m de profondeur.

Le sol autochtone est constitué d'une fine couche de grés d'épaisseur variant entre 1 et 3 mètre, cette couche est quasiment absente à l'Est. Il y'a également une autre unité des marnes proche de la surface au Sud et à l'ouest.

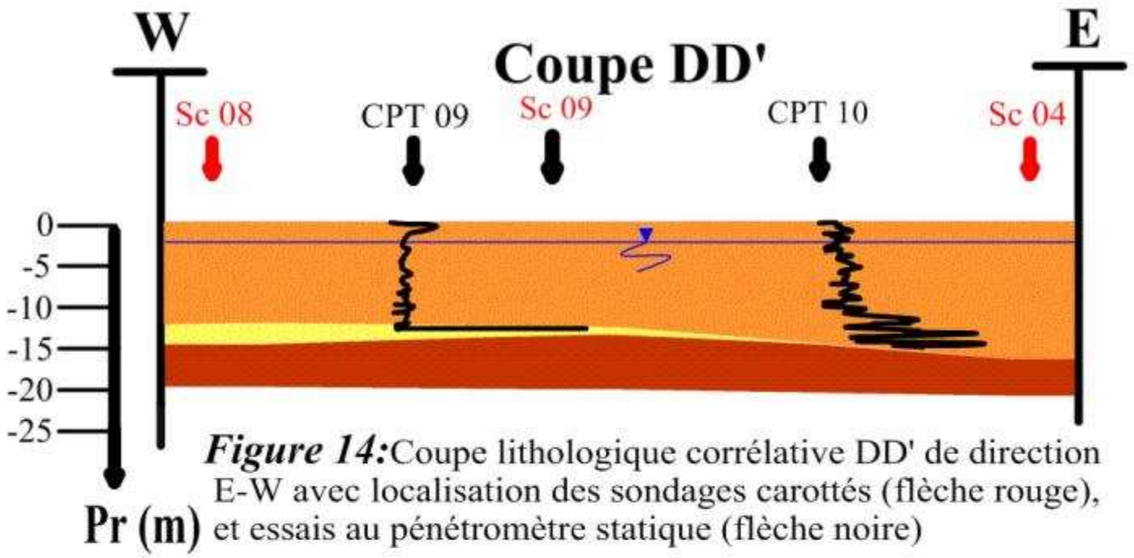


Figure 14: Coupe lithologique corrélative DD' de direction E-W avec localisation des sondages carottés (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)

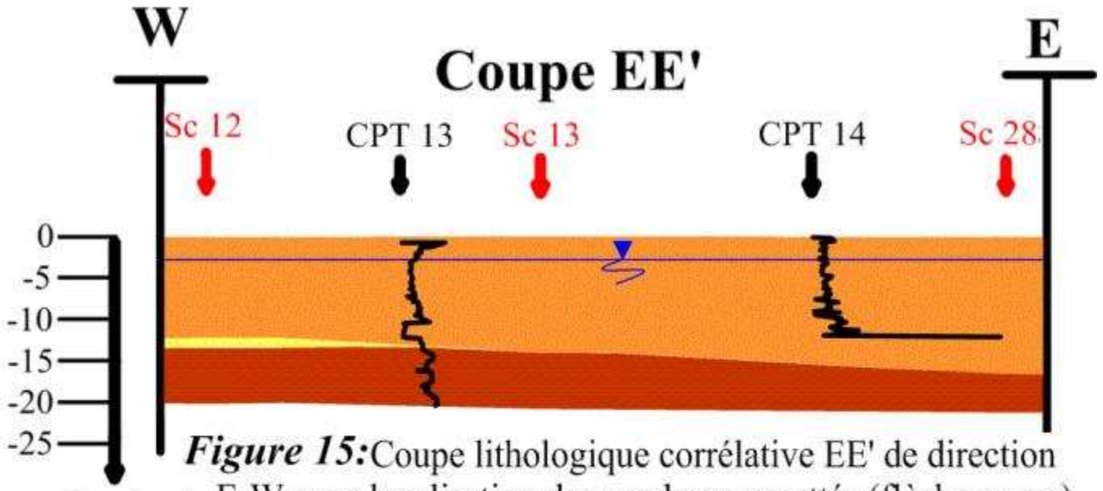


Figure 15: Coupe lithologique corrélative EE' de direction E-W avec localisation des sondages carottés (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)

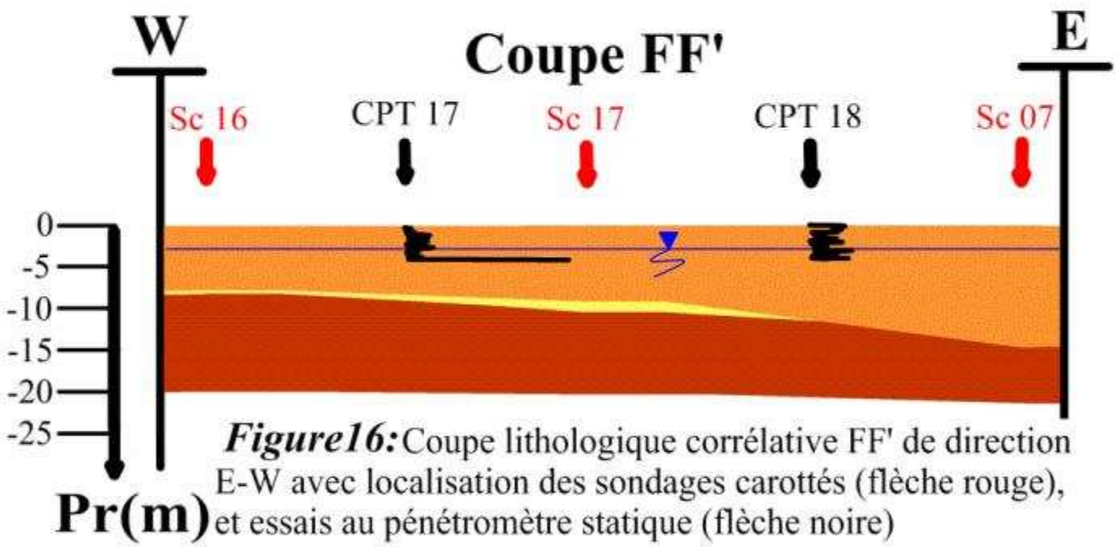


Figure16: Coupe lithologique corrélative FF' de direction E-W avec localisation des sondages carottés (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)

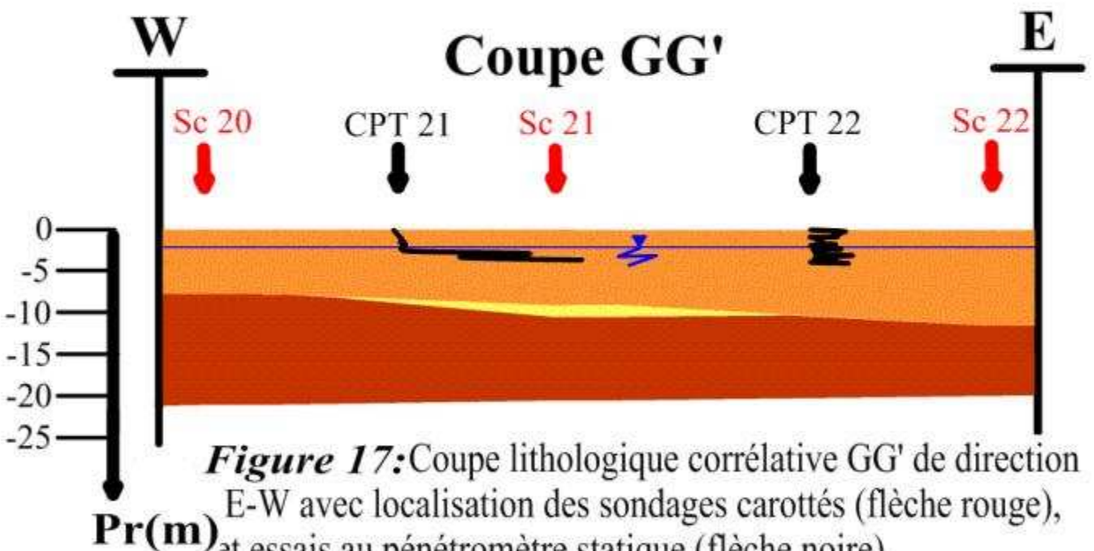
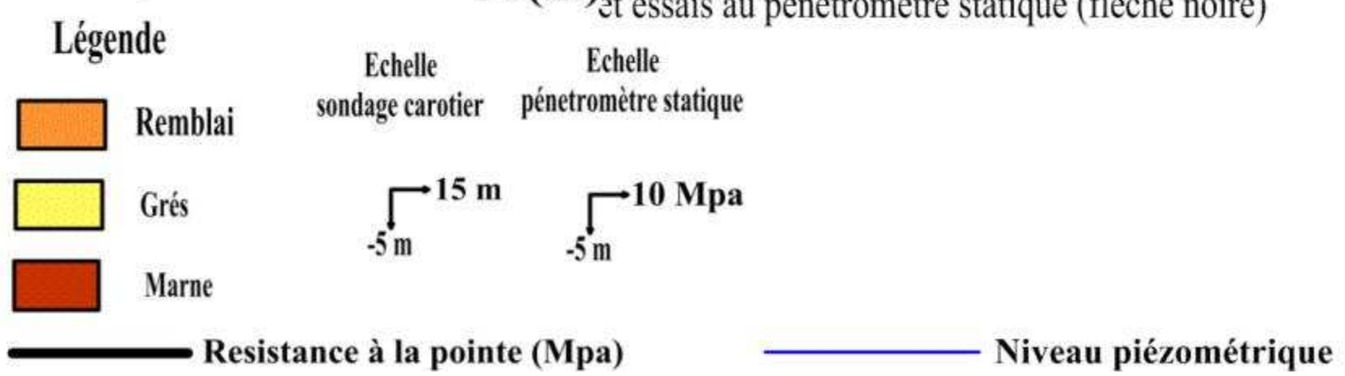


Figure 17: Coupe lithologique corrélative GG' de direction E-W avec localisation des sondages carottés (flèche rouge), et essais au pénétromètre statique (flèche noire)



CHAPITRE III : Caractérisations géotechniques du site d'étude

Introduction

Suite à la réalisation de la campagne géotechnique complémentaire prévue dans la zone du terminal à Conteneurs du port d'Alger, le présent chapitre a pour objet une analyse de tous les résultats obtenus, dans le but de définir les caractéristiques géotechniques de chacune des couches afin de pouvoir, ultérieurement, définir le traitement de consolidation à mener dans cette zone.

Le sol en place est formé par une couche granulaire de sable allochtone, surmontant une couche autochtone cohérente de grés, de marnes et d'argiles. Ces couches forment des strates qui peuvent être considérées uniformes, même si leurs caractéristiques géotechniques montrent une certaine hétérogénéité.

Des essais au laboratoire et des essais in-situ ont été réalisées pour estimer les propriétés géotechniques de ce sol.

III.1. Etude géotechnique du sol allochtone

On distingue deux zones dans le terminal, tel que l'ancienne darse N°7 et môle El Hadjar (figure 18) qui se caractérisent par la présence des remblais différents:

Zone 1:correspond à ce qui était l'ancienne darse N°7, avec des remblais récents.

Zone 2: formée par le reste du terminal, soit le môle d'El-Hadjar.

Les remblais de chacune des zones ont des origines différentes et par conséquent des caractéristiques géotechniques différentes, puisqu'ils ont été construits à des moments différents, c'est pourquoi nous avons jugé l'essentiel de les différentier.

Figure 18: Situation de l'ancienne darse n°7 et Môle El Hadjar dans le Terminal à Conteneurs du port d'Alger

L'ensemble des paramètres géotechniques calculés ont été comparé à la norme AFNOR de 2006 pour caractériser le sol.

III.1.1. Etude géotechnique du remblai de l'ancienne darse N°7

Le remblai de cette zone est formé par des sables lâches argilo-limoneux, carbonatés, avec quelques graviers, ce sol atteint une épaisseur maximale de 15,3 m dans le sondage Sc24 (figure19), et une épaisseur minimale de 12 m dans la prospection Sc12 (voire annexe).

Figure 19 : *Ec*hantillon de sol prélevé au sondage Sc24 entre la surface et 5,2 m de profondeur

III.1.1.1 Essais au laboratoire

Les essais de laboratoire ont été partagés en deux grandes parties, physiques et mécaniques.

III.1.1.1.1. Essais physiques

- La proportion en particules fines (vases et limons) varie d'un minimum de 16% à un maximum de 40% avec une moyenne de 26%, et une proportion maximale en argile de 16%.
- Les neuf échantillons analysés montrent des valeurs au bleu de méthylène (VBS) entre un maximum de 0,5 et un minimum de 0,15 avec une valeur moyenne de 0,33. donc 0,2 < VBS < 2,5; C'est un sol sablo-limoneux peu plastique et sensible à l'eau [AFNOR, 2006].
- pour la granulométrie, les résultats obtenus sur les 30 échantillons analysés nous informe entre les tamis de maille 0,001 mm < Ø < 20 mm (figure 20), et ces échantillons ont été prélevés entre 3 m et 13 m de profondeur.
- On remarque que les granulométries se trouvent dans un fuseau très étroit, ce qui donne une idée de l'homogénéité de la couche [AFNOR, 2006], (figure 20).

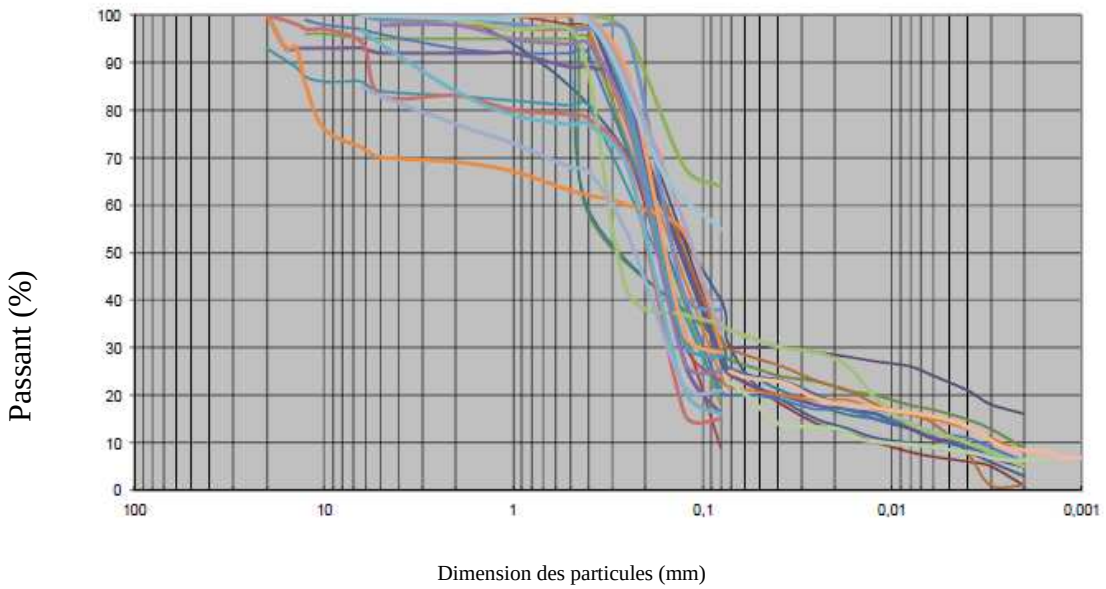


Figure 20: Fuseau granulométrique représentatif du remblai de l'ancienne darse N°7

- La teneur en eau naturelle observée se trouve entre 19,2% et 25% pour les six échantillons analyses, avec une valeur moyenne de 21,8%.
- La masse volumique du sol saturé mesurée oscilla entre 1,96 t/m^3 et 2,1 t/m^{3}pour les 6 échantillons analyses, avec une valeur moyenne de 2 t/m^3. Par contre, la masse volumique sèche présente des valeurs entre 1,55 t/m^3 et 1,81 t/m^3, avec une valeur moyenne de 1,7 t/m^3, est un sol moyennement dense [AFNOR, 2006].
- Le contenu en matière organique de ces sols est faible (< 1,75%).
- La perméabilité des couches granulaires a été estimée avec l'emploi de la formulation de Hazen: k(Hazen) = 100*D_{10}^2 (cm/s) ou D_{10} est la dimension des particules qui correspond à 10% de la courbe granulométrique en cm, la valeur obtenu est:
- D_{10}=0,0035 cm ce qui donne k = 1,22*10^{-5} cm/s. donc est un sol perméable à l'eau [AFNOR, 2006].

III.1.1.1.2. Essais mécanique

Deux types d'essais mécaniques ont été réalisés pour mieux comprendre le comportement de ce remblai.

A. Essais au cisaillement direct

Pour évaluer les propriétés mécaniques de cette couche quatre (4) essais de cisaillement ont été réalisées, et les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 2.

Tableau 2: Résultats des essais de cisaillement direct obtenus pour le remblai de l'ancienne darse

	Maximum	Minimum	Moyenne
C (Kpa)	84,37	40,22	63,52
Φ (°)	28.91	16.82	23,25
σv (Kpa)	140,76	54,33	97,30
τ (Kpa)	139,84	73,84	106,86

Afin de pouvoir comparer ces valeurs, la contrainte tangentielle a été calculée selon le modèle de Mohr-Coulomb (τ (Kpa) = c + σv_* tan φ), à la profondeur à laquelle les échantillons ont été prélevées, avec la nappe phréatique a -2,5 m.

- Les résultats obtenus pour τ sont trop élevées pour la classe du sol analysé (sables argilo limoneux lâches) [AFNOR, 2006], cette élévation s'explique par la présence d'une nappe phréatique à ce niveau (sol engorgé d'eau).

B. Essais œdométriques

Quatre (4) essais œdométriques ont été mènes à terme sur cette couche et les résultats obtenus sont montrés dans le tableau 3.

Tableau 3: Résultats des essais œdométriques obtenus pour le remblai de l'ancienne darse

	Maximum	Minimum	Moyenne
(Cc)	0,1	0,03	0,07
(Cg)	0,007	0,003	0,005

- D'après les résultats obtenus nous pouvons constater une grande disparité entre les valeurs de l'indice de compression Cc obtenus, ce qui révèle un sol peu compressible riche en fraction limoneuse [AFNOR, 2006].
- On remarque aussi que l'indice de gonflement Cg est spécialement bas dans cette strate (quasiment nulle), cela nous permet de dire que ce sol est non gonflant [AFNOR, 2006].

III.1.1.2. Essais in situ

Trois types d'essai in situ ont été réalisés sur cette couche de sol, à savoir :

A. Essais de pénétration SPT

Des essais de pénétration au carottier SPT ont été réalisés dans l'ancienne darse N°7 au droit des sondages carottier chaque 3 m de profondeur.

- Les résultats obtenus montrent des valeurs de l'indices de pénétration SPT assez homogènes (minimum 5coups, maximum 40 coups, avec une moyenne de 10 coups).

- Cela veut dire que notre sol est un sol sablo-limoneux argileux lâche avec apparition de gravier et cailloux [AFNOR, 2006].

B. Essais pressiomètriques

Quatre essais pressiomètriques ont été menés à terme dans cette couche, les résultats obtenus sont mentionnées dans le tableau 4.

Tableau 4: Résultats des essais pressiomètriques obtenus pour le remblai de l'ancienne darse

	Maximum	Minimum	Moyenne
Pl (Mpa)	0,91	0,07	0,4
E (Mpa)	5	0,72	2,75
E/Pl	5	10,28	6,88

- Les résultats obtenu pour la pression limite (Pl), le module d'élasticité (E), et le rapport E/PI, révèle un sol sableux argileux limoneux sous consolidé et peut plastique [AFNOR, 2006].

C. Essais au pénétromètre statique CPTu

Trois essais CPTu ont été réalisés dans les terre-pleins de surface jusqu'à 12 m de profondeur.

- Les résultats obtenus présentent un maximum de résistance à la pointe de 10 Mpa, et un minimum de 1 Mpa, et une valeur moyenne de l'ordre de 4 Mpa. Ces valeurs montrent que cette couche est de faible résistance (sol lâche) [AFNOR, 2006].

III.1.2. Etude géotechnique de remblai de môle El- Hadjar

Le remblai de cette zone est formé par des sables vaseux lâches, carbonatés, graveleux, avec présence des cailloux, ce sol atteint une épaisseur maximale de 16,7 m au droit de sondage Sc11 et une épaisseur minimale de 7,5 m au droit de sondage Sc16 (annexe 4). Les figures suivantes montrent quelques échantillons du sol prélevés au niveau de môle El-Hadjar.

Figure 21 : Echantillons du sol prélevés au sondage Sc11 entre 5,4 m et 11,4 m de profondeur

Figure 22: Echantillons du sol prélevés au sondage Sc16 entre la surface et 5,4 m de profondeur

III.1.2.1 Essais au laboratoire

III.1.2.1.1. Essais physiques

- La proportion en particules fines varie entre 9% et 43% avec une moyenne de 19,3%
- Les vingt-un échantillons analysés montrent des valeurs au bleu de méthylène (VBS) entre un maximum de 1,24 et un minimum de 0,22 avec une valeur moyenne de 0,42. donc 0,2 < VBS < 2,5; C'est un sol limoneux-vaseux sensible à l'eau [AFNOR, 2006].
- pour la granulométrie, les résultats obtenus sur les 35 échantillons analysés nous informent entre les tamis de maille 0,002 mm < Ø< 25 mm (figure 23). Ces échantillons ont été prélevés entre 1,8 m et 15 m de profondeur.

Dans le graphique des granulométries, deux groupes peuvent se distinguer, un groupe qui englobe la plupart des échantillons, dans lesquels les granulométries sont dans un fuseau relativement étroit, ce qui dénote l'homogénéité de la couche, ainsi qu'un deuxième groupe contenant un pourcentage considérable de graviers et de cailloux (22% à 49%) [AFNOR, 2006]. Ces échantillons se trouvent entre 3 et 6,4 mètre de profondeur, et les résultats obtenus sont mentionné dans la figure 23.

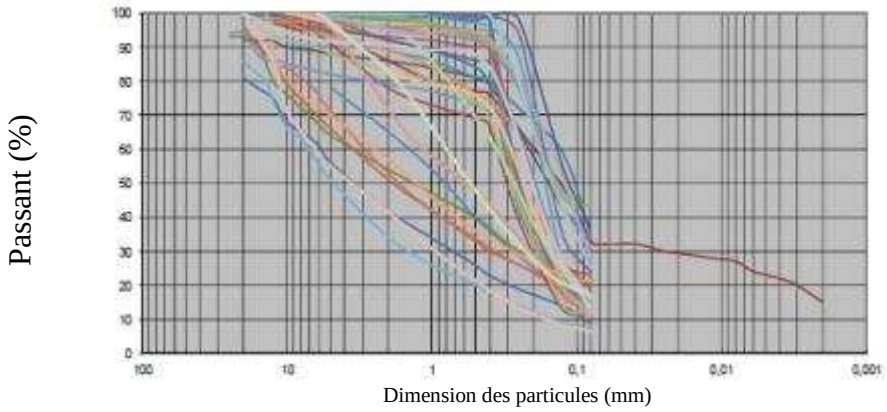


Figure 23 : Fuseau granulométrique représentatif de remblai de môle El-Hadjar

- La teneur en eau naturelle observée se trouve entre 9% et 19,9% pour les huit échantillons analyses, avec une valeur moyenne de 14,2%, ce qui révèle un sol non plastique [AFNOR, 2006].
- La masse volumique saturée mesurée oscilla entre 1,83 t/m^3 et 2,12 t/m^3 pour les huit échantillons analyses, avec une valeur moyenne de 2 t/m^3. Par contre la masse volumique sèche présente des valeurs entre 1,63 t/m^3 et 1,83 t/m^3, avec une valeur moyenne de 1,8 t/m^3, révèle un sol moyennement dense [AFNOR, 2006].
- La teneur en matière organique n'est pas significative dans cette strate (< 1,52%) donc est un sol inorganique [AFNOR, 2006].
- Les analyses granulométriques effectuées dans cette couche ne permettent pas d'identifier son D_{10}, mais ce sol est constitué de sable et de gravier, avec un taux de fraction fine très important, donc en prend: k = 10^{-6} m/s, (sol peu perméable) [AFNOR, 2006].

III.1.2.1.2. Essais mécaniques

Deux types d'essais mécaniques ont été réalisés pour mieux comprendre le comportement du sol de môle El-Hadjar.

A. Essais au cisaillement direct

Pour évaluer les propriétés mécaniques de cette zone un total de huit (8) essais au cisaillement direct a été réalisé, et les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 5

Tableau 5: Résultats des essais de cisaillement direct obtenus pour le remblai du môle El Hadjar

	Maximum	Minimum	Moyenne
C (Kpa)	65,73	22,56	39,12
Φ (°)	39,47	28,63	34,33
σv (Kpa)	137,67	58,73	91,19
τ (Kpa)	131,99	63,86	100,88

On observe une grande disparité des résultats car le sol étudier n'a pas les mêmes caractéristiques géotechniques, et présent un comportement d'une résistance moyenne [AFNOR, 2006].

B. Essais œdométriques

Trois (3) essais œdométriques ont été menés à terme sur cette couche et les résultats obtenus sont montrés dans le tableau 6.

Tableau 6: Résultats des essais œdométriques obtenus pour le remblai du môle El Hadjar

	Maximum	Minimum	Moyenne
Cc	0,08	0,04	0,06
Cg	0,004	0,003	0,0033

- D'après les résultats obtenus nous pouvons constater que les valeurs de l'indice de compression Cc sont proches, ceci peut nous confirment que ce sol est homogène et peu compressible [AFNOR, 2006].
- On remarque aussi que l'indice de gonflement Cg est spécialement bas dans cette strate (quasiment nul), cela nous permet de dire que ce sol est non gonflant [AFNOR, 2006].

III.1.2.2. Essais in situ

Trois types d'essais in situ ont été réalisés dans cette couche de sol.

A. Essais de pénétration SPT

Des essais de pénétration au carottier SPT ont été réalisés dans môle El Hadjar au droit des sondages carottiers, chaque 3 m de profondeur.

Les résultats obtenus montrent des valeurs de l'indice de pénétration SPT assez dispersées varié entre 5 et 40 coups (annexe 7). Cette disparité est due à l'existence de couches de graviers et cailloux, présentes dans le sol en profondeur et latéralement [AFNOR, 2006].

Plus de 40% des essais présents des valeurs moyennes entre 10 coups et 15 coups, nous proposons d'adopter cette valeur comme caractéristique de la couche de sol étudié.

B. Essais pressiomètriques

Plusieurs essais pressiomètriques ont été menés à terme dans cette couche, les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 7.

Tableau 7: Résultats d'essais pressiomètriques obtenus pour le remblai du môle El Hadjar

	Maximum	Minimum	Moyenne
Pl (Mpa)	0,63	0,07	0,28
E (Mpa)	16,2	0,81	5
E/Pl	25,71	11,57	17,85

On remarque que les valeurs pour le module pressiométrique (E) et de la pression limite (Pl) révèlent un sol peu plastique. Par contre les valeurs obtenues pour le rapport E/PI semble très élevée par rapport à la classe de sol analysé, est un sol vassaux limoneux parfois caillouteux sous consolider) [AFNOR, 2006].

C. Essais au pénétromètre statique CPTu

Deuze essais CPTu ont été réalisés dans le môle El-Hadjar de surface jusqu'à 15 m de profondeur.

Les résultats obtenus montrent une grande hétérogénéité, présentent un maximum de résistance à la pointe de 40 Mpa, et un minimum de 0,5 Mpa, avec une valeur moyenne de l'ordre de 4 Mpa. Ces valeurs montrent dans l'ensemble que cette couche du sol est de faible résistance (sol vaseux limoneux lâche parfois graveleux caillouteux) [AFNOR, 2006].

III.2. Etude géotechnique du sol Autochtone

III.2.1. Etude géotechnique des grés

Les grès forment une couche qui se présentent avec différents degrés de fracturation sous la couche de remblai, ou intercalée dans celle-ci (passages gréseux très fracturés). Cette couche est absente dans la plus part des sondages carottés et particulièrement dans la partie Est du terminal d'après les coupes lithologiques. La couche de grès présente une épaisseur maximale de 2,5 m au droit de sondage Sc08 (annexe 4) figure 24.

Figure 24 : Echantillons du sol prélevés au sondage Sc08 entre 11,5 m et 14,6 m de profondeur

III.2.1.1. Essai au laboratoire

III.2.1.1.1.Essai mécanique

A. Essais de compression uniaxiale

On dispose de deux (2) essais de compression uniaxiale pour caractériser cette strate, les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 8.

Tableau 8:Résultats des essais de compression uniaxiale obtenus pour les grès autochtones

	Maximum	Minimum	Moyenne
Rc (Kpa)	9,412	7,890	8.651
C_u (Kpa)	4,706	3,945	4.325

Ces valeurs de résistance à la compression uniaxiale (Rc) et la cohésion non drainé (Cu) montre que ce grès est non plastique [AFNOR, 2006].

III.2.2. Etude géotechnique des marnes

C'est un niveau qui apparait le long de tout le terminal, sous le niveau de sables ou du passage gréseux, en cas d'existence de celui-ci. Il s'agit d'une couche cohésive dans laquelle se trouve de l'argile et de marnes. Cette couche se trouve à une profondeur minimale de 7,65m au droit de sondage Sc20 (annexe 4), et la figure 25 présente quelques échantillons du sol prélevés au sondage Sc20.

Figure 25 : Echantillons du sol prélevés au sondage Sc20 à partir de 6,8 m de profondeur

III.2.2.1. Essais au laboratoire

III.2.2.1.1. Essais physique

- Les trois échantillons analysés montrent des valeurs au bleu de méthylène (VBS) entre un maximum de 4,25 et un minimum de 3,25 avec une valeur moyenne de 3,66. donc 2,5 < VBS < 10, C'est un sol limoneux-argileux [AFNOR, 2006].

  Les résultats granulométriques obtenus sur les 53 échantillons analysés nous informent entre les tamis de maille 0,001mm < Ø < 25mm (figure 26). Ces échantillons ont été prélevés entre 10m et 20,2m de profondeur.

On remarque que la plupart des courbes granulométriques se trouvent dans un fuseau relativement étroit (figure 26), correspond à des argiles et marnes de plasticité moyenne a élevée. Les courbes qui diffèrent du reste correspondent à des échantillons sableux [AFNOR, 2006], (figure 26).

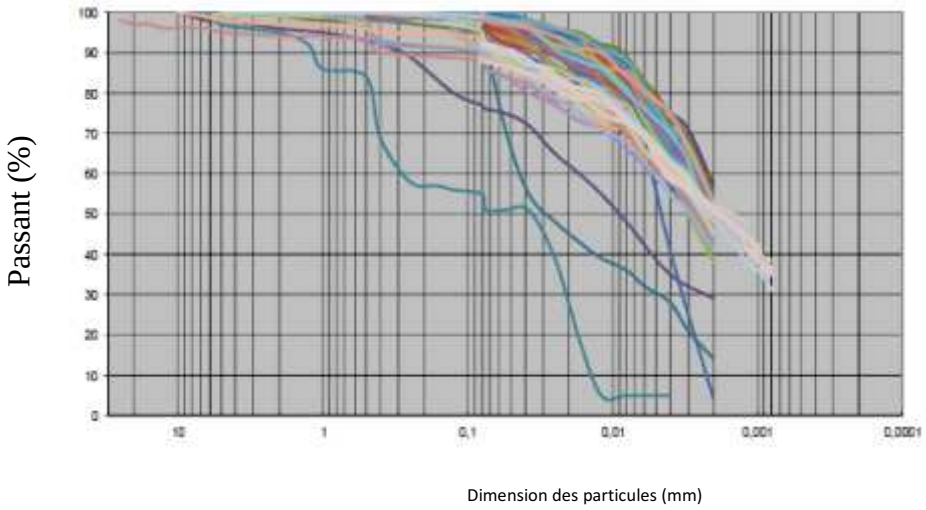


Figure 26: Fuseau granulométrique représentatif des marnes de terminal à conteneurs du port d'Alger

- La teneur en eau naturelle observée se trouve entre un minimum de 21% et un maximum de 28% avec une valeur moyenne de 25% pour les quatre (4) échantillons analyses. Elle se trouve éloignée de la limite de liquidité [AFNOR, 2006].
- La masse volumique du sol saturé mesurée oscilla entre 1,93 t/m^3 et 2,02 t/m^3 pour les huit (8) échantillons analyses, avec une valeur moyenne de 2 t/m^3. Par contre la masse volumique sèche oscilla entre 1,49 t/m^3 et 1,65 t/m^3, avec une valeur moyenne de 1,6 t/m^3, ce sol est de faible densité [AFNOR, 2006].
- Concernant l'indice de plasticité (Ip), les échantillons analysés montrent une valeur moyenne de 26,9%. Ce sol est de forte plasticité [AFNOR, 2006].
- Concernant la limite de liquidité (Wl), les échantillons analysés montrent une valeur moyenne de 48,9%.

III.2.2.1.2. Essais mécaniques

Trois types d'essais mécaniques ont été réalisés pour mieux comprendre le comportement de ces marnes.

A. Essais à l'appareil triaxial de révolution

- **Essais consolidés non drainés**

Pour évaluer les propriétés mécaniques effectives de cette couche six (6) essais consolides non draines (CU) ont été réalisés par l'appareil triaxial de révolution, et les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 9.

Tableau 9: Résultats des essais triaxiaux consolidés non drainés obtenus pour les marnes

	Maximum	Minimum	Moyenne
C (Kpa)	60,82	11,77	35
Φ (°)	31,27	17	26
σv (Kpa)	200,14	138,83	169,5
τ (Kpa)	174,52	75,14	119

Afin de pouvoir comparer les valeurs, la contrainte tangentielle a été calculée selon le modèle de Mohr-Coulomb (τ (Kpa) = c + σv * tan φ') avec C=35 Kpa et Φ =26° (τ=119). Ces valeurs expliquent la rigidité de ces marnes [AFNOR, 2006].

- **Essais non consolidés non drainés**

Un total de sept (7) essais de type non consolidé non drainées (UU) a été mené à terme par l'appareil triaxial de révolution, et les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 10.

Tableau 10: Résultats d'essais triaxiaux non consolidés non drainés obtenus sur les échantillons marneux

	Maximum	Minimum	Moyenne
Cu (Kpa)	1040,84	76,52	345
Φ u (°)	30,99	2,95	16,55

Les résultats obtenus concernant la cohésion non drainé montre que se sol est de plasticité élevée, et l'angle de frottement obtenu montre que se sol est moyennement résistant [AFNOR, 2006].

B. Essais de compression uniaxiale

Six essais de compression uniaxiale ont été réalisés sur cette couche, et les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 11.

Tableau 11: Résultats d'essais de compression uniaxiale obtenus pour les marnes

	Maximum	Minimum	Moyenne
Rc (Kpa)	1170	540	760
Cu(Kpa)	585	270	379,75

Les résultats obtenus pour la résistance à la compression uniaxiale (Rc) et la cohésion non drainé (Cu) montrent que ce sol est de plasticité élevée [AFNOR, 2006].

C. Essais œdométriques

Dix (10) essais œdométriques ont été menés à terme sur cette couche, pour analyser la déformabilité de ces sols, et les résultats obtenus sont montrés dans le tableau 12.

Tableau 12: Résultats d'essais œdométriques obtenus sur des échantillons marneux

	Maximum	Minimum	Moyenne
Cc	0,14	0,07	0,10
Cg	0,04	0,02	0,03

- D'après les résultats obtenus nous pouvons constater une disparité entre les valeurs de l'indice de compression Cc qui sont dans l'ensemble, faibles. Le sol est donc peu compressible [AFNOR, 2006].
- On remarque aussi que l'indice de gonflement Cg est bas dans cette strate, cela nous permet de dire que ce sol est non gonflant à peu gonflant [AFNOR, 2006].

III.2.2.2. Essais in situ

A. Essais a la pénétration SPT

Des essais de pénétration au carottier SPT ont été réalisés dans la couche des marnes au droit des sondages carottiers chaque 3 mètres de profondeur.

Les résultats obtenus montrent des valeurs de l'indice de pénétration SPT assez homogènes, (25 à 30 coups), une valeur moyenne de 28 coups peut être adoptée pour cette couche de sol. Ces résultats permettent de conclure qu'il s'agit d'un sol moyennement compact [AFNOR, 2006].

B. Essais pressiomètriques

- **Paramètres non drainés**

Onze essais pressiomètriques ont été menés à terme dans cette unité, les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 13.

Tableau 13: Résultats d'essais pressiomètriques non drainés obtenus pour les marnes

	Maximum	Minimum	Moyenne
Cu (Kpa)	524,48	214,16	353,01
E (Mpa)	62,90	7,44	37,91
Pl (Mpa)	5,18	2,04	3,45
E/Pl	12,42	3,64	10,98

On remarque que les valeurs du module d'élasticité (E) et de la pression limite (Pl) sont élevées dans ces marnes, donc ce sol est non déformable. Ainsi les résultats obtenus pour le rapport E/Pl révèle un sol normalement consolidé de plasticité élevée [AFNOR, 2006].

- **Paramètres drainés**

Onze essais pressiomètriques ont été mènes à terme dans cette unité, les résultats obtenus pour le module d'élasticité (E) montre un maximum de 63,68 Mpa et un minimum 7,53 Mpa avec une valeur moyenne de 38,38Mpa. Ces valeurs semblent toujours élevées, cela nous confirme que ces marnes sont non déformables [AFNOR, 2006].

C. Essais au pénétromètre statique CPTu

Trois essais CPTu ont été réalisés pour évaluer le comportement de la couche des marnes et ce jusqu'à 20m de profondeur. Les résultats obtenus indiquent que la résistance à la pointe est relativement constante dans cette couche, avec des valeurs comprises entre 1 Mpa et 10 Mpa, avec une valeur moyenne de 7 Mpa. Ces valeurs montrent dans l'ensemble que cette couche du sol est de faible résistance [AFNOR, 2006].

Conclusion

Le terminal à conteneurs du port d'Alger est constitué de deux types de sol différent, allochtone et autochtone.

Le sol allochtone est formé de remblai hétérogène au niveau de l'ancienne darse N°7 et des remblais homogènes au niveau du môle El-Hadjar. L'épaisseur de ces remblais varie entre 7,6m et 16,2m.

L'analyse des propriétés géotechniques de ces remblais montre qu'il s'agit d'une couche hétérogène, lâche, déformable et de faible compacité. Ce type de sol est déconseillé pour la construction.

Le sol autochtone est formé d'une couche de grès et d'une unité des marnes.

Les grés se présentent sous forme d'une couche fine fracturée sous la couche de remblai. Son épaisseur varie entre 0,2 m et 2,5 m. Cette couche est absente dans la plupart des sondages carottées et particulièrement dans la partie Est du terminal.

Les marnes se trouvent au-dessous de la couche de remblai ou de gré en cas d'existence de celle-ci, ce sol est proche de la surface dans certain endroit (à 7,65 m dans le sondage Sc20, voir coupe lithologique CC' figure 1 3), et parfois loin de la surface (à 16,4 m dans le sondage Sc11 voir coupe lithologique AA' figure 11).

L'analyse des propriétés géotechniques des couches du sol autochtone montrent qu'il s'agit d'un terrain homogène, dur et non déformable. Ce type de sol est favorable pour la construction.

CHAPITRE IV :

Renforcement du sol de la zone d'étude par colonnes ballastées

Introduction

Les résultats de la campagne géotechnique menée dans les terre-pleins du terminal à conteneurs du port d'Alger, ont révélé l'existence d'un niveau supérieur compressible de sables limoneux, le long et large de tout le terminal, lequel présente des problèmes de liquéfaction, ainsi que des tassements prévisibles inadmissibles. Ce fait indique la nécessité d'un traitement pour améliorer les sols formants les terre-pleins du terminal, afin de réduire et d'accélérer les tassements prévisibles lors de l'application d'une surcharge opérationnelle de 55 kN/m^2, à des valeurs maximales de 5cm en 20 ans, ainsi que l'élimination du potentiel de liquéfaction en cas d'un séisme.

IV.1.1. Définition des colonnes ballastées

Les colonnes ballastées constituent une méthode de renforcement des sols par l'incorporation de colonnes de graviers compactés dans le sol. Ce procède convient à des sols argileux ou limoneux contenant plus de 10% à 15% de limons et d'argiles.

Les colonnes ballastées ne constituent en rien des éléments de fondation. Leur but est de conférer au sol de nouvelles caractéristiques, générales ou locales sous l'ouvrage à construire, afin que les différents éléments d'infrastructures (semelles isolées ou filantes, radiers, dallages, ouvrages en terre,…) aient un comportement prévisible, justifiable et compatible avec les règlements et tolérances s'appliquant à la structure de l'ouvrage et à son exploitation. Elles permettent la maitrise du comportement des fondations superficielles du futur ouvrage. Le matériau de la colonne ballastée est un matériau pulvérulent de forte portance, la colonne constitue donc un drain et permet en plus de l'augmentation de la capacité portante du sol, l'augmentation de la vitesse de consolidation de ce dernier. Elles peuvent être réalisées en maillage régulier ou variable, en lignes ou en groupes ou même de manière isolées.

IV.1.2.Domaines d'application

Les colonnes ballastées peuvent être utilisées pour le renforcement des sols fins à médiocre tel que le sable-limoneux, les limons, l'argile, le remblai hétérogènes,...etc [Zighmi, 2012], (figure 27). Leurs épaisseurs usuelle comprises entre 2 m et 20 m tandis que leurs diamètres dépendant de la résistance mécanique visée, est compris entre 0,6 m et 1,2m [Romain Auvray, 2010].

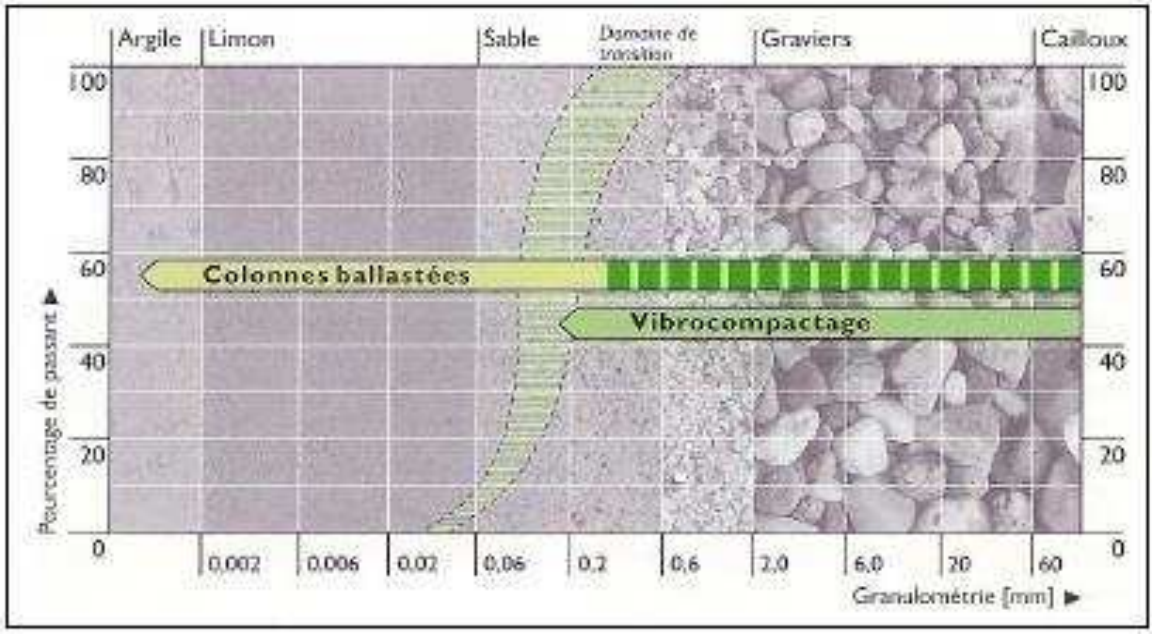


Figure 27: Types de sols à améliorer par colonnes ballastées [Document de Keller[R]in Zighmi, 2012]

IV.1.3. Objectif des colonnes ballastées

L'amélioration de sol par colonnes ballastées consiste à mettre en œuvre un «maillage » de colonnes constituées de matériaux graveleux, amenant une densification des couches compressibles et les rendant aptes à reprendre des charges issues de fondations. Le traitement de sol par colonnes ballastées conjugue les actions suivantes :

- Augmenter la capacité portante du sol.
- Diminuer les tassements totaux et différentiels.
- Diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant.
- Diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des séismes [DHOUIB et BLONDEAU, 2005].
- Homogénéisation des caractéristiques géotechniques du sol.
- Augmentation des caractéristiques équivalentes du massif de sol traité (la résistance au cisaillement horizontal, l'angle de frottement interne et les paramètres de déformation). [AGUADO et al, 2011].

IV.1.4.Maillage des colonnes ballastées

En général, les colonnes ballastées sont disposées suivant un réseau régulier. Il y a trois arrangements possibles représentés suivant un:

- Maillage Triangulaire équilatéral.
- Maillage carré.
- Maillage hexagonale.

Dans notre cas le maillage hexagonal sera utilisé, (l'implantation des colonnes est triangulaire, et la surface traité par chaque colonne elle est hexagonale) (figure 28).

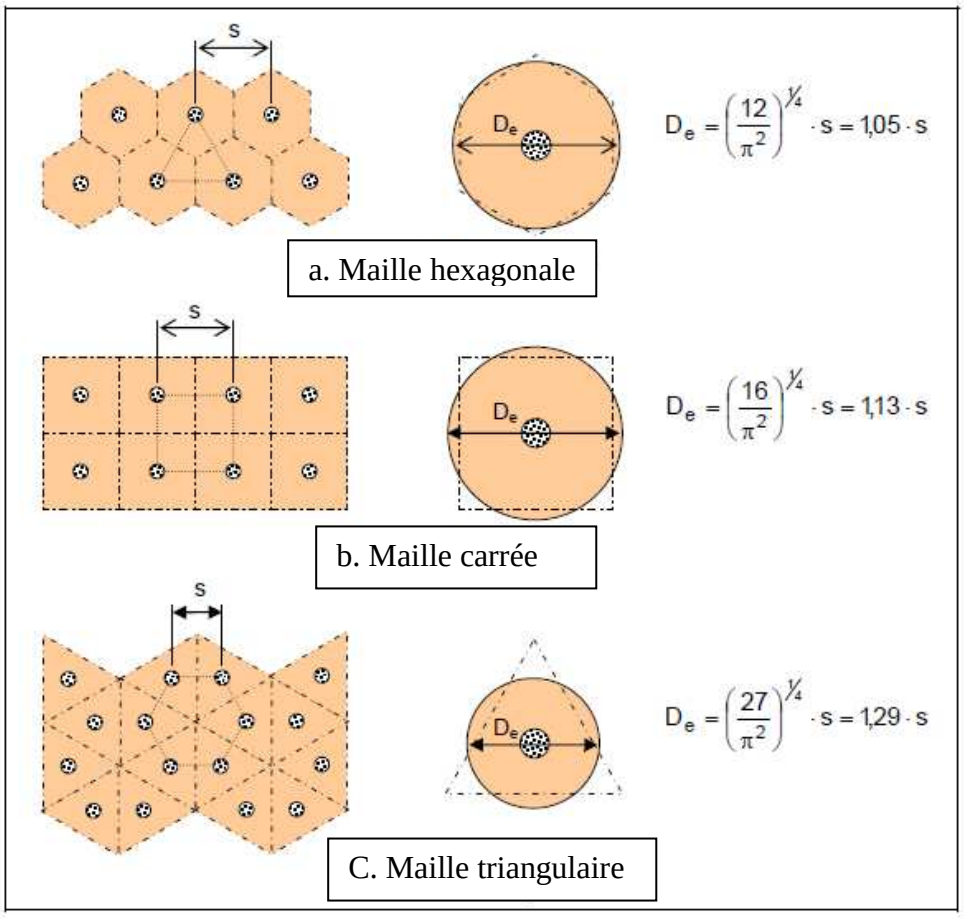


Figure 28: Domaine d'influence pour l'étude des réseaux de colonnes ballastées [Vincent Six, 2006]

IV.1.5. Techniques de mise en œuvre

Les colonnes ballastées peuvent être mises en œuvre selon trois procédés :

- par voie humide.
- par voie sèche.
- par pilonnage.

La technique de mise en œuvre a utilisée dans notre cas est celle de colonnes ballastées à voie humide.

IV.1.5.1. Mode opératoire des colonnes ballastées par voie humide

Le mode d'exécution des colonnes ballastées par voie humide est presque le même que par voie sèche, sauf qu'on utilise l'eau comme fluide de lançage est que le ballaste n'est pas introduit à l'intérieur du vibreur, mais dans le vide annulaire entre le vibreur et le trou formé ce qui permet d'utiliser des agrégats de diamètre plus grand. On peut citer les étapes d'exécution suivantes:

A. Préparation

Le vibreur est amené à la verticale du point centrale de la colonne implanté, dès le démarrage du moteur, le vibreur est descendu lentement.

B. Fonçage

Des le début de l'opération, le sol est saturé en eau et les vibrations de l'outil génèrent un phénomène de liquéfaction du sol. Le vibreur, descend dans le sol sous l'effet des vibrations et de son propre poids. La vitesse de descente est variable d'un sol à l'autre, relativement rapide dans les sols sableux et limoneux par rapport aux terrains argileux ou vaseux.

C. Remplissage

Lorsque la profondeur de traitement requise est atteinte, on remonte progressivement le vibreur pour bien nettoyer l'espace annulaire.

Les matériaux d'apport sont alors introduits dans le trou à l'aide d'un chargeur, ou pendant que l'alimentation permanente en eau assure que les matériaux atteignent bien la base du vibreur, et que les particules fines du sol en place soient bien évacuées hors du trou.

D. Compactage

En remontant et descendant le vibreur, le ballaste est expansé et compacté dans le sol en place pour former la colonne ballastée, (figure 29).

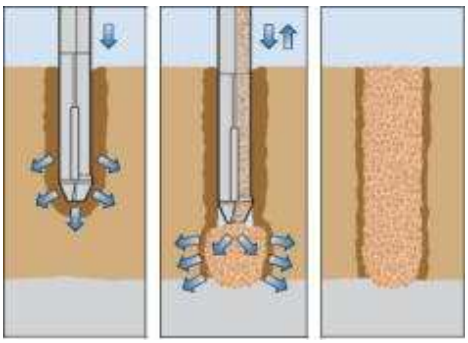


Figure 29: Mise en place d'une colonne ballastée par voie humide, [Vincent Six, 2006].

IV.1.6. Avantages des colonnes ballastées

Les deux critères, prix et rapidité auront été déterminants pour le choix de ce procédé sur ce chantier. Ainsi :

- Rendements d'exécution rapides (entre 150 et 200 mètres linéaires par poste) et non soumis aux risques d'intempéries (pas de béton).
- Pas de recépage ni de temps d'attente avant l'intervention du gros œuvre.
- Le matériau d'apport arrive directement à l'orifice de sortie, garantissant une parfaite continuité de la colonne.
- Les vibreurs sont guidés le long d'un mât, garantissant une parfaite verticalité, et peuvent mobiliser un effort de poussée supérieur à 250 kN.
- L'enregistrement des paramètres : vitesse d'enfoncement, continuité et profondeur de la colonne est imprimé en temps réel pour chaque colonne.

IV.2. Résultats obtenus dans les planches d'essais

Vue l'hétérogénéité des caractéristiques géotechniques des couches du sol du terminal à conteneurs du port d'Alger, un total de six (6) planches d'essais de forme carrée et d'une surface de 100 m^2 chacune a été réalisé dans le terminal, afin d'évaluer l'efficacité de la méthode choisie, ainsi que d'obtenir le maillage qui répond au tôt de substitution estimer dans le dimensionnement.

Notre site d'étude est partagé en quatre zones différentes pour la réalisation des colonnes ballastées. Deux planches d'essais ont été réalisés dans l'ancienne darse N°7 (zone 1), deux autres ont été réalisées dans la partie Nord et centre du môle El-Hadjar (zone 2), une planche d'essais a été réaliser dans la partie la plus intérieure du terminale (zone 3), et une autre a été réalisé dans la partie Sud-ouest du terminal (zone 4) (figure 30).

Le nombre de colonnes est différent d'une planche d'essais à une autre, la profondeur des colonnes, leur diamètre, ainsi que le maillage, par contre le type de ce dernier utilisé dans l'ensemble des planches d'essais est un maillage hexagonal.

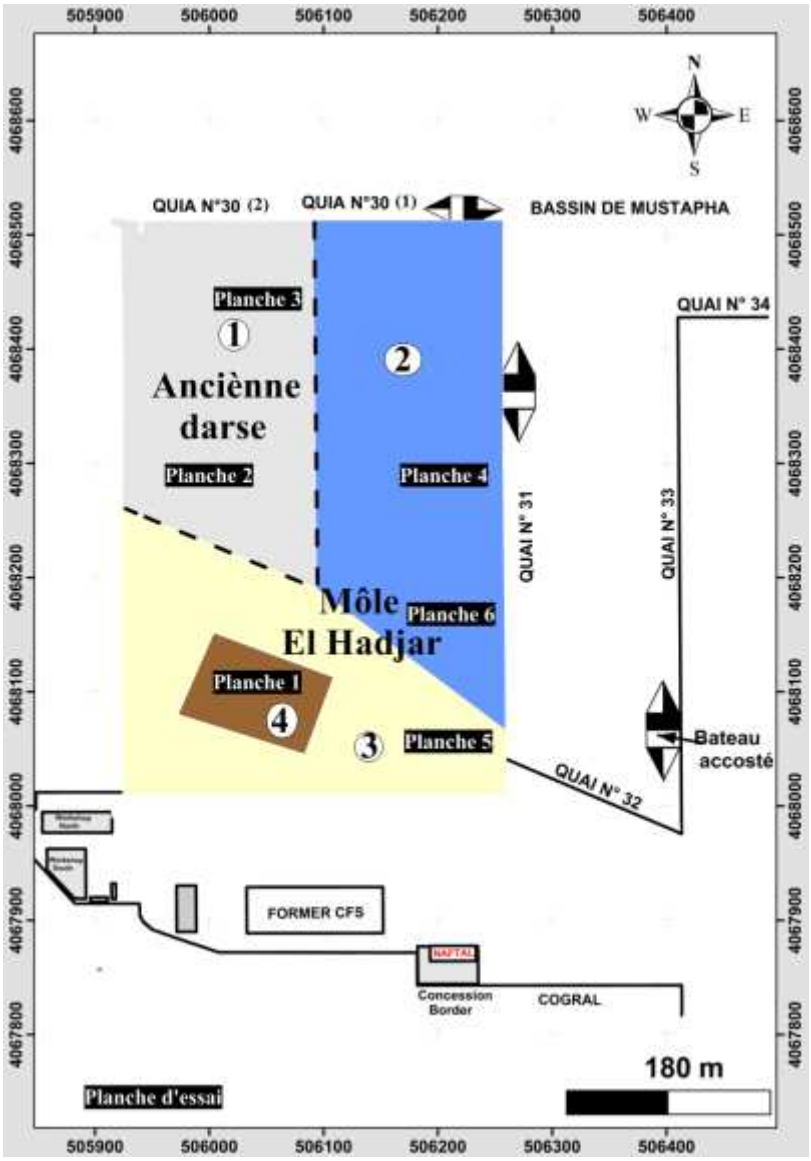


Figure 30 : Emplacement des planches d'essais dans le terminal à conteneurs

IV.2.1. Zone1 (Remblai de l'ancienne darse N°7)

Les planches d'essais réalisées dans cette zone sont la planche d'essais Nº 2 qui a un ensemble de 23 colonne ballastées, et la Nº3 qui a un ensemble de 27 colonne ballastées.

- Le maillage testé dans la planche d'essais Nº 2 est composé de colonnes réparties selon une distribution hexagonale, avec une séparation entre axes de 2,20 m, les diamètres de colonnes résultants dans cette zone compris entre 0,83 m et 1,00 m, avec une valeur moyenne de 0,9 m. Les colonnes réalisées dans cette planche d'essais ont été capables de traverser toute la strate de sables à améliorer. Le taux de substitution du sol obtenu

avec ce maillage est de15,2%, inférieur au taux de substitution recherché dans cette zone qui est de 18,7%.

- En conséquence, un nouveau maillage a été essayé dans la planche d'essais Nº 3, de manière à maintenir le taux de substitution du sol requis dans cette zone. Le maillage résultant était composé de colonnes réparties selon une distribution hexagonale avec une séparation entre axes de 1,85 m. Les diamètres de colonnes résultants dans cette zone compris entre 0,83 m et 1 m, avec une valeur moyenne de 0,95m. Les colonnes réalisées dans cette planche d'essais ont été capables de traverser toute la strate de sables à améliorer (> 10 m). Le taux de substitution du sol obtenu avec ce maillage est de 23,9%, supérieur au taux de substitution recherché dans cette zone qui est de 18,7%.

Ainsi sur la base des diamètres obtenus dans cette zone, une optimisation du maillage a été préconisée afin de satisfaire aux exigences établies.

Le maillage proposé, considéra un diamètre moyen de colonnes de 0,9 m, avec une séparation entre axes de colonnes de 1,95 m. Le taux de substitution estimé d'être obtenu avec ce maillage est de 19,32%. Ainsi les tassements estimés sont de l'ordre de 4,83 cm inférieure à la limite requise (5 cm).

IV.2.2. ZONE 2 (Remblai de la partie Nord et centre de môle El –Hadjar)

Les planches d'essais réalisées dans cette zone sont la planche d'essai Nº 4 qui a un total de 28 colonnes ballastées, et la N º 6 qui a un total de 25 colonnes ballastées.

- Le maillage testé dans la planche d'essais N°4 est composé de colonnes réparties selon une distribution hexagonale, et la distance entre deux colonnes est de 1,85 m. les diamètres de colonnes résultants dans cette zone compris entre 0,81 m et 0,95 m, avec une valeur moyenne de 0,90 m.

  Les colonnes réalisées dans cette planche d'essais ont été capables de traverser toute la couche de sol à améliorer (> 10 m). Le taux de substitution du sol obtenu avec ce maillage est de 21,5%, supérieur au taux de substitution recherché dans cette zone qui est de 18,7%.

- Le maillage testé dans la planche d'essais N°6 est composé de colonnes réparties selon une distribution hexagonale, et la distance entre deux colonnes est de 2 m. les diamètres de colonnes résultants dans cette zone compris entre 0,82 m et 1 m, avec

une valeur moyenne de 0,93 m. les colonnes réalisées dans cette planches d'essais ont été capables de traverser toute la couche de sol à améliorer. Le taux de substitution du sol obtenu avec ce maillage est de 18,4% inférieur au taux de substitution recherché qui est de 18,7%

Les résultats obtenus pour la planche d'essais N° 4 sont meilleurs que les résultats de la planche d'essais N° 6. C'est ainsi que les résultats obtenus au niveau de la planche d'essais N° 4 ont été adoptés pour réaliser l'ensemble des colonnes ballastées pour cette zone.

IV.2.3. ZONE 3 (Remblai de la zone la plus intérieure du terminal)

La planche d'essais réalisée dans cette zone est la Nº5 qui a un total de 23 colonnes ballastées réparties selon une distribution hexagonale. Cette zone est la plus ancienne du terminal, et le sol devient plus consolidé, les diamètres obtenus dans cette planche d'essais sont inférieurs aux diamètres obtenus dans le reste des planches d'essais, variant entre 0,73 m et 0,92 m, avec une valeur moyenne de 0,80 m, et la distance entre deux colonnes est de 2 m. Les colonnes réalisées ont été capables de traverser toute la strate de sables à améliorer et le taux de substitution du sol obtenu avec ce maillage est du 14,7%, inférieur au taux du 15,7% recherché dans cette zone. Le maillage a été ensuite resserré à 1,8 m entre colonnes au lieu de 2 m entre colonnes pour arriver au taux de substitution recherché dans cette zone qui est de 15,7%.

IV.2.4. ZONE 4 (Remblai de la partie Sud-ouest du terminal -inclusions sableuses sous passage gréseux-)

La planche d'essais réalisée dans cette zone est la Nº1 qui a un total de 28 colonnes ballastées réparties selon une distribution hexagonale. Les diamètres obtenus dans les colonnes menées à terme dans cette planche d'essais sont compris entre 0,75 m et 0,96 m, avec une valeur moyenne de 0,85 m, et la distance entre deux colonnes est de 1,8 m, alors que l'épaisseur des colonnes est inférieure à 10 m, car elles n'ont pas traversé l'intercalation sableuse qui existe sous la couche de grès.

Le taux de substitution du sol obtenu avec ce maillage est du 17,9%, légèrement inférieur au taux de substitution estimé qui est de18,7%. Le maillage a été alors resserré dans cette zone à 1,7 m pour arriver au taux de substitution estimé qui est de 18,7%.

IV.3. Contrôle des colonnes ballastées

On expose une liste des vérifications avant, pendant et, après la réalisation des colonnes ballastées afin de valider chacune des planches d'essais réalisées.

IV.3.1.Avant la réalisation des colonnes ballastées (contrôles du matériel d'Apport)

D'après les essais de laboratoire, les matériaux d'apport sont des graviers concassés de taille moyenne comprise entre 40 mm et 50 mm, ainsi un:

- Angle de frottement interne du gravier est de 40° (concassé),
- Essai los Angeles consiste a mesuré la dureté de ballaste par choc (LA<24%),
- Essai Microdeval consiste a mesuré la dureté de ballaste par frottement (MDE<11%),
- LA+MDE < 34%,
- Résistance de la matrice >25 Mpa.

IV.3.2. Pendant la réalisation des colonnes ballastées (autocontrôle)

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

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

Pour chaque colonne ballastée réalisée, un graphique parallèle (figure 31) en fonction du temps est édité, permettant de vérifier:

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

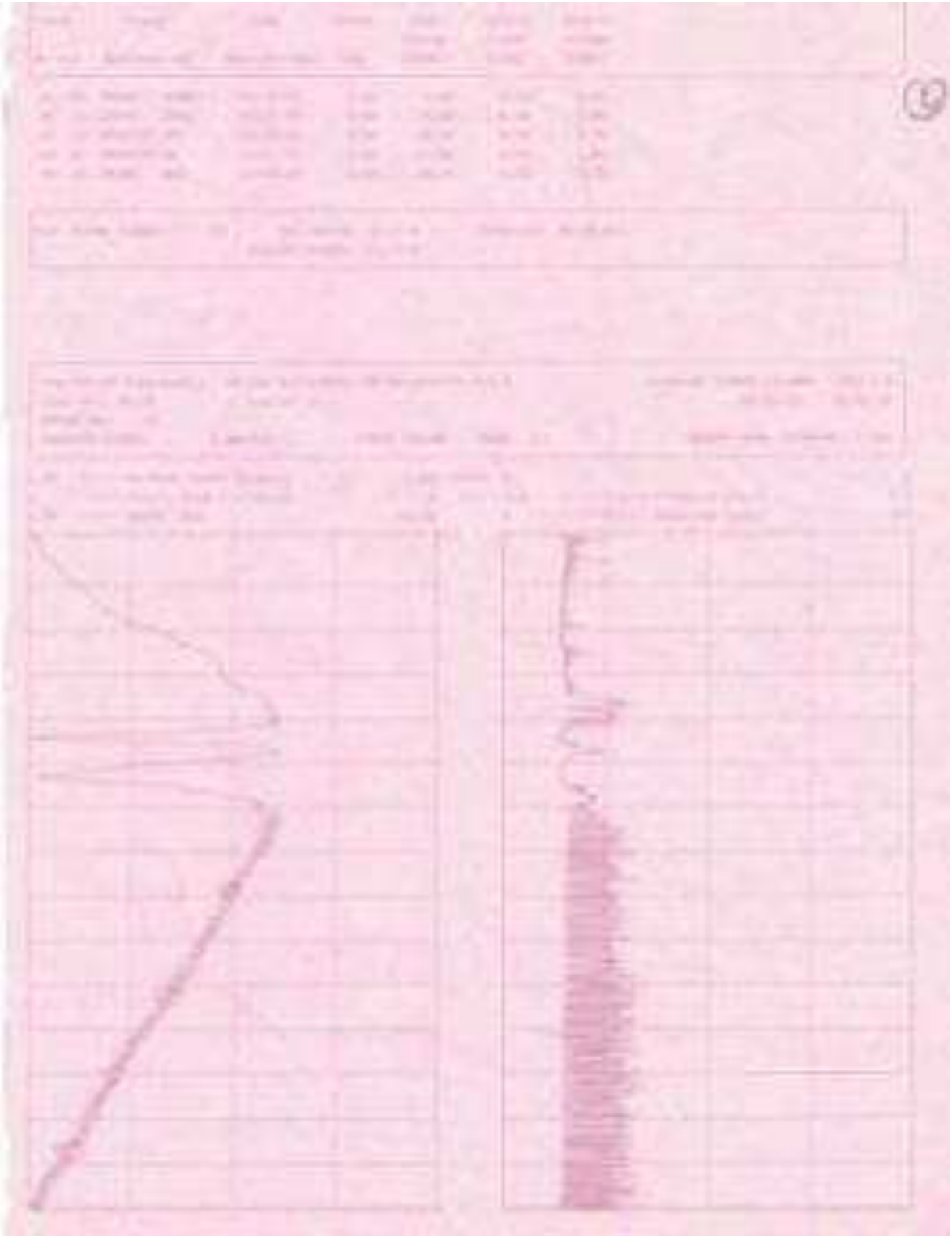


Figure 31: Exemple d'enregistrement de paramètres de traitement

IV.3.3.Après la réalisation des colonnes ballastées (contrôle de résistance)

Trois types d'essai ont été utilisés pour évaluer la réussite des planches d'essai effectué dans les quatre zones de terminal à conteneurs du port d'Alger.

A. Essai de chargement

Un essai de chargement en tête de colonne, permettant d'évaluer sa portance. Pour cela, une charge de service (Qs) est appliquer à la colonne ballastée, dont la valeur variera en fonction du maillage adopté, et il faudra atteindre une valeur de 1,5 Qs. L'essai consiste à mesurer l'enfoncement de la tête de vibreur dans la colonne à l'aide de quatre comparateurs.

Les tassements obtenus avec la charge de service (Qs) de la colonne ballastée devront être inférieurs aux ceux estimés dans les calculs et compatibles avec les tolérances imposées par le traitement à réaliser. A ce sujet, pour les contraintes proposées, ils n'atteindront pas les 4 cm.

D'autre part, la contrainte critique ne devra pas être atteinte (fluage), parce qu'il y'a une augmentation des déformations.

B. Essais au pénétromètre statique (CPT)

La réalisation d'essais au pénétromètre statique dans l'axe des colonnes est la façon la mieux adaptée pour vérifier la continuité de la colonne, la compacité, mais aucun de ces essais n'a peut traverser toute la colonne, à cause de la déviation éventuelles des tiges qui due à la taille du ballaste incorporé « grande taille », ou à un faux refus sur cailloux.

- La compacité recherché, est confirmée par l'aboutissement d'une résistance à la pointe supérieure ou égale à 10 Mpa à partir de 1 m de profondeur.
- La comparaison des résultats des essais CPT réalisés dans le sol entre colonnes, et ceux réalisés dans le même endroit avant l'exécution de ces colonnes, nous renseigne sur son amélioration.

Les tableaux 14 et 15 suivant résument les résultats des essais aux pénétromètres statiques (CPT) effectués sur les colonnes ballastées et entre elles.

Tableau 14: Résultats des CPT obtenus sur les colonnes ballastées

Zone	Planche d'essai	E (Mpa)	Φ'(°)	tg Φ '
Zone 1	Planche 2	14,88	37,23	0,76
	Planche 3	14,88	37,23	0,76
Zone 2	Planche 4	21,8	38,67	0,8
	Planche 6	15,71	37,65	0,77
Zone 3	Planche 5	16,59	38,31	0,79
Zone 4	Planche 1	15,47	38,5	0,79

Tableau 15: Résultats des CPT obtenus sur le sol qui se trouve entre les colonnes ballastées

Zone	Planche d'essai	Résistance à la pointe (qc)	Φ'(°)	Dr (%)	E (Mpa)
Zone 2	Planche 4	5,37	36	55,8	7,5
	Planche 6	5,06	33,5	47,1	6
Zone 3	Planche 5	8,34	36	55,8	7,25
Zone 4	Planche 1	4	36	52,4	6

Concernant la zone 1 aucune mesure a été effectuée sur le sol qui se trouve entre les colonnes ballastées car le maillage effectué n'est pas efficace (taux de substitution obtenu est loin de taux de substitution estimé qui est de 18,7%), et un autre qui doit être adopté dans cette zone.

C. Dégarnissage

Cet essai consiste à mesurer le diamètre de chaque colonne en surface et sur une seule colonne dans chaque planche d'essais à 1 m de profondeur. Le tableau suivant est récapitulatif des déférents essais de dégarnissage effectués.

Tableau 16: Résultats des essais de contrôle

Zone	Planche d'essai	Essai de chargement	Dégarnissage (diamètre des colonnes en mètre)	Résultats des (CPT)
Zone 1	Planche 2		le diamètre des colonnes compris entre 0,87 m et 1,1 m avec une valeur moyenne de 0,98 m	pas de densification du sol
	Planche 3		le diamètre des colonnes compris entre 0,95 m et 1,1 m avec une valeur moyenne de 1,01 m	pas de densification du sol
Zone 2	Planche 4	Les tassements obtenus sont inferieure au 4 cm	le diamètre des colonnes compris entre 0,87 m et 1,03 m avec une valeur moyenne de 0,93 m	Le sol entre colonnes a été densifié comme conséquence de l'inclusion des colonnes qc = 5,37 Mpa
	Planche 6	Les tassements obtenus sont inferieure au 4 cm	le diamètre des colonnes compris entre 0,85 m et 1,04 m avec une valeur moyenne de 0,96 m	Le sol entre colonnes a été densifie comme conséquence de l'inclusion des colonnes qc = 5,06 Mpa
Zone 3	Planche 5	Les tassements obtenus sont inferieure au 4 cm	le diamètre des colonnes compris entre 0,76 m et 0,96 m avec une valeur moyenne de 0,83 m	Le sol entre colonnes a été densifie comme conséquence de l'inclusion des colonnes qc = 8,34 Mpa
Zone 4	Planche 1	Les tassements obtenus sont inferieure au 4 cm	le diamètre des colonnes compris entre 0,75 m et 0,96 m avec une valeur moyenne de 0,85 m	Le sol entre colonnes a été densifie comme conséquence de l'inclusion des colonnes qc = 4 Mpa

CONCLUSION

Le renforcement des sols par colonnes ballastées est la meilleure solution aux problèmes des sols médiocres et lâche tel que le sol du terminal à conteneurs du port d'Alger. Ce procédé facile à mettre en œuvre, relativement rapide et surtout économique par rapport à d'autre technique tel que les pieux, le matériau d'apport étant des cailloux ou du gravier.

Vue l'hétérogénéité du sol de notre zone d'étude et vue la sensibilité du projet (grands portiques sur les quai 30 et 31) plusieurs dimensionnement ont été faits pour arriver à de bon résultats.

Un problème a été rencontré dans la zone 4, ou la couche de sable n'a pu être traversée en entier à cause de la présence de la couche de grès, mais le taux de substitution obtenu est acceptable car il est proche de taux de substitution estimée.

Un taux de substitution de 18,7% a été estimée dans les zones N°1, 2 et 4, ou la couche de remblai dépasse 10 mètre, et un taux de substitution de 15,7% est révélé nécessaire dans la zone N°3 ou la couche de remblai est inférieure à 10 m. Le maillage des colonnes ballastées réalisées dans la zone 1 a donné des résultats de substitution loin de la valeur estimée, et pour cet effet qu'un nouveau maillage a été proposé pour cette zone afin d'arriver au taux de substitution voulue. Les caractéristiques géotechniques du sol du môle El-Hadjar (zone 2, 3, 4) ont été améliorées après la réalisation des colonnes ballastées. Le tableau suivant montre la compacité du sol entre colonnes avant et après consolidation.

Tableau 17: résultats des essais effectué sur le remblai de môle El Hadjar avant et après la réalisation des colonnes ballastées

	Avant la réalisation des planches d'essai	**Après la réalisation des planches d'essai**
E (Mpa)	5	6,66
Φ' (°)	34,33	34,25

D'après les résultats obtenus en remarque une augmentation du module d'élasticité E, c'est le Cas des sables graveleux normalement consolidé.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de ce travail est d'étudier les caractéristiques géotechniques du sol formant le terminal à conteneurs du port d'Alger, et son renforcement par les colonnes ballastées. Pour cela, nous avons exploité les résultats de la campagne géotechnique réalisée dans cet objectif.

En effet, l'analyse des données géologiques et géotechniques récoltées au cours de notre travail ont permis d'analyser la géométrie des couches formant le sous-sol du terminal à conteneurs, ainsi que leurs propriétés géotechniques. Ainsi, à partir de coupes lithologiques corrélatives, réalisées sur la base de sondages carottés, nous avons défini trois couches de sol, une couche allochtone et deux autres autochtones.

Le sol allochtone est constitué d'une couche de remblai hétérogène au niveau de l'ancienne darse et plutôt homogène au niveau du môle El Hadjar. Cette couche de remblai apparait dans tout le terminal. Son épaisseur diminue en allant du nord vers le sud (8 m au Sud, 16 m au Nord) ainsi que en allant de l'Est vers l'Ouest. Dans cette couche apparait une nappe phréatique à environ 2,5 m de profondeur. L'analyse des propriétés géotechniques de cette couche montre un aspect hétérogène, lâche, déformable et de faible compacité. Ce type de sol est déconseillé pour la construction.

Le sol autochtone est constitué d'une fine couche de grés fracturés sous la couche des remblais avec une épaisseur qui varie entre 0,2 m et 2,5 mètre. Cette couche est absente dans la plus part des sondages carottiers et particulièrement dans la partie Est du terminal.

Il y'a également une autre unité des marnes qui se trouvent au-dessous de la couche de remblai ou de grès en cas d'existence de celle-ci, ce sol est plus proche de la surface dans la partie Sud (à 8 m environ dans la prospection Sc20- annexe 4-), et plus loin de la surface au Nord (à 16,2 m dans la prospection Sc11-annexe 4-). L'analyse des propriétés géotechniques des couches du sol autochtone montre leur aspect homogène, dur et non déformable. Ce type de sol est favorable pour la construction. Le tableau suivant est récapitulatif des différents essais géotechniques réalisés dans les différentes couches du sol du terminal à conteneurs du port d'Alger afin de valider sa dureté.

Tableau 18: Résultats des essais géotechniques effectué dans les déférentes couches du sol de la zone du TAC

	Remblai de l'Ancienne darse N°7	Remblai de môle El HADJAR	Couche de grés	Couche des marnes
Masse volumique humide γ_h (t/m^3)	2	2	-	2
Masse volumique sec γ_d(t/m^3)	1,7	1,8	-	1,6
Résistance au cisaillement τ (Kpa)	106,86	100,88	-	119
Indice de compression (Cc)	0,07	0,06	-	0,1
Indice de gonflement (Cs)	0,005	0,0033	-	0,03
Essai de consolidation (E/Pl)	5,5	6	-	10,98
Résistance à la pénétration statique CPTU (Mpa)	4	4	-	7
Cu (Kpa)	-	-	4,325	379,75
Rc (Kpa)	-	-	8,651	760

Pour améliorer les propriétés de la couche de remblai, des colonnes ballastées ont été envisagées pour renforcer ce sol et améliorer ses caractéristiques géotechniques pour la rendre favorable pour la construction. D'une manière générale, sur l'ensemble des planches d'essais réalisées dans le terminal à conteneurs du port d'Alger il a été montré que les colonnes réalisées arrivent à dépasser toute la couche du sable (remblai) et les caractéristiques géotechniques sont améliorées (sol renforcé), A l'exception de la zone 4 ou il y a un passage gréseux sous la couche de remblai, donc les colonnes de cette planche n'arrivent pas à traverser toute la couche de sable, et pour cela le serrage de la maille a été proposer pour palier à ce problème. Ainsi, un taux de substitution de 18,7% a été estimé dans les zones N°1, 2 et 4, ou la couche de remblai dépasse 10 m, et un taux de substitution de 15,7% nécessaire dans la zone N°3 ou la couche de remblai est inférieure à 10 m.

Le taux de substitution obtenu avec le maillage proposé dans la zone 1, n'est pas atteint le taux estimé, à cet effet qu'un nouveau maillage doit être proposé pour cette zone pour arriver au taux de substitution voulu. Par contre, les caractéristiques géotechniques du sol du môle El Hadja (zone 2, 3, 4) sont améliorées après la réalisation des colonnes ballastées, où la couche de remblai lâche est devenue normalement consolidée après la réalisation des colonnes ballastées.

Enfin, il reste à confirmer l'efficacité des colonnes ballastées réalisées dans le terminal à conteneurs de port d'Alger une fois que les portiques géants seront mis en place sur les quais.

Références bibliographiques

AFNOR. (2006). Exécution de travaux géotechniques spéciaux: Amélioration des massifs de sol par vibration. livre-Association Française de Normalisation-France, 22P.

AGUADO et al. (2011). Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et sous ouvrages sensibles au tassement. *Livre-France.* 32 p.

AMEZIANE A, BALIT E. (2006). Etude géologique, géotechnique et analyse des procédés de creusement et de soutènement du tunnel du métro d'Alger tronçon: Hamma-Hai el Badr. *Mémoire d'Ingénieur-USTHB-Alger.* 95 p.

AYME. (1964). Carte géologique au 1/50000 Alger. N°21. Publ. ser. Carte. Géol-Algérie-Alger.

BENALLAL K, OURABIA K. (1989). Monographie géologique et géotechnique de la région d'Alger. *Office des publications universitaire-Alger.* 190 p.

BENIDIR N, FERNANE L. (2010). Détermination des fréquences de résonance du sol par la méthode H/V-bruit de fond dans la région d'Hussein Dey. *Mémoire d'ingénieur- ENSSMAL-Alger.* 31 p.

BLONDEAU F, DHUIB A. (2005). Colonnes ballastées: Technique de mise en œuvre, domaines d'application, justification, contrôle, axes de recherche et développement. *livre-Presses de l'école nationale des ponts de chaussées-Paris.* 251 p.

BOUDIAF A. (1996). Etude sismotectonique de la région d'Alger et de la Kabylie (Algérie). *Thèse d'état-Univ Montpelier II-France*. 225 p.

BOUKHROUF M. (2012). Evaluation des fréquences de résonnance du sol de la région de Bordj el Behri par la méthode H/V bruit de fond. *Mémoire de Mastère- ENSSMAL- Alger.* 31p.

C.G.S. (2003). Règles parasismiques algériennes. RPA99/VERSION 2003. 120 p.

CHARAKJI F, DJENIDI. (2006). Etat du littoral de l'Est Algérois Bordj El Kiffan et Bordj El Behri (causes et conséquences de l'érosion). *Mémoire d'Ingénieur-ISMAL-Alger.* 59 p.

CRAAG, USGS et al. Catalogue de sismicité historique et instrumentale de la région située entre la latitude 35°N et 38°N et la longitude 1°E et 6°E, période 1365 à 1993.

DÉVERCHÈRE et al. (2005). Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relations to the 2003 Mw 6.9 earthquake, Geophys. Res. Lett, Vol. 32.

DOMZIG A. (2006). Déformation active et récente, et structuration tectonosédimentaire de la marge sous-marine algérienne. *Thèse de doctorat-Université de Bretagne Occidentale-France.* 333 p.

GEOMATRIX. (2006). Analyse probabiliste de l'aléa sismique de la wilaya d'Alger.

GLANGEAUD L, AYME A, CAIRE A, MATAEUR M, MARAOUR P. (1952). Histoire géologique de la province d'Alger. *Publication XIXème CGI. Alger 1952. Monographie Région. 1ére série Algérie. n°25.* 142 p.

HAMGA M, SAYAD R. (2006). Application de la méthode de fond au glissement de terrain de Telemy-Alger. *Mémoire d'Ingénieure-USTHB-Alger.* 62 p.

Hellel M. (2010). Utilisation du bruit de fond pour l'évaluation de la structure géologique 3D: application à trois site eu contexte de forte sismicité. Thèse de doctorat-USTHB-Alger. 168 p.

Ikhlef A, Mokrani S. (2006). Etude géologique, géophysique, et géotechnique du projet City Centre des Pains Maritimes Alger. *Mémoire d'Ingénieur-USTHB-Alger.* 95 p.

JICA. Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme, C.G.S. 2006. Etude de Mécrozonage sismique de la Wilaya d'Alger. 319 p.

MEGHRAOUI M. (1988). Géologie des zones sismiques du Nord de l'Algérie: paléo-sismologie, tectonique active, et synthèse sismo-tectonique. *Thèse de doctorat d'Etat-Université de Paris Sud-France.* 356 p.

ROMAIN A. (2010). Influence d'une colonne ballastée sur le comportement des sols argileux. *Projet fin d'étude-INSA, Strathclyde-France.* 105 p.

SEMANE F. (2005). Caractérisation de la source sismique à partir des données eu champ proche: Application au séisme de Tottori (Japon) et Boumerdès (Algérie). *Thèse de doctorat-Université Joseph Fourier-Grenoble I.* 178 p.

VINCENT S. (2006). Analyse du comportement des colonnes ballastées: Influence des conditions initiales. *Thèse de Doctorat-Université des sciences et technologies de LILE-France.* 157 p.

Zighmi IB. (2012). Etude numérique de l'influence des paramètres géotechniques sur le comportement des sols renforcés par colonnes ballastées. *Mémoire de Magistère en Génie civil-Université Mouloud Mammeri-Tizi Ouzou.* 229 p.

Annexes

***Annexe 1:*Tableau relatif aux paramètres physiques**

Paramètre d'identification	Symbole	Unité
Teneur en eau	WW	%
Degré de saturation	Sr	%
Poids volumique sec	γ_d	t/m^3
Poids volumique humide	γ_h	t/m^3
Limite de liquidité	W_L	%
Limite de plasticité	W_P	%
Indice de plasticité	I_P	%
Indice consistance	I_C	-

Annexe 2 : Essais d'identification physique

- Tableau relative au degré de saturation du sol d'après Terzaghi

Degré de saturation (Sr)	Appréciation
= 100%	Saturé
76< Sr <99 %	Détrempé
51< Sr <75 %	Mouillé
26< Sr < 50 %	Humide
1< Sr < 25%	Légèrement humide
Sr = 0 %	Sec

- Tableau de poids volumique sec

Poids volumique sec (γ_d)	Appréciation
γ_d< 1.6	Faible
1.6 <γ_d< 1.8	Moyenne
γ_d> 1.8	Dense

- Tableau relative à la plasticité (Atterberg)

Indice de plasticité (Ip %)	Appréciation
Ip = 0	Plastique nulle
Ip< 7 %	Peu plastique
7 <Ip< 17 %	Moyennement plastique
Ip> 17 %	Hautement plastique

- Tableau de consistance

Indice de consistance (Ic %)	Etat de sol
Ic> 0	Pâteux
0.25 <Ic< 0.50	Mou
0.50 <Ic< 0.75	Ferme
0.75 <Ic< 1.00	Mi-dur
Ic>1.00	Consistance

- Tableau relative au pourcentage des passants à 0.08 mm (LCPC)

Pourcentage des passants à 0.08 mm	Classification
>50 %	Sol fin
< 50 %	Sol pulvérulent

Annexe 3 : **Essai de compressibilité des sols**

- Tableau relative à la compressibilité des sols

Indice de compressibilité (Cc)	Appréciation
Cc < 0.02	Sol très incompressible
0.02 < Cc < 0.05	Sol incompressible
0.05 < Cc < 0.10	Sol peu compressible
0.10 < Cc < 0.20	Sol de compressibilité moyenne
0.20 < Cc < 0.30	Sol assez compressible
0.30 < Cc < 0.50	Sol très compressible

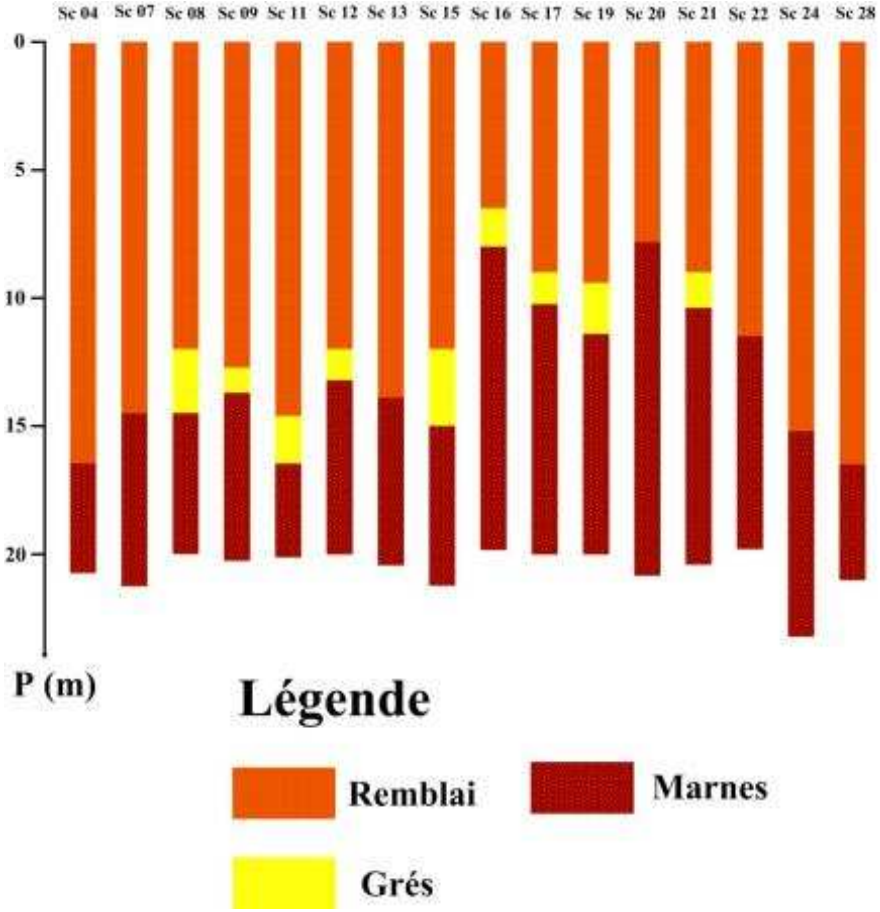
- Tableau relative au gonflement du sol (d'après Sanglerat)

Coefficient de gonflement (Cg %)	Appréciation
0.04 < Cg <0.25	Sol gonflant
0.02 < Cg < 0.04	Sol peu gonflant

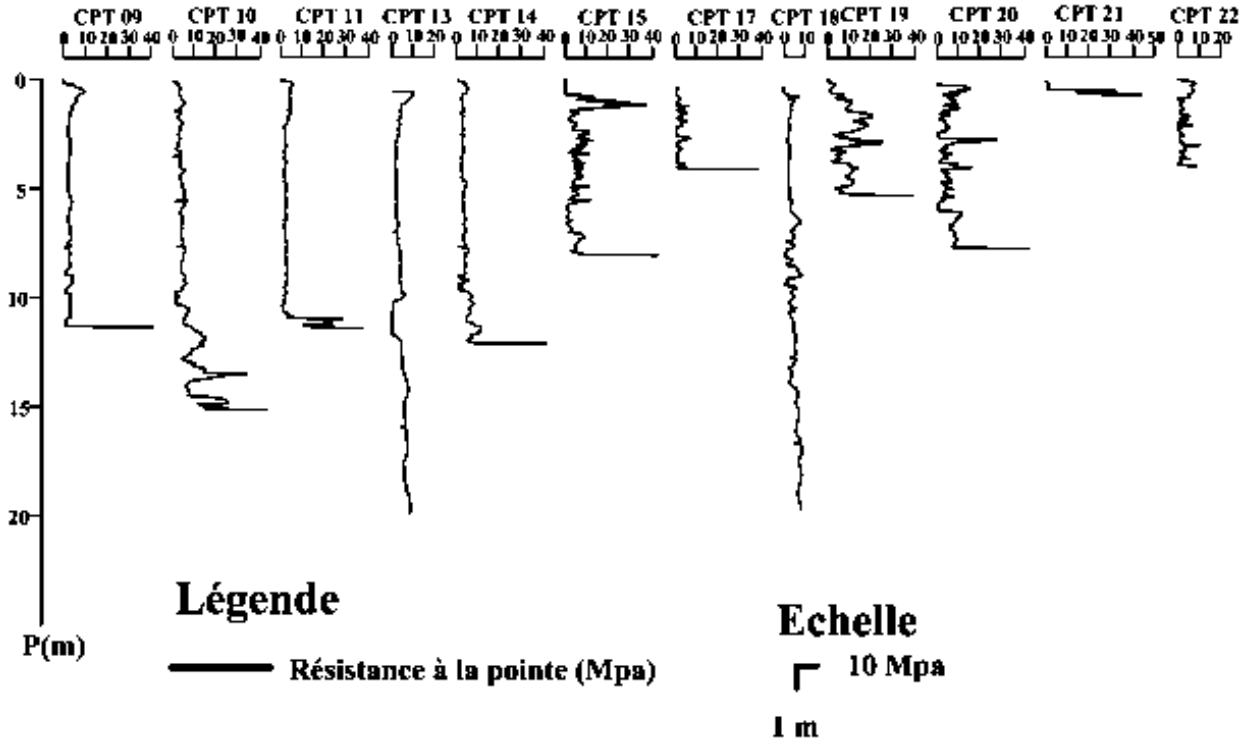
- Tableau relative à l'état de consolidation des sols d'après (G.FLLLIAT)

Type de sol **Etat du sol**	**Argile**	**Limon**	**Sable**	**Sable et gravier**
Sur consolidé	E/PI≥ 15	E/PI ≥ 14	E/PI ≥ 12	E/PI ≥ 10
Normalement consolidé	8 < E/PI < 15	8 < E/PI < 14	7 < E/PI < 12	6< E/PI < 10
Sous consolidé	5 < E/PI< 8	5 < E/PI < 8	4 < E/PI < 7	3 < E/PI < 6
Altéré ou remanié	E/PI<5	E/PI < 5	E/PI < 4	E/PI < 3

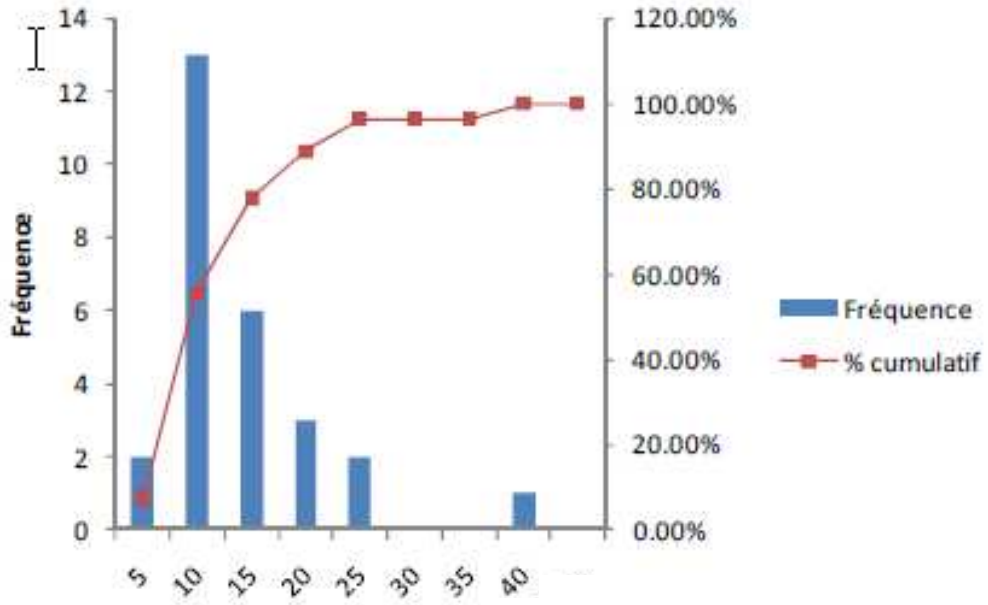
***Annexe 4:*Logs stratigraphique des sondages carottés**



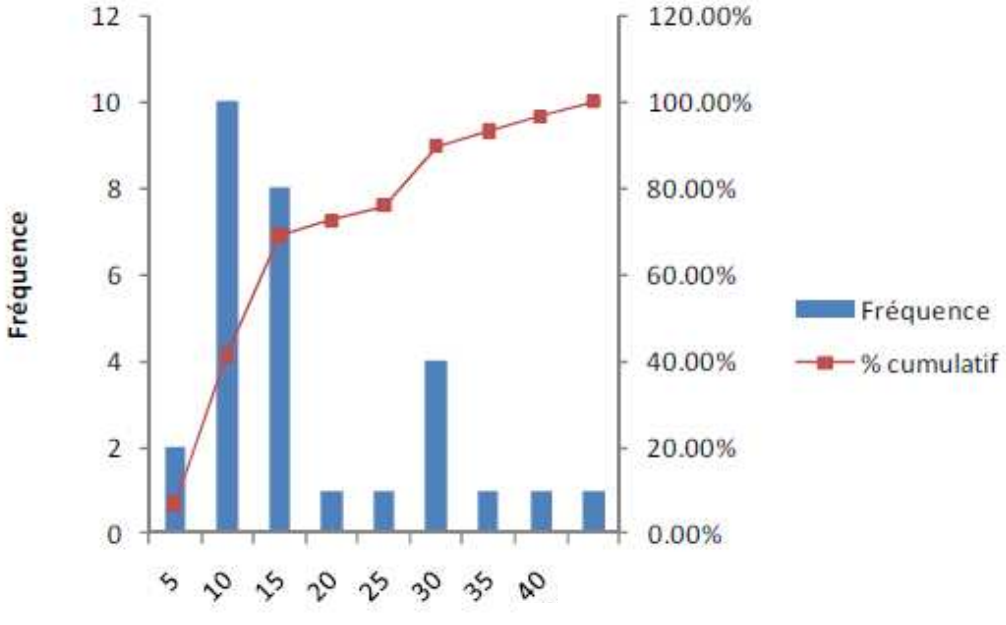
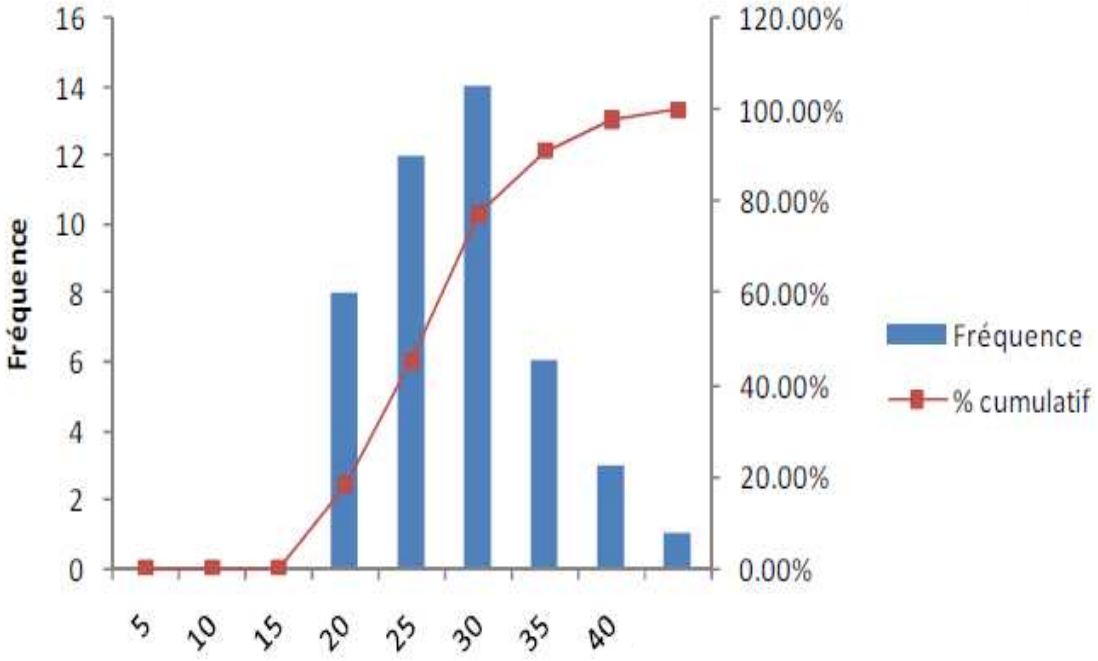
***Annexe 5:* Résultats des essai pénétrométriques**



Annexe 6: **Histogramme de fréquences (relatives et cumulées) des indices de pénétration standard N_{SPT} au niveau de remblai de l'ancienne darse N°7**



Annexe 7: **Histogramme de fréquences (relatives et cumulées) des indices de pénétration standard N_{SPT} au niveau de remblai de môle El-Hadjar**



Annexe 8: **Histogramme de fréquences (relatives et cumulées) des indices de pénétration standard N_{SPT} au niveau des marnes**