

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

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



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

OPTION : AMENAGEMENT DU LITTORAL

**Travaux de consolidation des terre-pleins du terminal à  
conteneur du port d'Alger par les colonnes ballastées voie  
humide**

Préparé par :

M<sup>me</sup> BELLILI Chahira

M<sup>lle</sup> SADOK Nourelhouda

Soutenu le 12/07 /18 devant le jury suivant :

M. ALLAM B.	Maître Assistant A	(ENSSMAL)	Président
M. MEZOUAR K.	Maître de Conférences A	(ENSSMAL)	Promoteur
M. BOUKHROUF M.	Ingénieur chargé d'étude	(CTTP)	Co-Promoteur
M. FERNANE L.	Maître Assistant B	(ENSSMAL)	Examineur
M. OTMANI H.	Maître Assistant A	(ENSSMAL)	Examineur

Session : Juillet 2018

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

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



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

OPTION : AMENAGEMENT DU LITTORAL

**Travaux de consolidation des terre-pleins du terminal à  
conteneur du port d'Alger par les colonnes ballastées voie  
humide**

Préparé par :

M<sup>eme</sup> BELLILI Chahira

M<sup>elle</sup> SADOK Nourelhouda

Soutenu le 12/07 /18 devant le jury suivant :

M. ALLAM B.	Maître Assistant A	(ENSSMAL)	Président
M. MEZOUAR K.	Maître de Conférences A	(ENSSMAL)	Promoteur
M. BOUKHROUF M.	Ingénieur chargé d'étude	(CTTP)	Co-Promoteur
M. FERNANE L.	Maître Assistant B	(ENSSMAL)	Examineur
M. OTMANI H.	Maître Assistant A	(ENSSMAL)	Examineur

Session : Juillet 2018

## *Remerciement*

*Un mémoire de fin d'étude est souvent seulement perçu comme l'aboutissement d'un long parcours accompli en cinq (5) années. Nous, nous le considérons plutôt comme la clé qui permet d'ouvrir une porte sur une nouvelle expérience. Grâce à tous ceux que nous avons pu rencontrer au cours de nos études et durant toutes ces années, nous espérons être les mieux préparées à la vie professionnelle à venir.*

*Nos premiers remerciements vont au **bon Dieu** le tout puissant, pour nous avoir accordé la force, la volonté et la patience jusqu'à l'accomplissement de ce modeste travail.*

*Nous voudrions également exprimer nos vifs remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu juger ce travail, notamment : **M. ALLAM B.** qui a accepté de présider le jury, **M. OTTMANI H.** et **M. FERNANE L.** d'avoir accepté d'examiner ce manuscrit et de participer à ce jury.*

*Nous tenons à exprimer notre grande reconnaissance à **M. MEZOUAR K.** et **M. BOUKHROUF M.** qui nous ont fait l'honneur d'avoir accepté d'encadrer et co-encadrer ce travail. Leurs disponibilités durant toutes les étapes de ce travail, leurs remarques pertinentes et leurs suggestions ont été très utiles pour l'amélioration de la qualité de ce document.*

*Nos remerciements vont aussi à d'autres personnes que nous avons eu la chance de rencontrer durant notre parcours, qui n'ont ménagé aucun effort pour nous guider et amené leurs pierres à l'édifice, merci en particulier à **l'équipe des ingénieurs chargés d'étude (port d'Alger)** pour nous avoir initiée à la technique de renforcement par les colonnes ballastées.*

*D'autres personnes ont également croisé notre chemin : nous pensons à **M. SALLAM.** et **M<sup>me</sup> CHERIF Y.***

*Nous remercions encore une fois **M. FERNANE L.** en tant qu'un enseignant à **l'ENSSMAL** pour son aide et son assistance surtout dans la résolution de certains problèmes rencontrés avec le logiciel **SURFER 11.***

*Nous finissons par un immense merci à nos **parents** qui nous ont soutenus pendant toutes nos études.*

# Dédicace

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie que je dédie ce travail :*

*A mes très chers, respectueux et magnifiques parents  
Vraiment aucune dédicace ne saurait exprimer mon attachement,  
mon amour et ma gratitude pour les sacrifices que vous avez consenti  
pour mon instruction et mon bien être.*

*Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés et  
le fruit de vos innombrables sacrifices. Puisse Dieu, le tout puissant,  
vous accorder santé, bonheur, longue vie et surtout un prompt  
rétablissement pour ma très chère et adorable mère*

*A mes fidèles accompagnantes dans les moments les plus délicates  
de cette vie mystérieuse, mes adorables sœurs Kawthér et Hanaâ,  
pour leur soutien moral, leur gentillesse sans égal et leur profond  
attachement.*

*Ainsi qu'à mon beau-frère Mustapha qui a occupé  
la place d'un grand frère.*

*A mon petit ange Adém l'étoile lumineuse de mon cœur.*

*A tous mes amis, en particulier : Manal, Joujou, Yasmine,  
Samia, Hanane, Jojo et Nesrine.*

*Chaleureusement à toute personne de la promotion  
Aménagement 2017-2018, Spécialement à mon binôme Chahira.*

*Enfin, à toute ma famille sans exception, spécialement à les deux  
familles SADOK et OUZZANI et à tous ceux qui m'ont aidé dans  
l'élaboration de ce travail de près ou de loin.*

<i>A cœur vaillant rien d'impossible .....</i>	<i>A conscience tranquille tout est accessible</i>
<i>Quand il y a la soif d'apprendre .....</i>	<i>Tout vient à point à qui sait attendre</i>
<i>Quand il y a le souci de réaliser un dessein ...</i>	<i>Tout devient facile pour arriver à nos fins</i>
<i>Malgré les obstacles qui s'opposent .....</i>	<i>En dépit des difficultés qui s'interposent</i>
<i>Les études sont avant tout .....</i>	<i>Notre unique et seul atout</i>
<i>Ils représentent la lumière de notre existence</i>	<i>L'étoile brillante de notre réjouissance</i>

*Nourelhouda*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à tous ceux qui me sont chers,*

*A ma mère FARIDA et à mon père ACHOUR qui ont tout sacrifiés  
pour mon instruction et mon éducation voyez à travers ce travail  
mon amour sincère et ma gratitude profonde.*

*A ma fille : Amel*

*A mon chère marie : ALI, pour son aide et pour le soutien moral.*

*A mon frère : SAID*

*A ma belle mer : KHEDOUJA, sans oublier mes beau-frère et belle  
sœurs.*

*A tous mes proches et à toutes mes amies qui sont très chers pour moi.*

*A mon binôme NOUR EL HOUDA et sa famille.*

*Chahira*

## ملخص

تقدم هذه الرسالة توليفة حول الاستكشافات الجيوتقنية التي تم التحصل عليها خلال تعزيز محطة الحاويات في ميناء الجزائر العاصمة ، في أعقاب الاضطرابات التي سجلت على إثر زلزال عام 2003 ، ولا سيما التسوية و تسيل التربة.

الهدف من مشروع نهاية الدراسات هذا هو تحديد طبيعة التربة الموجودة في طرفي الميناء المعنيين (حوض المرفأ رقم 7 و حاجز الأمواج "الحجار")، وتحديد حل تعريزي أكثر ملائمة، الذي يفي بمعايير استغلال المحطة.

مكننت عملية تحليل البيانات المتوفرة من اختيار حل الأعمدة الصابورة عن طريق المسار الرطب. وقد ثبت أن هذا الحل الأخير يتكيف بشكل أفضل مع التكوينات القائمة ، مما يسمح بتحسين قوة احتمال الرفع وتخفيض التسويات.

أجريت عملية مراقبة على محطة الحاويات بعد إدخال التحسينات، عن طريق إتباع اختبارين هامين (اختبار الاختراق الثابت و اختبار الحمولة)

**الكلمات المفتاحية:** التسويل ، التكدس ، التعزيز ، الصابورة ، أعمدة الصابورة ، المسار الرطب ، الهزاز ، طبقة التوزيع ، CPT اختبار التحميل ،

## Résumé

Ce mémoire présente une synthèse des reconnaissances géotechniques réalisées dans le cadre du renforcement du terminal à conteneurs du port d'Alger suite aux désordres enregistrés après le séisme de 2003, notamment le tassement et la liquéfaction.

L'objectif de ce projet de fin d'études est de déterminer la nature du sol existant dans les deux parties concernées (Darse N°7 et Mole El-Hadjar), et de déterminer la solution de renforcement la plus adéquate répondant aux critères d'exploitation du terminal.

L'analyse des données existantes a permis de choisir la solution des colonnes ballastées réalisées par voie humide, cette dernière s'est avérée la mieux adaptée aux formations en place, permettant ainsi d'améliorer la portance et réduire les tassements.

**Mots-Clefs :** Liquéfaction, tassement, renforcement, ballast, colonnes ballastées, voie humide, vibreur, matelas de répartition, essais de contrôle, CPT.

## Abstract

This Graduation Memory presents a synthesis of the geotechnical reconnaissance carried out within the framework of the reinforcement of the container terminal of the port of Algiers, following the disorders recorded after the 2003 earthquake, notably the settlement and liquefaction.

The aim of this Project graduation is to determine the nature of the soil existing in the two parties concerned (Darse n ° 7 and Mole El-Hadjar), and to determine the most appropriate reinforcement solution, which meets the criteria of the terminal operating.

The analysis of the existing data made it possible to choose the solution of the wet ballasted columns. The latter has proved to be better adapted to existing formations, thus making it possible to improve lift and reduce settlements.

Control was performed at the Container Terminal level after treatment by performing two major tests (Cone Penetration Test and loading test).

**Key words:** Liquefaction, settlement, reinforcement, ballast, ballast columns, wet track, vibrator, loading test, CPT.

## **Liste des acronymes**

TAC : Terminal à conteneur

CPT : Essai au pénétromètre statique

CGS : Règles para-sismiques-Algériennes

LA : Essai los Angelots

MDE : Essai micro Duval

CFMS : Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées bâtiments et sous ouvrages sensibles au Tassement

DTU : Document technique unifié

ELS : Etat limite de charge

## Liste de figures

Figure I. 1. Situation géographique de la baie d'Alger .....	3
Figure I. 2. Situation du site d'étude (TAC) .....	4
Figure I. 3. Carte géologique de la baie d'Alger et ses environs (JICA, 2006) .....	6
Figure I. 4. Cadre tectonique de la région d'Alger et de Boumerdès [Meghraoui, 1988].....	8
Figure I. 5. Classification sismique des wilayas d'Algérie (CGS, 2003).....	9
Figure II. 1. Situation de l'ancienne Darse N°7 et du Môle d'El-Hadjar dans le TAC .....	12
Figure II. 2. Sondage carotté n°08 caisse n°07 à une profondeur : 17,50 à 20,00 m .....	14
Figure II. 3. Exécution d'un sondage à l'aide d'une sondeuse Rolatec .....	15
Figure II. 4. Plan d'implantation des essais in-situ et sondage carotté .....	16
Figure II. 5. Coupe lithologique AA' .....	17
Figure II. 6. Coupe lithologique BB' .....	17
Figure II. 7. Coupe lithologique CC' .....	18
Figure II. 8. Coupe lithologique DD' .....	18
Figure II. 9. Coupe lithologique EE'.....	19
Figure II. 10. Résistance à la pointe (qc) en fonction de la profondeur au niveau de l'ancienne Darse N°7 .....	22
Figure II. 11. Résistance à la pointe (qc) en fonction de la profondeur au niveau du Môle d'El-Hadjar .....	23
Figure II. 12. Courbes granulométriques dans le remblai de l'ancienne Darse N°7.....	25
Figure II. 13. Courbes granulométriques dans le remblai de Môle El-Hadjar .....	26
Figure III. 1. Réalisation d'une colonne ballastée par voie humide au niveau du .....	33
Figure III. 2. Domaine d'influence pour l'étude des réseaux de colonnes ballastées.....	35
Figure III. 3. Colonne ballastées par voie Humide et Sèche .....	36
Figure III. 4. Vibreur en cours d'exécution .....	37
Figure III. 5. Schéma de réalisation des colonnes ballastée par voie humide .....	38
Figure III. 6. Approvisionnement du chantier en ballast (De la carrière d'El M'hir) .....	39
Figure III. 7. Coupe en profil du matelas de répartition .....	40
Figure III. 8. Fluage d'une colonne par manque de l'étreinte latérale .....	43

Figure III. 9. Répartition des contraintes verticales et horizontale et déformation axiale en surface d'une colonnesous une fondation souple .....	44
Figure III. 10. Répartition des contraintes verticales et horizontale et déformation axiale en surface d'une colonnesous une fondation souple .....	45
Figure III. 11. Type de rupture d'une colonne isolée chargée en tête exécutée .....	46
Figure III. 12. Interaction Sol/structure : répartition des contraintes de cisaillement le long d'une colonne ballastée courte et effet de pointe .....	47
Figure III. 13. Emplacement des planches dans le TAC .....	50
Figure IV. 1. Enregistrement des paramètres (Fiche de synthèse) .....	55
Figure IV. 2. Principe de l'essai de chargement .....	57
Figure IV. 3. Matériel utilisé dans l'essai de chargement (Port d'Alger).....	58
Figure IV. 4. Partition du TAC en zones .....	59
Figure IV. 5. Courbes des tassements à la fin de chaque palier .....	61
Figure IV. 6. Les variations des tassements de chaque palier au cours du temps .....	62
Figure IV. 7. Courbe de la vitesse des tassements en fonction de la charge appliquée.....	63
Figure IV. 8. Courbes des tassements à la fin de chaque palier .....	64
Figure IV. 9. Les variations des tassements de chaque palier au cours du temps .....	65
Figure IV. 10. Courbe de la vitesse des tassements en fonction de la charge appliquée.....	66
Figure IV. 11. Courbes des tassements à la fin de chaque palier .....	67
Figure IV. 12. Les variations des tassements de chaque palier au cours du temps .....	68
Figure IV. 13. Courbe de la vitesse des tassements en fonction de la charge appliquée.....	69
Figure IV. 14. Courbes des tassements à la fin de chaque palier .....	70
Figure IV. 15. Les variations des tassements de chaque palier au cours du temps .....	71
Figure IV. 16. Courbe de la vitesse des tassements en fonction de la charge appliquée.....	72
Figure IV. 17. Courbes des tassements à la fin de chaque palier .....	73
Figure IV. 18. Les variations des tassements de chaque palier au cours du temps .....	74
Figure IV. 19. Courbe de la vitesse des tassements en fonction de la charge appliquée.....	75
Figure IV. 20. La résistance à la pointe avant et après traitement dans l'ancienne Darse N°7 .....	77
Figure IV. 21. La résistance à la pointe avant et après traitement au niveau de .....	78

## Liste des tableaux

Tableau I. 1. Paramètres des différents modèles de la source sismique du séisme du 21/05/2003 .....	7
Tableau II. 1. Classes de terrain d'après les normes NF 94-261 et 94-262.....	24
Tableau III. 1. Différents domaines d'application des techniques de traitement en fonction de la granulométrie .....	32
Tableau IV. 1. Valeurs des charges de chaque palier de mesure.....	60
Tableau IV. 2. Valeurs des tassements en fin de chaque palier en fonction .....	61
Tableau IV. 3. Valeurs des tassements de chaque palier.....	62
Tableau IV. 4. Valeurs des tassements à la fin de chaque palier en fonction.....	63
Tableau IV. 5. Valeurs des tassements à la fin de chaque palier en fonction.....	64
Tableau IV. 6. Valeurs des tassements de chaque palier.....	65
Tableau IV. 7. Valeurs des tassements en fin de chaque palier en fonction .....	66
Tableau IV. 8. Valeurs des tassements à la fin de chaque palier en fonction.....	67
Tableau IV. 9. Valeurs des tassements de chaque palier.....	68
Tableau IV. 10. Valeurs des tassements en fin de chaque palier en fonction .....	69
Tableau IV. 11. Valeurs des tassements à la fin de chaque palier en fonction.....	70
Tableau IV. 12. Valeurs des tassements de chaque palier.....	71
Tableau IV. 13. Valeurs des tassements en fin de chaque palier en fonction .....	72
Tableau IV. 14. Valeurs de la vitesse des tassements en fonction des .....	73
Tableau IV. 15. Valeurs des tassements de chaque palier.....	74
Tableau IV. 16. Valeurs de la vitesse des tassements en fonction des .....	75

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I. Généralités</b> .....	2
I.1. Présentation de la zone d'étude .....	3
I.1.1. Situation géographique .....	3
I.1.2. HISTORIQUE .....	4
I.1.3. Aperçu Géologique .....	5
I.1.4. Sismicité en Algérie .....	7
<b>Chapitre II. Caractéristiques géotechniques et lithologiques</b> .....	10
II.1. Introduction .....	11
II.2. Essai in-situ .....	12
II.2.1. Essais au pénétromètre statique CPT .....	12
II.2.2. Sondage carottés .....	13
II.2.3. Description lithologique .....	15
II.2.4. Les essais au laboratoire .....	24
II.3. Conclusion .....	27
<b>Chapitre III. Renforcement du sol par les colonnes ballastées</b> .....	28
III.1. Introduction .....	29
III.2. Diverses techniques d'amélioration du sol .....	29
III.2.1. Plot ballasté pilonnée .....	30
III.2.2. Colonne pilonnée .....	30
III.2.3. Vibroflotation .....	30
III.2.4. Colonnes ballastées .....	31
III.3. Choix de la méthode de traitement .....	31
III.4. Traitement du sol du TAC par les colonnes ballastées .....	32
III.4.1. Objectifs des colonnes ballastées .....	33
III.4.2. Domaine d'application .....	34
III.4.3. Caractéristique des colonnes ballastées .....	34
III.4.4. Technique de mise en œuvre : Humide et Sèche .....	36
III.4.5. Mode opératoire des colonnes ballastées par voies humide .....	37
III.4.6. Choix des matériaux .....	38

III.4.7. Avantages et inconvénients des colonnes ballastées.....	40
III.4.8. Mécanismes de comportement des colonnes ballastées.....	41
III.4.9. Dimensionnement des colonnes ballastées .....	48
III.4.10. Résultats obtenus dans les planches d'essais .....	49
III.5. Conclusion .....	52
<b>Chapitre IV. Vérification du traitement.....</b>	<b>53</b>
IV.1. Introduction .....	54
IV.2. Contrôles en cours d'exécution .....	54
IV.3. Contrôles après l'exécution .....	56
IV.3.1. Contrôle de diamètre.....	56
IV.3.2. L'essai de chargement (Contrôle de portance) .....	56
IV.3.3. Essai au pénétromètre statique CPT(Contrôle de la continuité et de la compacité).....	76
IV.4. Conclusion .....	79
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>80</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>82</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>85</b>

## **Introduction générale**

Il y'a quelques années, le séisme du 21 Mai 2003 a causé des désordres au niveau du terminal à conteneur du port d'Alger. Le site était prédisposé à la liquéfaction, des tonnes de sable ont été évacuées en dehors du terminal et des tassements importants ont été enregistrés au niveau de la Darse et de Môle d'El-Hadjar.

La campagne de reconnaissance géotechnique menée à terme a permis de confirmer les résultats observés sur le site ; un renforcement du sol s'est avéré indispensable pour minimiser les dégâts, éviter la résurgence de ces phénomènes et faciliter les activités portuaires. Le choix de la technique de traitement s'est fait conformément aux résultats obtenus (nature du sol en place). La méthode des colonnes ballastées par voie humide est la plus adéquate dans notre cas.

Cette technique est largement utilisée à travers le monde, vu sa souplesse et les avantages qu'elle offre après achèvement des travaux, particulièrement en génie civile dans le cas des ouvrages situés sur des sols mous tel que le remblai.

L'objectif de ce travail est de présenter la technique utilisée pour l'amélioration de sol du terminal à conteneurs du port d'Alger, afin de pouvoir minimiser les problèmes de tassement et de liquéfaction en cas de séisme.

Le manuscrit se résume en quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** est consacré à la présentation de notre zone d'étude (le TAC) ;
- **Le deuxième chapitre** porte les caractéristiques lithologiques et géotechniques du site d'étude par l'établissement de cinq coupes corrélatives, sur la base de l'exploitation des résultats des sondages carottés ;
- **Le troisième chapitre** concerne la présentation des différentes techniques de renforcement du sol, particulièrement la technique des colonnes ballastées, les différents modes de leur mise en œuvre, les limites du domaine d'application de la technique, les mécanismes du comportement ainsi que le choix des matériaux d'apport ;
- **Le quatrième chapitre** consiste à analyser les données des essais de contrôle, afin de déterminer la capacité portante des colonnes étudiées.

Enfin, ce travail s'achève avec une conclusion présentant les principaux résultats et quelques recommandations.

# **Chapitre I. Généralités**

## I.1. Présentation de la zone d'étude

### I.1.1. Situation géographique

La baie d'Alger s'étend au débouché du bassin de la Mitidja, elle est limitée à l'Ouest par le massif de BOUZAREAH et à l'Est par le cap Matifou, au Sud par le bassin de la Mitidja et au Nord par la mer Méditerranéenne.



**Figure I. 1.** Situation géographique de la baie d'Alger  
Fond Google Earth Pro (Mars 2018)

Notre zone d'étude dont le terminal à conteneurs du port d'Alger est situé dans la partie Ouest de la baie d'Alger s'étend sur une surface de 18 hectares, elle est limitée 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 I.2).



**Figure I. 2.** Situation du site d'étude (TAC)  
Fond Google Earth (Mars 2018)

### I.1.2. HISTORIQUE

En 1830, le port offrait une superficie de 3 hectares et 50 ares avec une passe de 130 mètres de large au sud.

Il comprenait : la jetée Nord, l'actuelle grande jetée Khair-Eddine, la jetée du Sud.

La construction du bassin de l'Agha s'est faite de 1870 à 1914.

De 1914 à 1940, construction du bassin Mustapha qui est séparé du bassin de l'Agha par le grand môle Bologhine et par une passe de 100 m.

De 1950 à 1953, construction de la gare maritime à la môle El Djazair.

De 1961 à 1963, construction du môle Skikda.

De 1987 à 1988, remblayage de la darse de Calvi.

De 1994 à 1998, construction du terminal à conteneurs d'une superficie de 18 ha, constitué d'un remblai de l'ancien môle El-Hadjar et du comblement de la darse n°7 par un remblai hydraulique issue de oued El-Harrach.

### **I.1.3. 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 I. 3) [CHARAKDJI et DJENIDI, 2006, in AMARNI, 2014].

I.1.3.1. Le primaire : Il correspond à des terrains métamorphiques (gneiss, schistes, micaschistes et calcaires cristallins). Il affleure dans le massif d'Alger, à Sidi Feruch à l'Ouest et à Bordj El Bahri à l'Est en passant par Bouzaréah [BENALLAL et OURABIA, 1989].

I.1.3.2. Le Tertiaire : Il est marqué par une lacune de l'Eocène et de l'Oligocène et recouvre en discordance le socle métamorphique. Il est représenté par plusieurs formations géologiques d'âge Mio-Pliocène.

I.1.3.2.1. Le Miocène : Il est matérialisé par des grès et conglomérats très cimentés, il affleure dans le ravin de l'oued Koraich et dans la région de Ain Taya, à la base des falaises littorales [BENALLAL et OURABIA, 1989].

I.1.3.2.2. Le Pliocène inférieur (Plaisancien) : Il est formé essentiellement par des marnes bleues pouvant atteindre 1000 mètres [Glangeaud *et al*, 1952 in AMARNI, 2014].

I.1.3.2.3. 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 4 mètres mais qui peut se réduire à quelques centimètres [SAYAD et HAMGA, 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].

I.1.3.3. Le Quaternaire : Les formations du Quaternaire résultent de l'érosion de l'Atlas Tellien et de l'accumulation des produits de cette érosion dans la Mitidja et dans le Sahel. Il y a eu d'abord le dépôt de formations continentales détritiques, représentées par des sols rouges

gréso-carbonatés, et une formation de marne et cailloutis, qui est une série laguno-fluviale, comblant, en partie, le synclinorium Mitidjien. Cette formation est d'âge Sicilien [Aymé, 1964].

Puis, des terrasses marines, formées par la consolidation des dunes et des dépôts alluviaux contenant du sable, gravier, argile sableuse, conglomérats et des microconglomérats à ciment calcaire, se sont formées. Ces terrasses correspondent à quatre périodes du Quaternaire, le Calabrien, le Sicilien, le Tyrrhénien et le Versilien [DJEDIAT, 1996 in JICA 2006]. Les terrasses marines quaternaires se trouvent à 200 mètres d'altitude dans l'est d'Alger et à 325 mètres dans l'ouest [DJEDIAT, 1996 in JICA 2006].

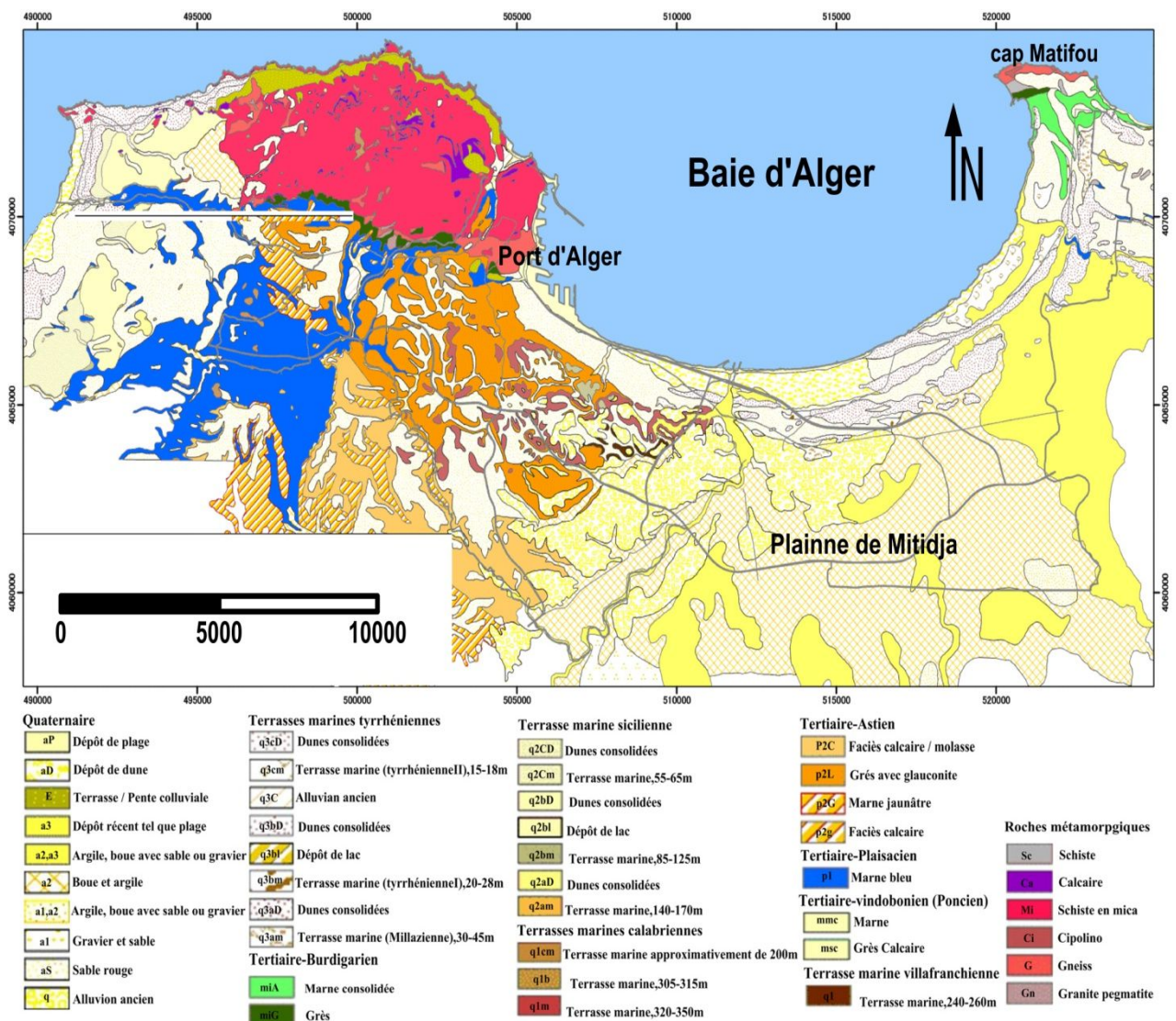


Figure I. 3. Carte géologique de la baie d'Alger et ses environs (JICA, 2006)

### I.1.4. Sismicité en Algérie

La tectonique active est localisée dans la région nord de l'Algérie à vrai dire dans l'Atlas Tellien. L'Algérie se situe sur la plaque Afrique qui est en collision avec la plaque Eurasie. Ce rapprochement entre ces deux plaques tectoniques se fait avec une vitesse de raccourcissement estimée à 5 et 6 mm/an [DOMZING A. 2006 in BENIDIR et FERNANE, 2010], et se manifeste sous forme de séismes de magnitudes importantes dont on cite le séisme majeur de Boumerdes-Zemmouri du 21 mai 2003 ( $M_w=6.8$ ).

**Tableau I. 1.** Paramètres des différents modèles de la source sismique du séisme du 21/05/2003

Ref.	$M_0$ (N.m) $10^{19}$	Rake	Dip	Strike	Z(km)	Lat. °	Long. °
<b>Yaghi</b>	2.4	86	47	54	10	3.63	36.83
<b>Delouis</b>	2.8	95	40	70	10	3.63	36.83
<b>Meghraoui</b>	2.75	88	50	54	10	3.63	36.83
<b>Semmane</b>	5.9	88	47	54	10	3.63	36.83
<b>Belabbès</b>	1.78	90	40	65	10	3.63	36.83

#### I.1.4.1. Différentes failles actives

L'activité sismique de la région algéroise est due à une série de failles actives :

- La faille du Sahel : La faille du Sahel a été interprétée comme étant une faille inverse à pendage Nord et localisée le long de la marge méridionale de l'anticlinal du Sahel. La faille se prolonge sur 63 km depuis le Mont Chenoua jusqu'à la baie d'Alger. [Géomatix, 2006, in BOUKHROUF et CHERIFI, 2012].

- La faille de Thénia : La faille de Thénia dite aussi la faille de Cap Matifou est une structure cassante d'âge Quaternaire, d'une direction  $N75^\circ$  et une longueur maximale de 73 Km. La région de Thénia n'a connu qu'un seul séisme important ( $M_s = 5,2$ ), le 16 septembre 1987. [Géomatix, 2006, in BOUKHROUF et CHERIFI, 2012].

- La faille anticlinale du Sahel : La faille anticlinale du Sahel correspond à une faille en chevauchement aveugle, localisée le long de la marge septentrionale de l'anticlinal du Sahel. Sa longueur est d'environ 41 Km. [Géomatix, 2006, in BOUKHROUF et CHERIFI, 2012].

- La faille offshore de Zemmouri : Elle fut 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 est de 0,2mm par an, et sa direction est NE-SW. La faille pourrait émerger à environ 15 kilomètres en mer. [Semane, 2005].

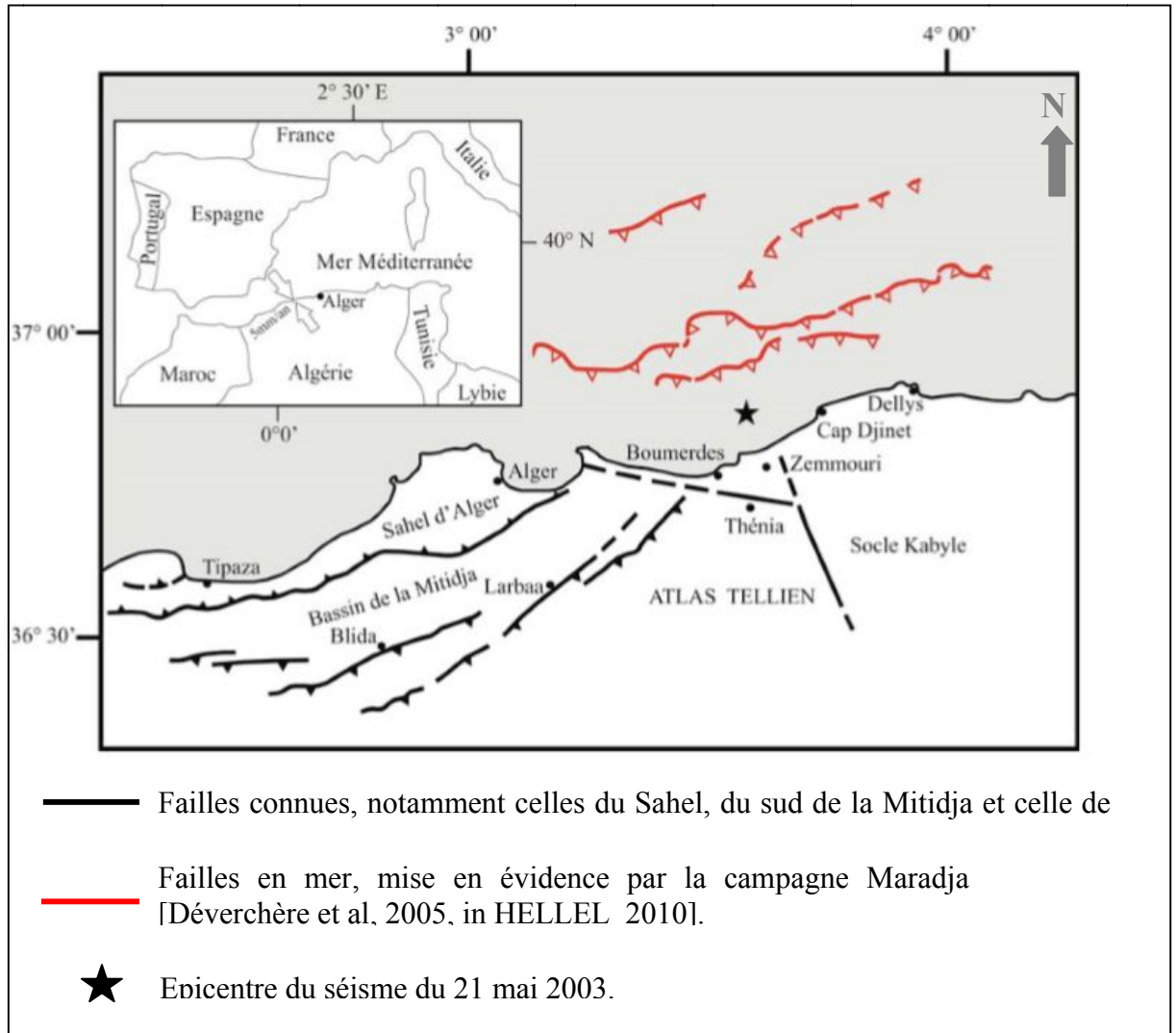
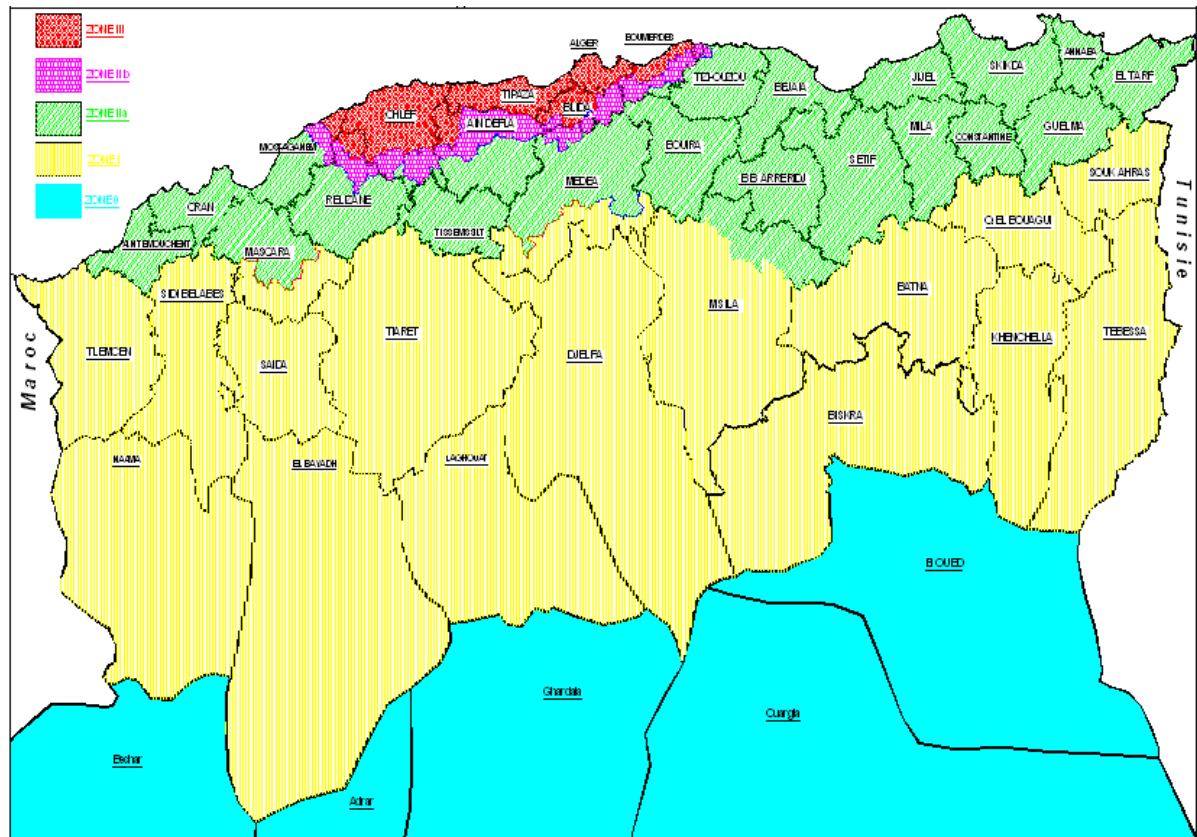


Figure I. 4. Cadre tectonique de la région d'Alger et de Boumerdès [Meghraoui, 1988]

#### I.1.4.2. CLASSIFICATION DES ZONES SISMIQUES

Après le séisme de Boumerdès (21 mai 2003), le CGS (Règles para-sismiques-Algériennes) a subdivisé le territoire en cinq (05) zones de sismicité croissante, définies sur la carte des zones de sismicité (figure I.5)

- Zone 0 : sismicité négligeable ;
- Zone 1 : sismicité faible ;
- Zone 2a et 2b : sismicité moyenne ;
- Zone 3 : sismicité élevée.



**Figure I. 5.** Classification sismique des wilayas d’Algérie (CGS, 2003)

Suivant cette figure notre zone d’étude se classe dans la zone 3, qui correspond à la zone de sismicité élevée.

Le séisme du 21 Mai 2003 a engendré, dans le terminal à conteneurs du port d’Alger au niveau de la darse n°7, le phénomène de liquéfaction, induisant un tassement dans cette zone et des déformations au niveau de môle El-Hadjar.

La réduction de ce problème et l’élimination du risque de liquéfaction ; nécessite un renforcement du sol afin d’aboutir à un meilleur aménagement du territoire qui répond aux normes internationales de la mise en place des dispositifs notamment les grands portiques sur les quais 30 et 31.

# **Chapitre II. Caractéristiques géotechniques et lithologiques**

**II.1. Introduction**

Avant d'utiliser un sol comme assise quel que soit le projet, il est important de réaliser une campagne géotechnique pour définir la nature et la géométrie des couches géologiques du sous-sol, et aussi pour connaître le comportement géotechniques de ces derniers.

La détermination des caractéristiques d'un sol nécessite la réalisation de certains essais. Ces tests peuvent être effectués de deux manières différentes :

- Au laboratoire après prélèvement d'échantillons intacts ou non remaniés.
- Au sein du massif de sol, pour un essai en place ou in situ.

Les essais permettant la détermination des caractéristiques à long terme (les essais de cisaillement consolidé drainé) sont réalisés au laboratoire sur des échantillons de sol intacts.

Le terminal à conteneurs est constitué de deux remblais distincts qui composent deux zones différentes :

- Zone 1 : un remblai utilisé pour combler l'ancienne darse n°7 dans les années 1990 (Figure II.1).
- Zone 2 : un remblai plus ancien, qui constitue le reste du terminal, notamment l'ancien môle El-Hadjar (Figure II.1).

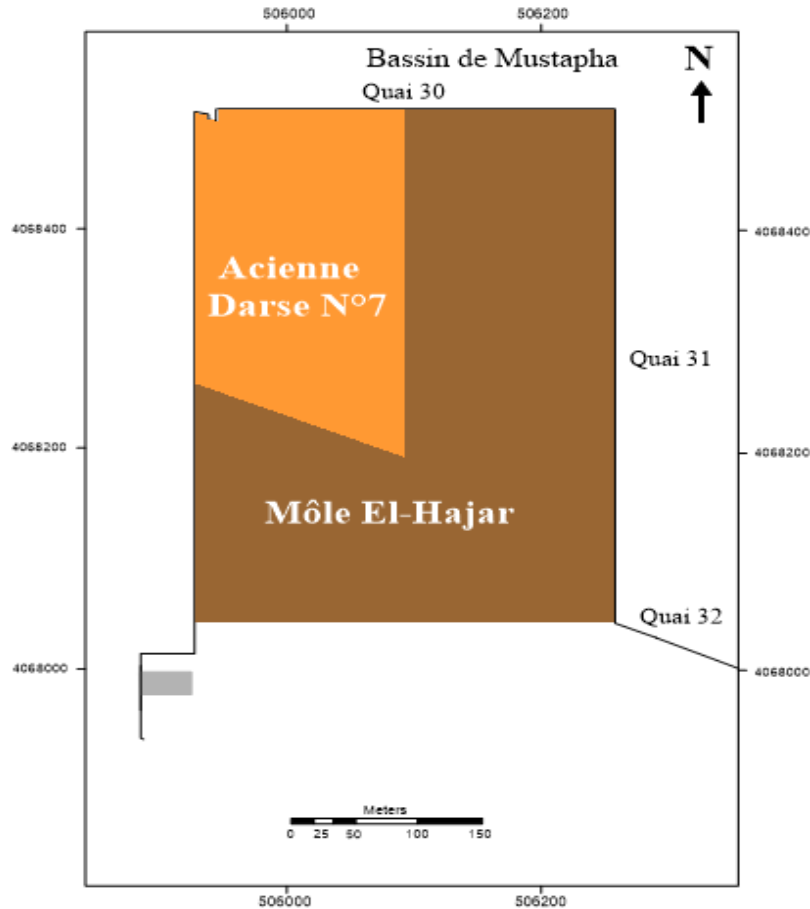


Figure II. 1. Situation de l'ancienne Darse N°7 et du Môle d'El-Hadjar dans le TAC

## II.2. Essai in-situ

### II.2.1. Essais au pénétromètre statique CPT

Cet essai in situ consiste à enfoncer un pieu muni d'un embout conique dans le sol, pendant l'avancement de la pointe à une vitesse constante. Les pointes électriques les plus utilisées ont un diamètre de 36 mm ou de 44 mm. La contrainte maximale au niveau du cône peut atteindre 100 MPa.

Deux paramètres sont accessibles pour identifier et caractériser les matériaux :

- La résistance de pointe ( $qc$ ) : elle représente la résistance unitaire limite du sol sous la pointe, elle est donnée en fonction de l'effort de la pointe  $Fp$  et de la section droite  $S$  de la pointe :

$$qc = Fp / S$$

- L'effort latéral du frottement ( $Fs$ ) : il est déduit de l'effort total de l'enfoncement par la relation suivante :

$$Fs = \frac{Ft - Fp}{S}$$

Les avantages de l'essai CPT sont les suivants :

- Son exécution est rapide, donc on peut le multiplier pour permettre une meilleure reconnaissance du sol.
- Il est parfois le seul à réaliser lorsqu'on ne peut pas extraire des échantillons intacts.
- Il donne des résultats globaux par rapport aux essais de laboratoire.

### **II.2.2. Sondage carottés**

Les sondages carottés fournissent la meilleure qualité d'échantillon permettant de caractériser à la fois la nature et l'état des sols. Ils sont indispensables pour la recherche des d'une meilleure connaissance du socle rocheux en général. Les sondages carottés permettent de visualiser les terrains traversés, de préciser avec certitude leur disposition géométrique, d'effectuer un certain nombre d'essais de laboratoire et in situ.

#### **II.2.2.1. Principe**

Pour effectuer un sondage, on doit réaliser un forage par fonçage ou battage (carottier poinçonneur) ou par rotation (carottier rotatif).

Il s'agit de découper un cylindre de terrain le plus intact possible afin de réaliser des observations et des essais représentatifs des formations en place.

Par conséquent, en fonction de l'objectif fixé de l'endroit où l'on veut prélever l'échantillon, les forages devraient être :

- Carottés en totalité (faible à moyenne couverture).
- Partiellement carottés (forte couverture).



**Figure II. 2.** Sondage carotté n°08 caisse n°07 à une profondeur : 17,50 à 20,00 m

L'échantillonnage des sols a été réalisé à l'aide de carottier simple et/ou double, de diamètres 101 mm.

La figure II.3 montre une photographie de l'appareil de forage :



**Figure II. 3.** Exécution d'un sondage à l'aide d'une sondeuse Rolatec

### **II.2.3. Description lithologique**

A partir des résultats des sondages carottés et de l'essai CPT réalisés par le laboratoire INZAMAC au niveau du TAC du port d'Alger, nous avons analysé la composition du sol du terminal et étudié la géométrie des couches. Ceci nous a permis d'identifier les différentes unités lithologiques et leurs résultats sont représentés sur cinq coupes lithologiques corrélatives (Figure II.5, II.6, II.7, II.8, II.9), sur lesquelles sont également portés les résultats de l'essai CPT, suivant un plan d'implantation (Figure II.4).

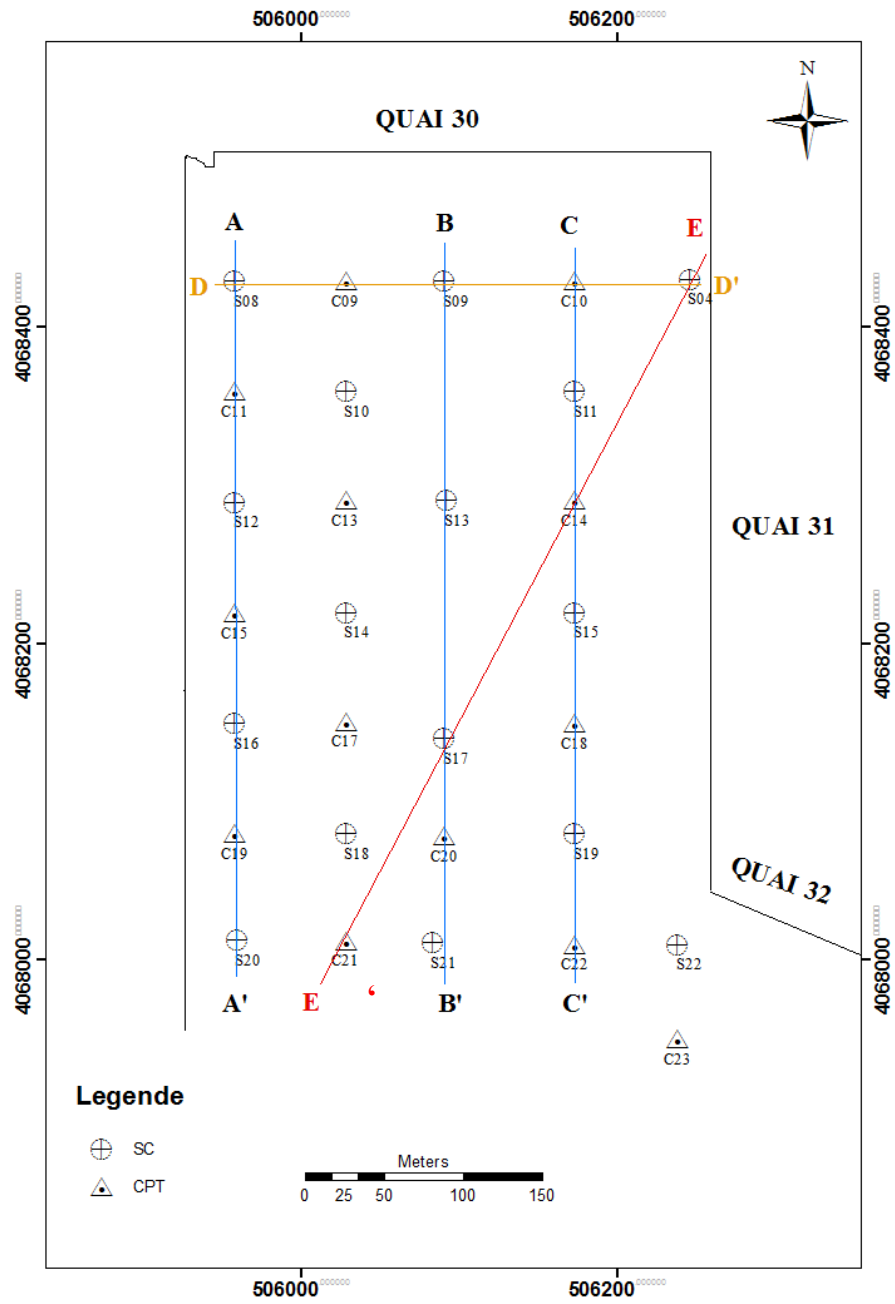


Figure II. 4. Plan d'implantation des essais in-situ et sondage carotté

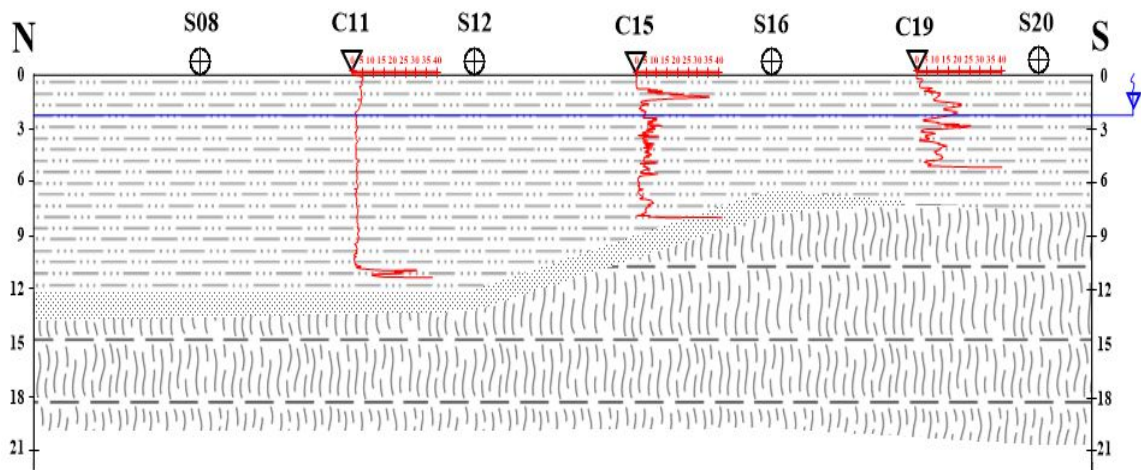


Figure II. 5. Coupe lithologique AA'

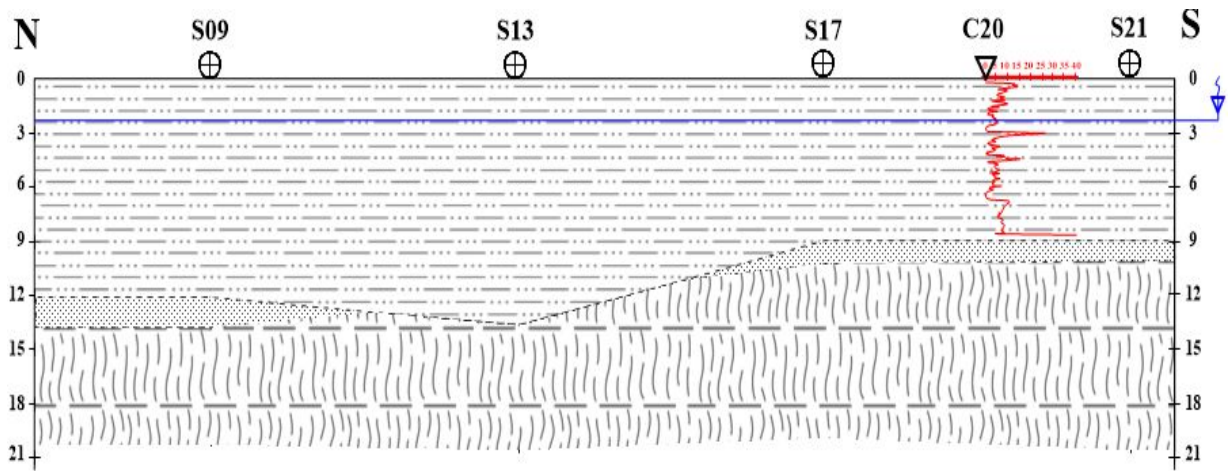


Figure II. 6. Coupe lithologique BB'

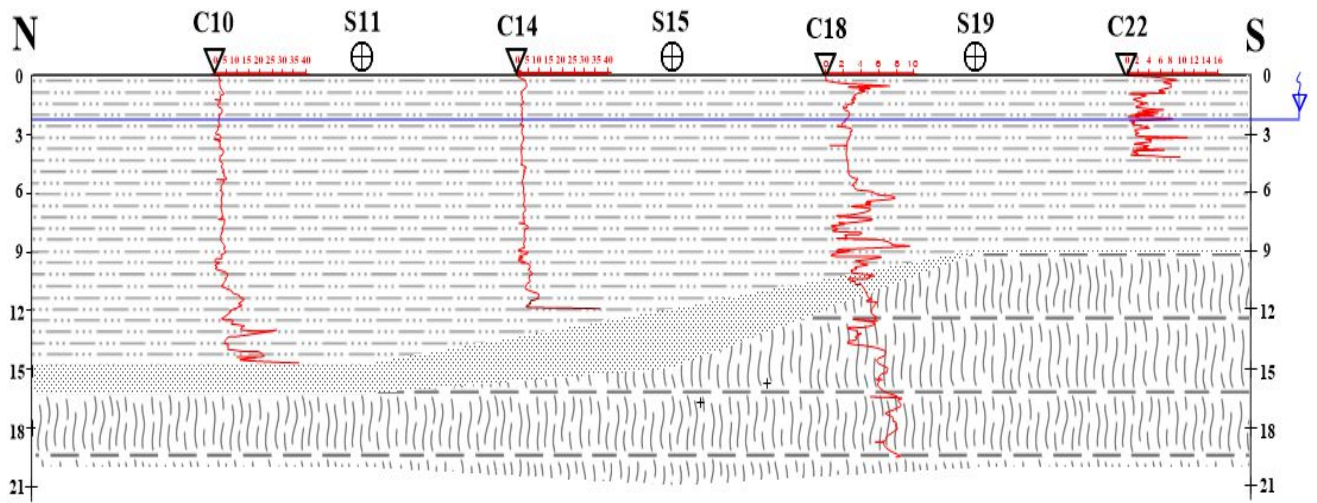


Figure II. 7. Coupe lithologique CC'

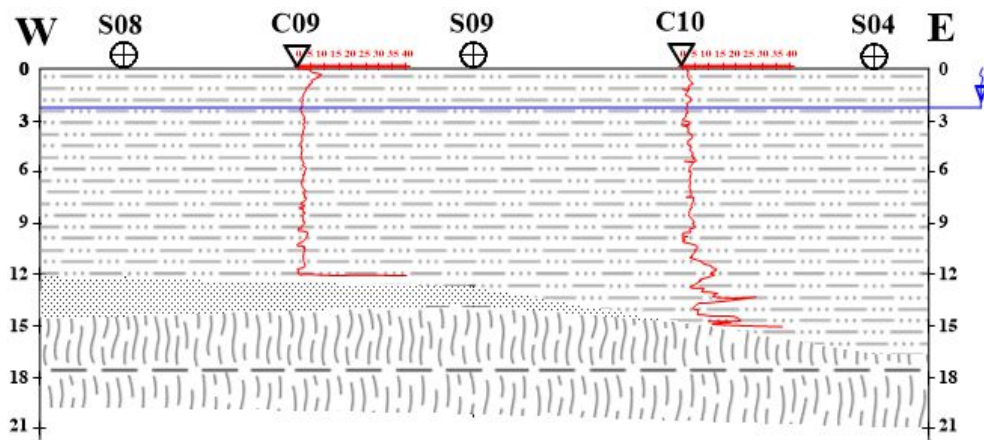


Figure II. 8. Coupe lithologique DD'

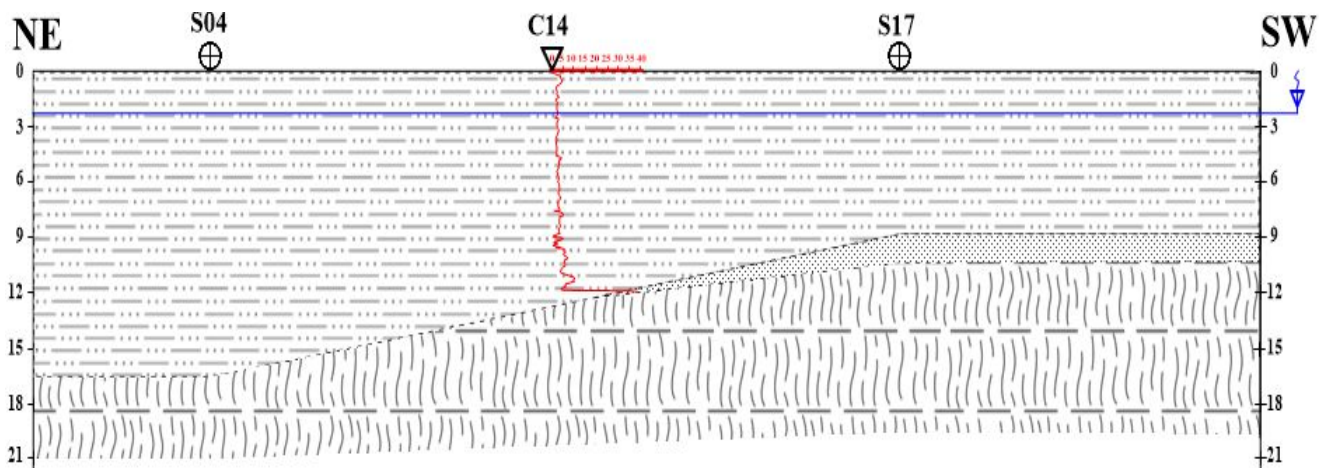
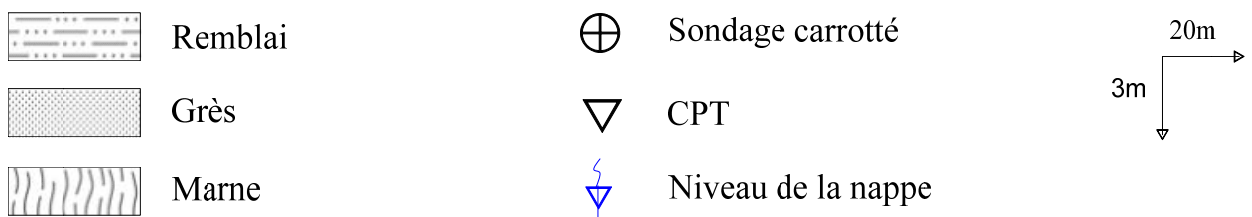


Figure II. 9. Coupe lithologique EE'

**Légende:**



**II.2.3.1. Coupes lithologiques corrélatives**

**Coupes lithologiques Nord, Sud**

Trois coupes corrélatives Nord-Sud réalisés : AA', BB' et CC', représentent les résultats de l'essai CPT (la résistance à la pointe) ainsi que les résultats des sondages carottés réalisés au niveau du terminal à conteneur du port d'Alger, qui ont permis de définir de haut en bas la succession lithologique suivante :

Coupe AA'

Une épaisse couche de remblai au Nord qui atteint une profondeur de 12 mètre, et diminue jusqu'à 7 mètre en allant vers le sud.

Une couche de gré de 2,5 mètre d'épaisseur diminue en allant vers le sud jusqu'à l'absence totale de cette couche au Sud.

Une unité de marne d'une profondeur qui varie du Nord au Sud, dont on trouve cette unité à 14,60 mètre au Nord et à 7,65 mètre au Sud.

#### Coupe BB'

Présence d'une épaisse couche de remblai de 12 mètre de profondeur au Nord et de 9 mètre de profondeur au Sud.

Une couche de grés moyennement mince aux extrémités Nord et Sud, mais totalement absente au milieu de cette coupe.

Présence d'une unité de marne à 13 mètre de profondeur au Nord, cette profondeur diminue en allant vers le Sud pour atteindre 10 mètre à cette extrémité.

#### Coupe CC'

Couche de remblai épaisse atteignant une profondeur de 14,6 mètre au Nord, cette épaisseur diminue du Nord au Sud jusqu'à arriver à 9 mètre au Sud.

Une couche de grés présente sur l'étendu de la coupe avec une épaisseur moyenne de 2 mètre, elle est épaisse au centre et mince aux extrémités.

Une couche de marne d'une profondeur qui varie du Nord au Sud, dont on trouve cette unité à 16,40 mètre au Nord et à 11,5 mètre au Sud.

### **Coupe lithologique Ouest-Est**

#### Coupe DD'

Une coupe corrélative Ouest-Est (DD'), représente les résultats de l'essai CPT (la résistance à la pointe) ainsi que les résultats des sondages carottés réalisés au niveau du TAC qui ont permis de définir de haut en bas la succession lithologique suivante :

La présence d'une couche de remblai, plus ou moins épaisse sur l'étendu de la coupe, avec une profondeur atteignant 12,80 mètre à l'Ouest et à 16,70 mètre à l'Est.

Une couche de grés d'une épaisseur moyenne de 2 mètre présente à l'ouest et au centre, celle-ci absente à l'Est.

Unité de marne qui augmente en allant de l'Ouest vers l'Est, son toit se trouve à une profondeur de 14,60 mètre à l'Ouest et à 16,70 mètre à l'Est.

**Coupe lithologique Nord-Est, Sud-Ouest***Coupe EE'*

Une coupe corrélatrice Nord-Est, Sud-Ouest (EE'), représente les résultats de l'essai CPT (la résistance à la pointe) ainsi que les résultats des sondages carottés réalisés au niveau du TAC, qui ont permis de définir de haut en bas la succession lithologique suivante :

Couche de remblai profonde au Nord-Est arrive jusqu'à 16,70 mètre, et diminue en allant vers le Sud-Ouest pour atteindre 9 mètre à cette extrémité.

Une couche de grès présente au milieu de la coupe avec une très mince épaisseur, qui marque une petite augmentation avant de se stabiliser au Sud-Ouest.

Une unité de marne présente tout au long de la coupe, à 17 mètre de profondeur au Nord-Est et à 10,30 mètre au Sud-Ouest.

D'après l'analyse des résultats obtenus, on constate que le bon sol se situe dans une profondeur moyenne entre 11 m et 15 m.

**II.2.3.2 Résultats de l'essai au pénétromètre statique CPT**

Au niveau de l'ancienne darse n°7, les courbes montrent que la valeur moyenne de la résistance à la pointe est à l'ordre de 2,5 MPa ; la valeur la plus extrême obtenue est de 10 MPa.

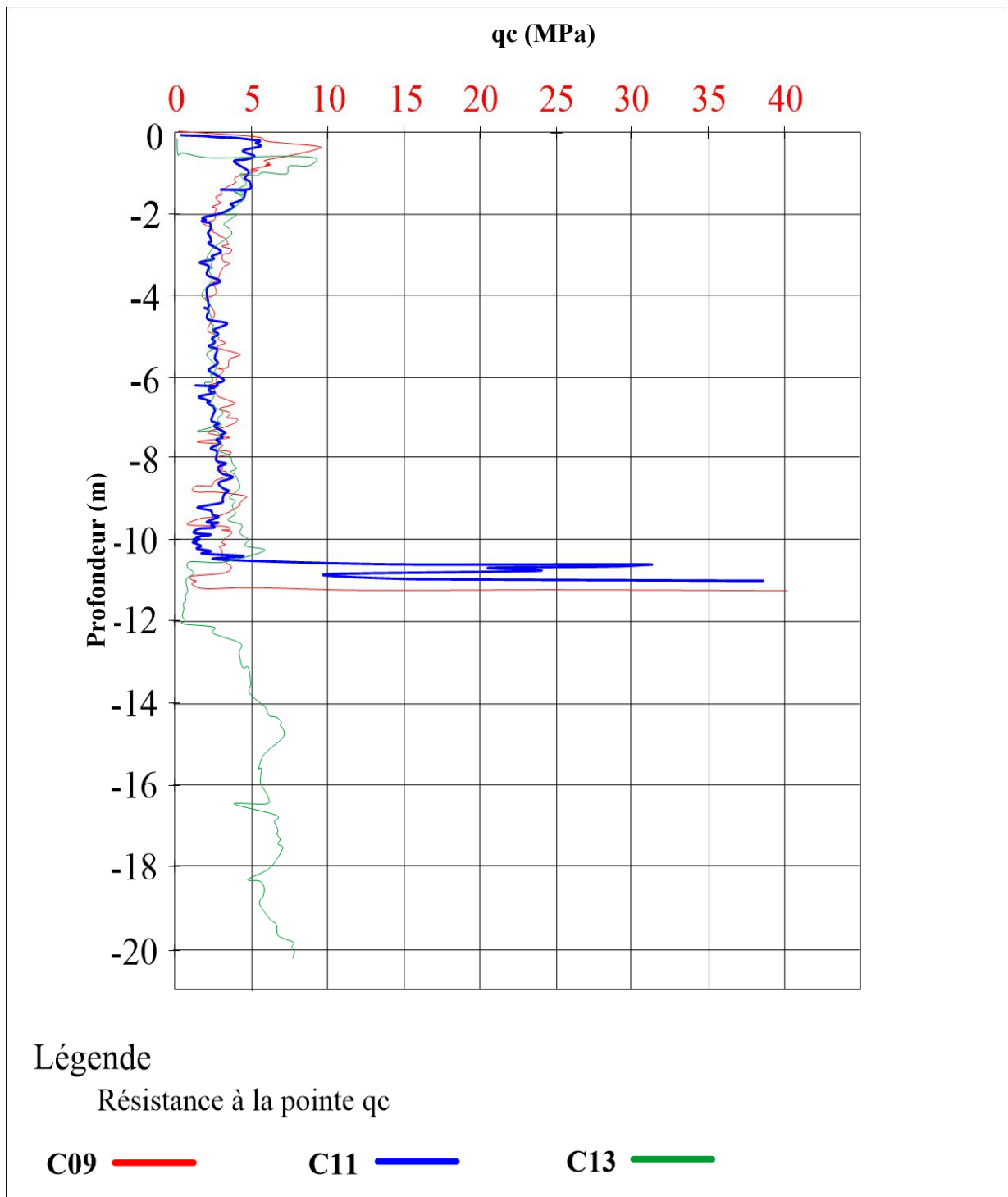


Figure II. 10. Résistance à la pointe ( $q_c$ ) en fonction de la profondeur au niveau de l'ancienne Darse N°7

Au niveau du môle El-Hadjar les courbes montrent une résistance à la pointe ( $q_c$ ) moyenne de l'ordre de 4 MPa. Certaines courbes présentent des pics allant de 10 à 35 MPa.

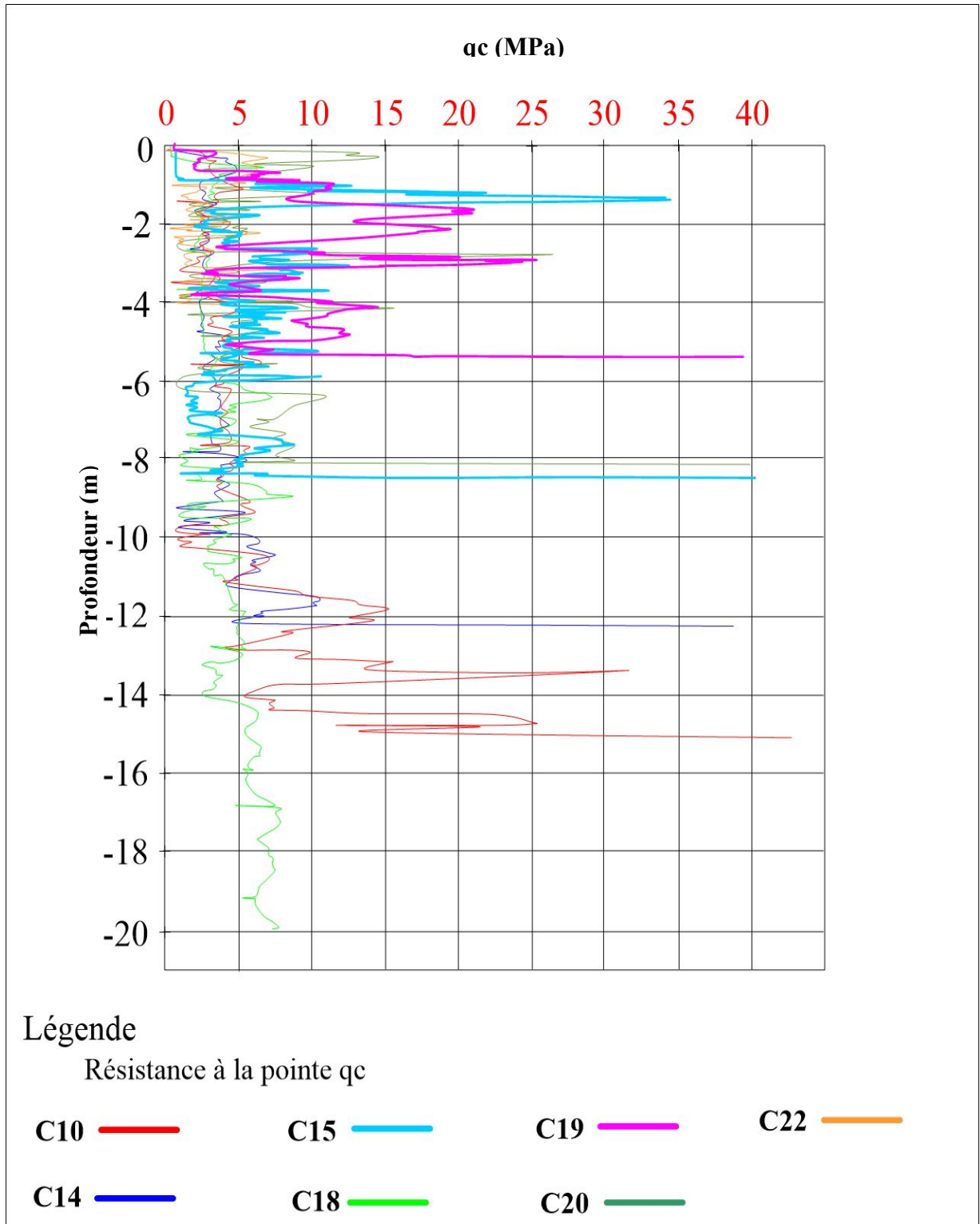


Figure II. 11. Résistance à la pointe ( $q_c$ ) en fonction de la profondeur au niveau du Môle d'El-Hadjar

**Tableau II. 1.** Classes de terrain en fonction de la résistance à la pointe d’après les normes NF 94-261 et 94-262

Classes de terrain		qc (MPa)
<b>Argiles et limons</b>	Très mous à mous	<1,0
	Fermes	1 à 2,5
	Raides	2,5 à 4
	Très fermes	≥4
<b>Sables et graves</b>	Très lâches	<1,5 /
	Lâches	1,5 à 4
	Moyennement denses	4 à 10
	Denses	10 à 20
	Très denses	>20
<b>Marnes et calcaire marneux</b>	Tendres	<5
	Raides	5 à 15
	Compactes	>15

Selon les normes NF 94-261 et NF94-262 le sol au niveau :

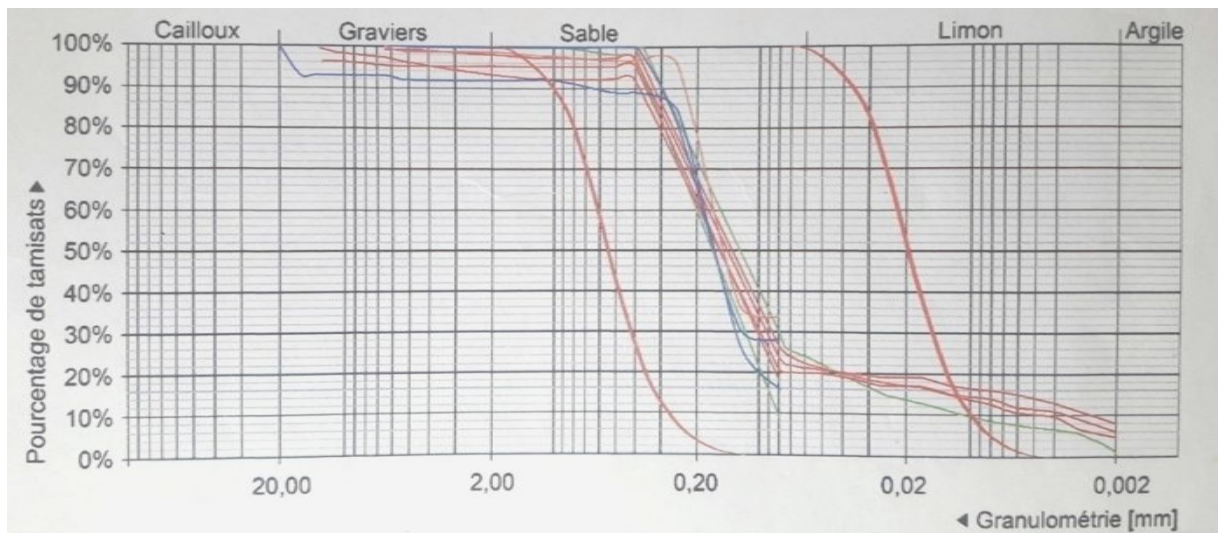
- de l’ancienne Darse N°7, est classé comme étant un sol lâche dans l’ensemble ;
- du Môle El-Hadjar, est classé comme étant un sol lâche à moyennement dense.

**II.2.4. Les essais au laboratoire**

**Au niveau de l’ancienne darse N°7**

D’après les sondages carottés effectués dans cette zone, on constate que ce remblai a une épaisseur moyenne de 12 mètre de profondeur, il est formé par un sable lâche argilo-limoneux, et un peu de gravier.

Des essais effectués sur ces échantillons permis de déterminer les caractéristiques suivantes (INZAMAC in AMARNI 2014):



**Figure II. 12.** Courbes granulométriques dans le remblai de l'ancienne Darse N°7

(INZAMAC in BAKEL O. et HAMZA M. 2017)

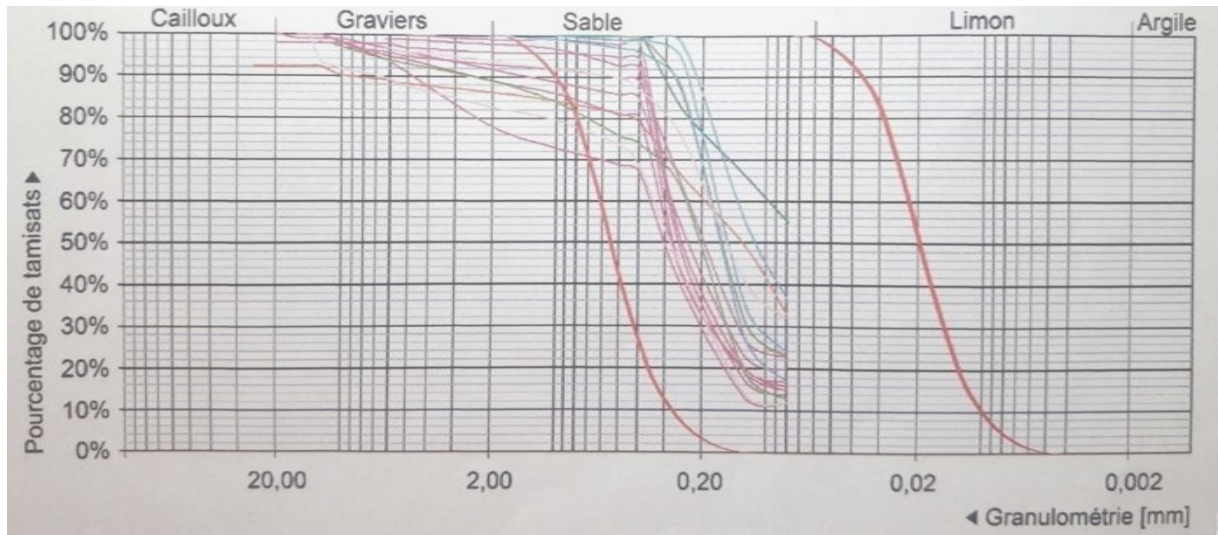
- La figure ci-dessus qui représente les résultats granulométriques des échantillons analysés, montre que la granulométrie a un fuseau très étroit donc la couche de remblai est homogène ;
- La teneur en eau  $\omega$  varie entre 19,2% et 25% avec une moyenne de **21,8%** ;
- La densité saturée  $\gamma_{sat}$  est comprise entre 1,95 t/m<sup>3</sup> et 2,1 t/m<sup>3</sup> et une valeur moyenne de **2 t/m<sup>3</sup>**, ainsi que la densité sèche  $\gamma_d$  est entre 1,55 t/m<sup>3</sup> et 1,81 t/m<sup>3</sup> avec une valeur moyenne de **1,7 t/m<sup>3</sup>**. Ceci nous permet d'affirmer que ce sol est moyennement dense (Annexe 2) ;
- Ce sol est classé comme étant un sol perméable à l'eau cela a été estimé avec l'emploi de la formulation de Hazen  $k = 100 \cdot D_{10}^2$  (cm/s), avec  $D_{10}$ : la dimension des particules qui correspond à 10% de la courbe granulométrique en cm, où  $k = \mathbf{1,22 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}}$ . (AFNOR 2006 in AMARNI 2014) ;
- La résistance au cisaillement obtenue au niveau de Môle El-Hadjjar varie entre un minimum de 63,86 Kpa et un maximum de 131,99 Kpa avec une moyenne de 100,88 Kpa ;
- Les mesures de compressibilité à l'odomètre ont donné les valeurs suivantes :

Indice de compression  $C_c = \mathbf{0,07}$ , ce qui révèle un sol peu compressible (Annexe 2) ;

Coefficient de gonflement  $C_g = \mathbf{0,005 \%}$ , cela nous permet de dire que ce sol est non gonflant (Selon Sanglerat) (Annexe 2).

## Au niveau de Môle El-Hadjar

- Les résultats granulométriques obtenus sur des échantillons analysés et prélevés dans une couche d'épaisseur d'une profondeur moyenne de 14 mètres, présentent un sol fin avec une proportion des particules fines varie entre 9% et 43% avec une moyenne de **19,3%**.



**Figure II. 13.** Courbes granulométriques dans le remblai de Môle El-Hadjar  
(INZAMAC in BAKEL O. et HAMZA M. 2017)

- D'après la figure ci-dessus, les courbes granulométriques montrent que le remblai de cette zone se forme de deux groupes, l'un dont les granulométries sont dans un fuseau étroit, et l'autre contenant un pourcentage considérable de gravier et de cailloux 22% à 49% ;
- La teneur en eau  $\omega$  varie entre 9% et 19,9% avec une moyenne de **24,2%** ;
- La densité saturée  $\gamma_{sat}$  est comprise entre 1,83 t/m<sup>3</sup> et 2,12 t/m<sup>3</sup> avec une valeur moyenne de **2 t/m<sup>3</sup>**, aussi la densité sèche  $\gamma_d$  est entre 1,63 t/m<sup>3</sup> et 1,83 t/m<sup>3</sup> avec une valeur moyenne de **1,8 t/m<sup>3</sup>**. Ceci nous permet de dire que ce sol est moyennement dense (Annexe 2) ;
- La résistance au cisaillement obtenue au niveau de Môle El-Hadjar varie entre un minimum de 63,86 Kpa et un maximum de 131,99 Kpa avec une moyenne de 100,88 Kpa ;
- Les mesures de compressibilité à l'odomètre ont affiché les valeurs suivantes :

Indice de compression  $C_c = 0,06\%$ , ce qui révèle un sol peu compressible ;

Coefficient de gonflement  $C_g = 0,0033 \%$ , cela nous permet de dire que ce sol est non gonflant Selon (Sanglerat) (Annexe 2).

### **II.3. Conclusion**

Le sol constituant le TAC est formé d'un sol anthropique (remblai) et un sol en place (marne et grès). Une nappe d'eau a été identifiée dans tout le terminal à 2,3 mètre de profondeur.

D'après l'analyse des caractéristiques géotechniques, on constate que les résultats médiocres sont marqués au niveau des remblais, ce qui nous a permis de dire que ces résultats sont la cause primaire des problèmes d'instabilité de la zone d'étude, donc un renforcement du sol s'avère nécessaire afin d'améliorer l'ensemble du TAC.

# **Chapitre III. Renforcement du sol par les colonnes ballastées**

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre on abordera les différentes techniques d'amélioration des sols de mauvaises qualités géotechniques, précisément la technique des colonnes ballastées, avec laquelle ils ont traité le TAC (terminal a conteneur du port d'Alger). Ces différentes méthodes d'amélioration répondent à des contraintes techniques liées aux caractéristiques géotechniques des sols en place, et parmi les objectifs généraux qui sont attendus d'une amélioration de sol sont :

- L'obtention d'un drainage radial efficace assurant la consolidation ;
- Résistances au cisaillement ;
- Diminution des tassements.

### III.2. Diverses techniques d'amélioration du sol

Les inclusions souples, au sens le plus large du terme, ont été élaborées afin de permettre l'amélioration des sols de mauvaises qualités géotechniques. Le fait d'incorporer et de compacter un matériau ayant des caractéristiques géotechniques supérieures au sol en place entraîne un renforcement de ce dernier.

Il existe plusieurs techniques pour la réalisation d'inclusions souples que ce soit par la chute libre d'énormes masses (plots ballastés pilonnés), par fonçage ou battage d'un tube obturé provisoirement ou ouvert à sa base (colonnes pilonnées), ou par la descente d'un vibreur en utilisant un fluide (air ou eau) de lançage (colonnes ballastées). Ces techniques permettent, soit d'excaver une partie du sol en place, soit de le refouler latéralement afin d'améliorer globalement ou ponctuellement ses caractéristiques géotechniques.

Ces techniques sont nombreuses (selon l'ASEP-GI, 2004 in DHOUIB A. 2005) ; alors celles qui sont susceptibles d'être appliquées dans le TAC sont :

- technique d'amélioration du sol en masse (densification des sols grenus, compactage dynamique, vibrofoltation, compactage statique en profondeur, pré-chargement par le vide) ;
- injection des sols grenus et des sols fins ;
- amélioration des sols par inclusions verticale (colonnes ballastées).

**III.2.1. Plot ballasté pilonnée**

Le principe de cette technique est le renforcement du sol cohérent compressible par la création de colonnes, jusqu'à environ 8 m de profondeur, de 2 à 3 mètres de diamètre.

La mise en œuvre s'effectue à l'aide d'une grue à chenille, Les plots ballastés vont pénétrer dans le sol par pilonnage, à l'aide d'une masse de 15 à 30 tonnes, en chute libre de 10 à 30 mètres. L'emplacement du plot est préparé par une pré-excavation qui va être partiellement remplie d'un bouchon de matériaux que le pilonnage fera descendre à la profondeur voulue. Le plot est ensuite rechargé puis compacté par phases successives. [CORNEILLE S. 2007].

**III.2.2. Colonne pilonnée**

Ce type de colonne fait appel à une technique utilisée pour les colonnes de sable. La procédure de construction consiste à faire pénétrer dans le sol, par battage, fonçage ou vibro-fonçage, un tube métallique, provisoirement obturé ou ouvert à sa base, puis à compacter, en utilisant un pilon, un mélange de sable et de ballast préalablement déversé dans le tube. [CORNEILLE S. 2007]

Si le tube est fermé à sa base, le terrain est alors refoulé lors de la pénétration du tube, sinon, le terrain doit être extrait par forage avant l'introduction et le pilonnage du ballast. L'effet bénéfique de ce mode de mise en œuvre des colonnes provient du fait que le trou formé ne peut s'affaisser compte tenu de la présence permanente du tube. Cependant, les vibrations induites lors du battage ou fonçage du tube et du pilonnage du ballast ne permettent pas l'utilisation de cette méthode de construction dans des argiles sensibles.

**III.2.3. Vibroflotation**

Cette technique qui est appelée aussi vibrocompaction est employée afin de densifier les sols pulvérulents lâches, elle s'applique aux sols granulaires non-cohérents tels que le sable et graviers, consiste à introduire verticalement dans le sol un générateur de vibrations entre tenues qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense.

Cette technique est couramment mise en œuvre à très grande échelle pour le compactage de terre-pleins en sable gagnés sur la mer par remblaiement hydraulique. [BAKEL O. et HAMZA M. 2017]

**III.2.4. Colonnes ballastées**

Cette technique est l'extension de la vibroflotation aux terrains qui comportent des couches limoneuses ou argileuses dont les éléments ne peuvent être réarrangés par la vibration, elle est employée afin d'introduire un matériau granulaire (ballast) dans des sols cohérents car le ballast a de meilleures caractéristiques mécaniques que le sol. Le fait d'incorporer et de compacter un matériau ayant des caractéristiques géotechniques supérieures au sol en place entraîne un renforcement de ce dernier, les colonnes sont constituées de matériaux granulaires, non cohérents mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes successives remontantes. On cite différents types de matériaux qui sont utilisées pour réaliser un système de fondation superficielles et profondes (ballast ; gravier ; mélanges sol-ciment et tous types de mortier ou béton). [NOUI A. 2012].

**III.3. Choix de la méthode de traitement**

Les techniques d'amélioration du sol ne sont pas utilisées aléatoirement, il existe des domaines d'utilisation qui convient à chaque méthode, par référence aux classes granulométrique et à l'état de sol.

Le tableau ci-dessous montre les différents domaines d'application des techniques de traitement en fonction de la granulométrie de la résistance à la pénétration de la pointe (qc).

Tableau III. 1. Différents domaines d'application des techniques de traitement en fonction de la granulométrie

Méthode	Types de sol					
	Matériaux évolutifs	Argiles très molles	Argiles-limons	Remblais fins	Sables/gravie	Cailloux remblais à bloc
Amélioration de sols dans la masse	PRECHARGEMENT + DRAINAGE					
				VIBROCOMPACTAGE		
				COMPACTAGE DYNAMIQUE		
				INJECTION SOLIDE		
Renforcement des sols par inclusions souples		COLONNES BALLASTÉES				
		PLOTS BALLASTÉES PILONNES (épaisseur < 5 m)				
Renforcement des sols par inclusions et éléments rigides		.. DE TYPE PIEUX A REFOULEMENT / SANS REFOULEMENT et JET GROUTING				
		... DE TYPE COLONNE DEEP SOIL MIXING				

#### III.4. Traitement du sol du TAC par les colonnes ballastées

Cette technique d'amélioration du sol est utilisée dans le monde entier y compris en Algérie. Puisque le terminal à conteneur du port d'Alger a subi des phénomènes de liquéfaction et de tassement, la technique d'amélioration et de renforcement des sols par les colonnes ballastées était choisie pour minimiser les risques de ces phénomènes.



**Figure III. 1.** Réalisation d'une colonne ballastée par voie humide au niveau du TAC du port d'Alger

#### III.4.1. Objectifs des colonnes ballastées

Le traitement d'un sol par les colonnes ballastées consiste à incorporer dans le sol un matériau granulaire constitué de ballast afin d'obtenir un milieu ayant des caractéristiques globales meilleures. Cette technique a pour objectifs :

- Amélioration de la portance de sol ;
- Réduire le tassement mais il permet aussi d'accélérer la consolidation du sol par le fort caractère drainant du matériau des colonnes ;
- Homogénéisation de la caractéristique géotechnique ;
- Contribuer à la stabilité générale du remblai ;
- Minimiser le risque de liquéfaction dans les zones sismique.

### III.4.2. Domaine d'application

Les domaines d'application des colonnes ballastées sont variés et ont évolué au cours des années en fonction des évolutions technologiques. Le renforcement de sol trouve une application dans tous les domaines de la construction.

La liste suivante, bien que exhaustive, rend compte de la variabilité des applications :

#### III.4.2.1. Ouvrages

- ✓ Ouvrages hydrauliques ;
- ✓ Bâtiments industriels et commerciaux ;
- ✓ En génie civil (routes, remblais, ouvrages d'art, murs de soutènement) ;
- ✓ Plateforme portuaire ;
- ✓ Sous fondation superficielle bâtiments ;
- ✓ Pistes d'aéroport.

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

- Fondation souple ;
- Fondation rigide.

#### III.4.2.2. Utilisation en zones sismique

Il est aussi possibles d'utiliser les colonnes ballastées en zones sismique parce qu'elles peuvent réduire le phénomène de liquéfaction et améliorer la résistance au cisaillement.

#### III.4.2.3. Limites d'utilisation

Les colonnes ballastées ne doivent pas être utilisées dans des terrains présentant des risques de perte dans le temps d'une manière générale, notamment les sols présentant une perte au feu supérieur à 5%.

### III.4.3. Caractéristique des colonnes ballastées

#### III.4.3.1. La longueur

D'une façon générale, les longueurs des colonnes ballastées sont plus importantes en mer qu'à terre. Dans le cas des ouvrages marins, les colonnes ballastées atteignent souvent 10 à 30 m ; dans le cas des ouvrages terrestres, les profondeurs de traitement sont variables mais restent en moyenne autour de 8 à 10 m, sans excéder 20 à 25 m.

### III.4.3.2. Le diamètre

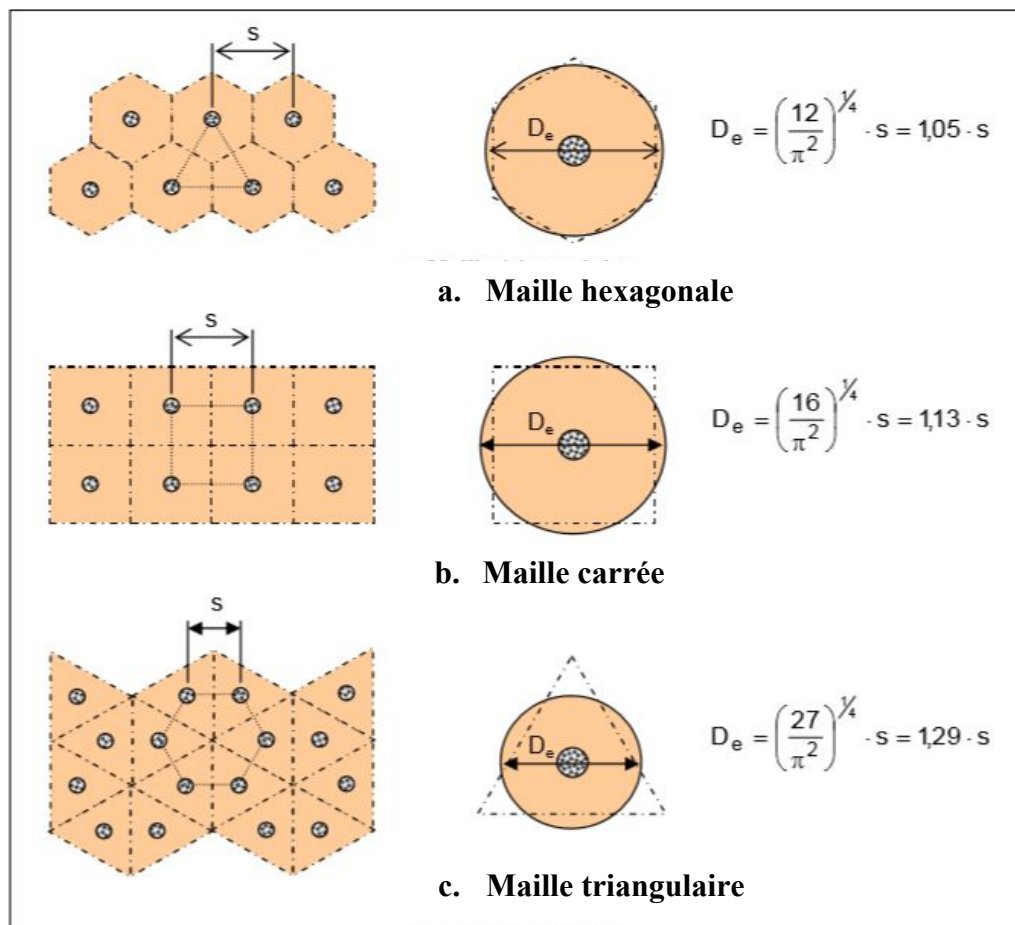
Le diamètre des colonnes ballastées dépend :

- De l'outil utilisé et de l'adéquation de ce choix au terrain rencontré ;
- Des terrains traversés et de leurs caractéristiques ;
- Energie de compactage.

### III.4.3.3. Maillage

L'espacement des points de compactage détermine les propriétés du sol à la profondeur traitée. Le procédé doit assurer une incompressibilité et une résistance adéquates pour un espacement maximal et donc un cout minimal. En pratique, les colonnes ballastées sont disposées (Figure III. 2):

- Selon un maillage hexagonal ;
- Selon un maillage carré ;
- Selon un maillage triangulaire.



**Figure III. 2.**Domaine d'influence pour l'étude des réseaux de colonnes ballastées

(CFMS in BAKEL O. et HAMZA M. 2017)

Suivant le type de maille retenue, la figure III.2 définit les diamètres des domaines d'influence équivalents choisis le plus souvent cylindriques par commodité de calcul. Le diamètre 'De' de la cellule représente donc le diamètre d'influence de la colonne.

#### III.4.4. Technique de mise en œuvre : Humide et Sèche

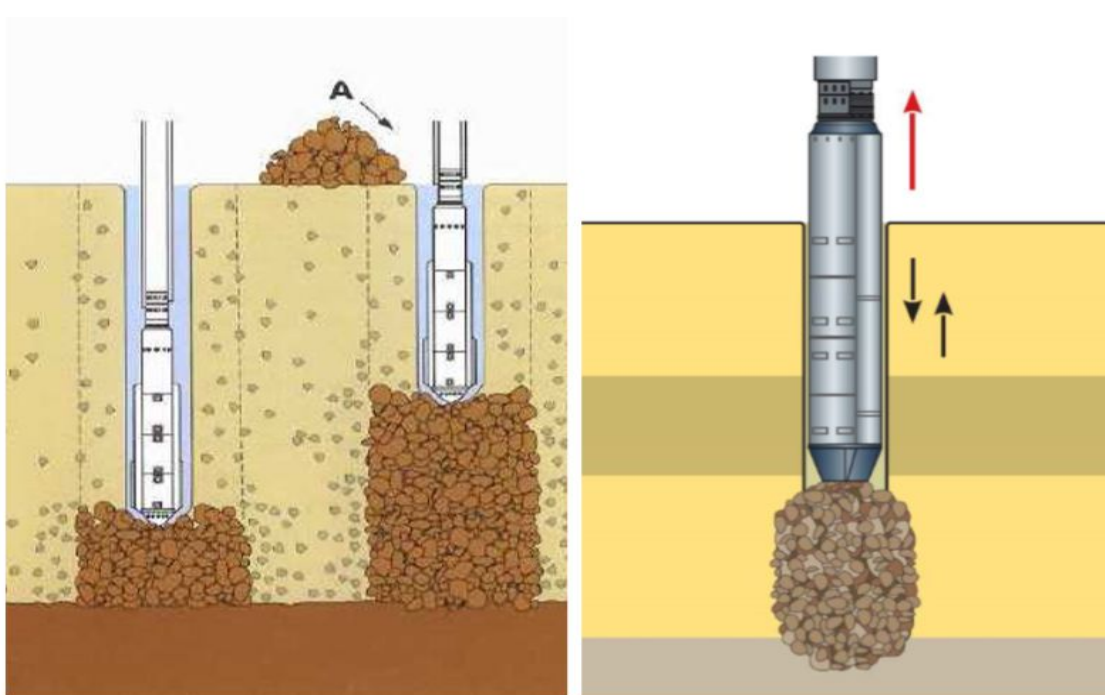
Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes successives. Les colonnes ballastées sont mises en œuvre par (Figure III.3) :

- voie humide, dite aussi par vibro-substitution (vibro-replacement);
- voie sèche, dite encore par vibro-refoulement (vibro-displacement).

Le choix de l'outil, de ses caractéristiques et de la méthode de réalisation dépend étroitement :

- De la nature et de l'état de saturation du sol ;
- Du but recherché ;
- Des caractéristiques des matériaux d'apport.

En général, la voie humide (fluide de lancement est de l'eau) est associée à une mise en œuvre du gravier à partir du haut du forage, et la voie sèche (fluide de lancement est de l'air) est associée à une mise en œuvre à partir du pied du forage.



Voie humide

Voie sèche

**Figure III. 3.** Colonne ballastées par voie Humide et Sèche

Dans notre cas la technique de mise en œuvre adéquate est celle des colonnes ballastées par voie humide (Figure III.4).



**Figure III. 4.** Vibreur en cours d'exécution  
(Lançage à l'eau et réalisation du forage)

#### **III.4.5. Mode opératoire des colonnes ballastées par voies humide**

##### *1- Préparation :*

La machine est mise en station au-dessus du point de fonçage, et se stabilise sur ses vérins.

##### *2- Fonçage :*

Le vibreur descend lentement, en refoulant latéralement le sol jusqu'à la profondeur prévue (identifiée par l'enregistreur en temps réel sous forme d'augmentation instantanée de la consommation du courant du vibreur), sous l'effet de son propre poids. La vitesse de descente est variable d'un sol à l'autre où elle est relativement rapide dans les sols sableux et limoneux par rapport aux terrains argileux ou vaseux ;

### 3- Remplissage :

Après avoir atteint la profondeur de traitement, on remonte progressivement le vibreur pour bien nettoyer l'espace annulaire autour du vibreur.

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

### 4- Compactage :

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

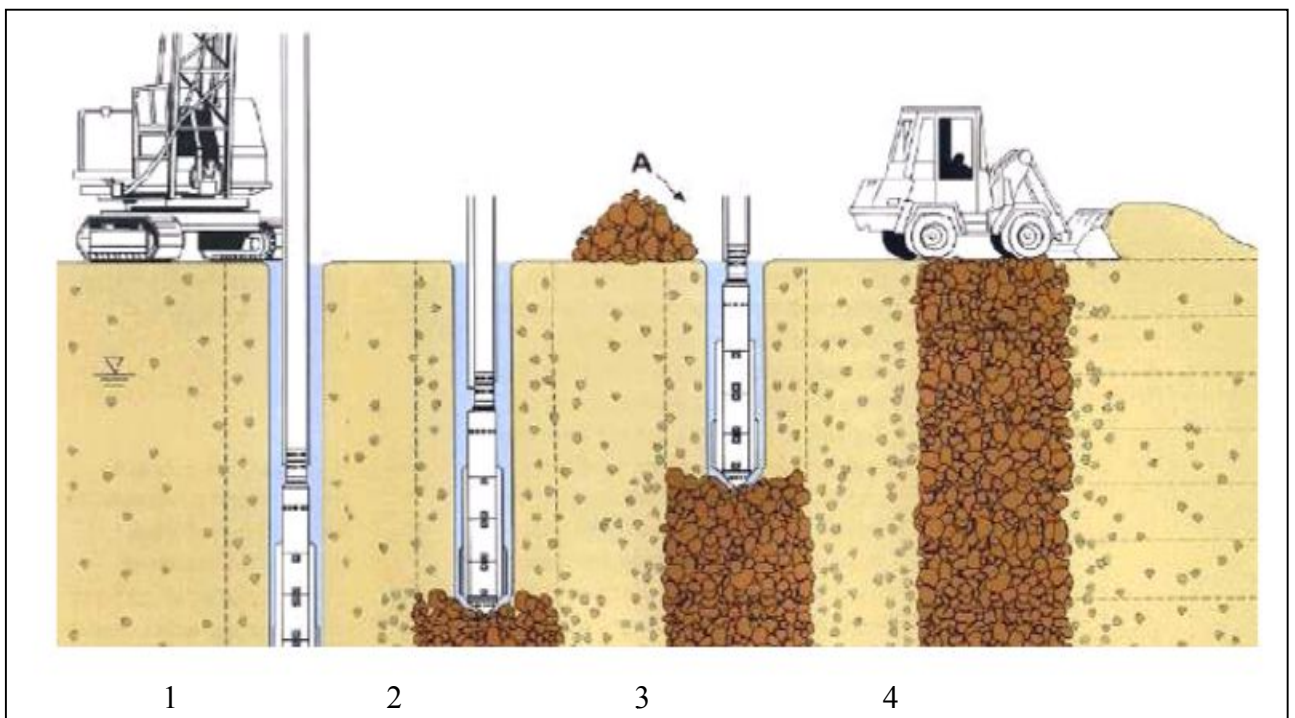


Figure III. 5. Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide

## III.4.6. Choix des matériaux

### III.4.6.1. Matériaux constitutifs des colonnes

Les matériaux d'apport doivent être de qualité et de granulométries contrôlées et les plus homogènes possibles où la fourchette dans la voie humide en pratique varie entre 25/80, dans ce projet ils ont recommandé 30/60.

Le choix se portera sur des graves naturelles, roulées ou concassées, proviennent de la carrière d'EL M'HIR à *Bordj Bou Arreridj* et de la carrière de KADDARA à *Boumerdès*.

Les caractéristiques minimales des matériaux d'apport sont les suivantes (CFMS) :

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

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

**MDE** : essai Micro De val, norme *NF EN 1097-1*.

Le critère de propreté doit être inférieur à 5%.



**Figure III. 6.** Approvisionnement du chantier en ballast (De la carrière d'El M'hir)

#### **III.4.6.2. Matériaux de matelas de répartition**

Le DTU 13.2 (*document technique unifié* pour les fondations profondes, 2003) stipule qu'« un groupe de colonnes ballastées est toujours coiffé par une couche de répartition. Il s'agit d'une couche épaisse de matériau graveleux et c'est souvent la plateforme de travail elle-même qui joue le rôle de couche de répartition » (Figure III.7).

Lorsque le matelas de répartition sert de plate-forme de travail, son reprofilage et son compactage final, avec éventuellement un complément de matériau d'apport pour régler l'épaisseur demandée, doivent être réalisés après l'exécution totale des colonnes ballastées.

L'épaisseur du matelas de répartition dépend de plusieurs facteurs tels que :

- la nature et l'intensité des charges ;
- le type de fondations (cas des dallages armés ou non) ;
- le module de déformation du matériau du matelas et du sol encaissant ;
- les caractéristiques des colonnes ballastées (diamètre, maillage).

Il est rare que le matelas de répartition soit réalisé en matériau similaire à celui des colonnes.

L'épaisseur du matelas varie en pratique entre 0.4 et 1m.

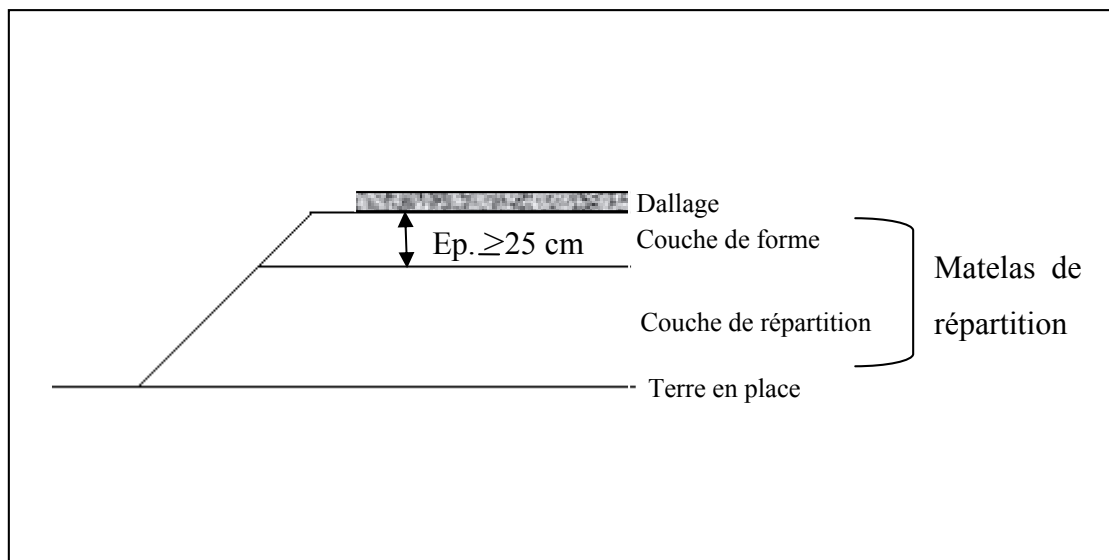


Figure III. 7. Coupe en profil du matelas de répartition

#### III.4.7. Avantages et inconvénients des colonnes ballastées

##### Avantages

Les colonnes ballastées apportent bien des avantages par rapport à d'autres solutions de fondation, entre autre :

- L'absence de liant dans le matériau constituant la colonne permet de garder une grande souplesse dans la mise en œuvre des fondations aussi bien en dimensionnement (reprise aisée des sollicitations horizontales, pas de point dur, contrainte de sol uniforme...) qu'en exécution (absence de recépage, semelle coulée pleine fouille, dallage terre-plein) ;

- Il en est de même pour les travaux de terrassement où la circulation des engins de chantier sur les plateformes de travail est possible et la facilité de traitement aux liants de ces dernières ne nécessite pas de précautions particulières ;
- Cette technique permet un délai de production rapide ;
- Par ailleurs, il est à noter une possibilité de co-activité avec les autres lots de la construction (gros-œuvre) ainsi qu'un impact environnemental faible du fait de l'absence de liants hydrauliques, le bilan carbone est meilleur que celui des méthodes de fondations nécessitant du béton.
- De plus, la nature granulaire de la colonne ballastée permet de diminuer la nature gonflante de certaines argiles, moyennant une imperméabilisation de surface ;
- Enfin, l'effet drainant des colonnes offre la possibilité d'accélérer le temps de consolidation des terrains compressibles.

#### Inconvénients

- Non adaptées dans les cas où il y a des charges ponctuelles de plus 500t/m<sup>2</sup> ;
- Non recommandées dans les sols organiques (absence de contraintes latérales).

#### III.4.8. Mécanismes de comportement des colonnes ballastées

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

Les mécanismes de fonctionnement des colonnes ballastées dépendent :

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

La charge verticale appliquée en moyenne à la surface du sol ( $\sigma_0$ ) se répartie, à la surface du domaine cylindrique, entre les colonnes et le sol en proportion de leurs aires respectives.

La relation entre la contrainte moyenne  $\sigma_0$  appliquée sur l'aire totale A, la contrainte  $\sigma_c$  transférée à la colonne d'aire  $A_c$  et la charge  $\sigma_s$  supportée par le sol sur l'aire  $A_s$  peut s'écrire sous la forme :

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

### III.4.8.1. Paramètres caractéristiques

L'étude du comportement des colonnes ballastées conduit à introduire les paramètres caractéristiques usuels suivant :

- le taux d'incorporation (ou coefficient de substitution), noté **a** ;
- le rapport de concentration des contraintes, noté **n** ;
- le facteur de réduction des tassements, noté **β**.

#### a) Taux d'incorporation

Le coefficient de substitution est le rapport 'a' de l'aire traitée  $A_c$  (section de colonne) à l'aire totale  $A$  du domaine d'influence de la colonne, soit :

$$a = A_c / A$$

#### b) Rapport de concentration des contraintes verticales

Les colonnes ballastées ont des résistances et modules supérieurs à ceux du sol traité. Il se développe pour cette raison un mécanisme de transfert de la charge  $\sigma_0$  (initialement appliquée par la fondation) qui conduit à une concentration de la contrainte verticale sur les colonnes (notée  $\sigma_c$ ) et à une réduction de la charge sur le sol (notée  $\sigma_s$ ).

Le rapport de concentration des contraintes verticales, noté  $n$ , est défini par :

$$n = \sigma_c / \sigma_s$$

#### c) Facteur de réduction de tassement

La charge  $\sigma_0$  appliquée par la fondation au sol d'assise produirait, avant le traitement de sol, un tassement moyen  $s_i$ . Après le traitement les tassements diminuent globalement.

On peut définir le facteur de réduction des tassements  $\beta$ , qui désigne le rapport du tassement ( $s_i$ ) du sol avant traitement au tassement ( $s_f$ ) du milieu composite obtenu après traitement, soit :

$$\beta = s_i / s_f$$

### III.4.8.2. Comportement des colonnes ballastées au cours du temps

Le comportement des colonnes ballastées au cours du temps passe par trois phases essentielles :

- La phase initiale : elle correspond aux étapes de construction du remblai ou de la mise en place de la charge pour les autres ouvrages (radiers, dallages et semelles) ;
- La phase de consolidation : cette phase est accélérée par le caractère drainant des colonnes ;
- La phase de fluage : elle est en relation avec le caractère fluant ou non du sol encaissant.

### La phase initiale

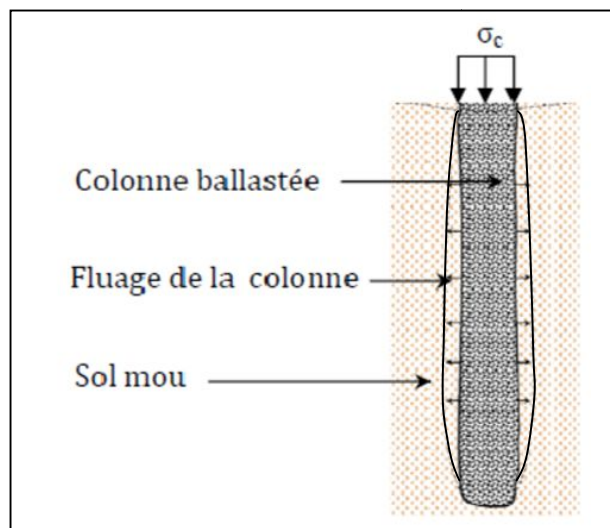
Dans la phase initiale, les pressions interstitielles n'ont pas le temps de se dissiper, il n'y a donc pas de transfert de charge et les tassements sont théoriquement négligeables, mais il peut se produire tout de même des tassements instantanés.

### La phase de consolidation

Dans la phase de consolidation, les pressions interstitielles se dissipent, le transfert de charge se produit progressivement dans le temps et les tassements primaires se mobilisent. On observe un report progressif de charge qui provoque, entre le temps initial ( $t_i$ ) et un certain temps final  $t_f$ , une augmentation de la contrainte verticale  $\sigma_c$  sur la colonne et une diminution de la contrainte verticale  $\sigma_s$  sur le sol. A partir d'un certain temps final ( $t_f$ ) il y a stabilisation des contraintes sur les colonnes et sur le sol.

### La phase de fluage

Le fluage, appelée généralement consolidation secondaire, est par définition le déplacement, ou la déformation, en fonction du temps sous un chargement constant ou une contrainte constante. Ce phénomène de fluage est produit lorsqu'il y a un manque de l'étreinte latérale de sol encaissant les colonnes.



**Figure III. 8.** Fluage d'une colonne par manque de l'étreinte latérale

### III.4.8.3. Comportement mécanique d'une colonne ballastée isolée sous une charge verticale

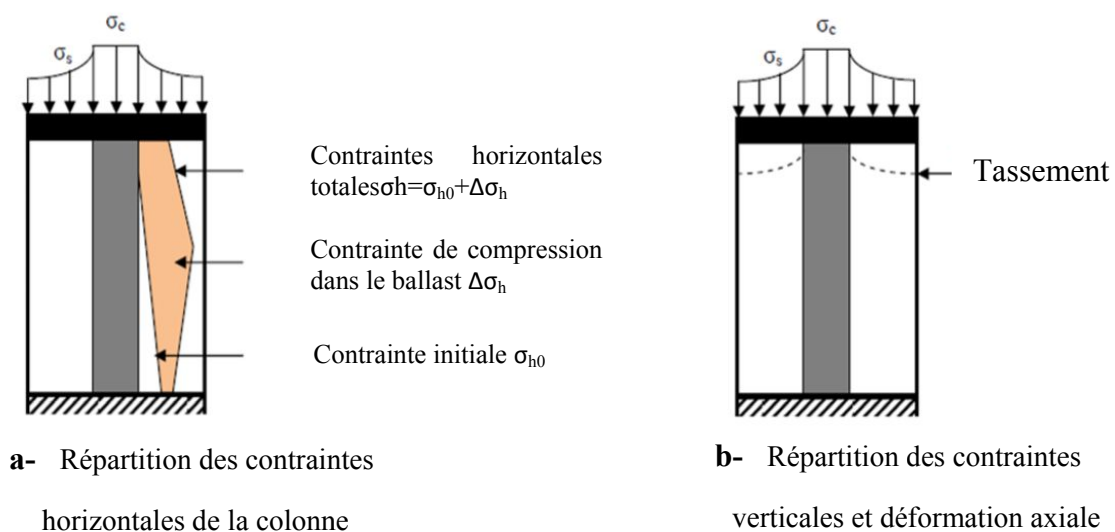
Une colonne ballastée peut tasser sous la charge appliquée, le ballast peut également subir des déformations radiales avec un mécanisme d'interaction « sol/colonne » qui dépend de la rigidité relative de la fondation par rapport au sol qu'elle sollicite.

Les fondations souples et les fondations rigides sont les deux types de fondations qui peuvent être construites sur les colonnes ballastées.

#### III.4.8.3.1. Comportement de la colonne isolée sous une fondation souple

Sous la fondation souple (Figure III.9-b), le report de charge est moins accentué, et les tassements sont plus importants sur le sol que sur la colonne (VAUTRIN, 1980 in NOUI, 2012) et les tassements sont plus importants sur le sol que sur la colonne.

La contrainte horizontale  $\sigma_h$  qui confine le ballast résulte de la contrainte horizontale initiale qui règne dans le sol  $\sigma_{h0}$  et de la contrainte de compression exercée dans le ballast  $\Delta\sigma_h$ , elle augmente jusqu'à une profondeur caractéristique déterminée, puis diminue. (Figure III.9-a)

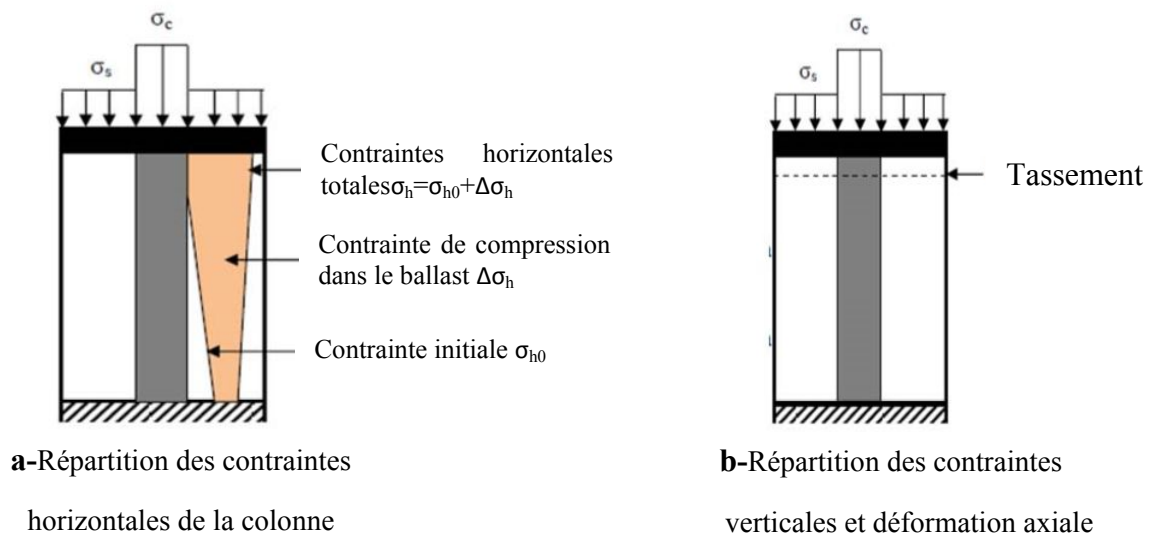


**Figure III. 9.** Répartition des contraintes verticales et horizontale et déformation axiale en surface d'une colonne sous une fondation souple

#### III.4.8.3.2. Comportement de la colonne sous une fondation rigide

A la base de la fondation rigide (Figure 28 -b), il y a une concentration de contraintes plus importante sur la colonne et un meilleur déchargement du sol.

Pour ce type de fondation la contrainte totale horizontale qui confine la colonne, décroît linéairement en fonction de la profondeur (Figure 28 -a). (Dhouib 2005)

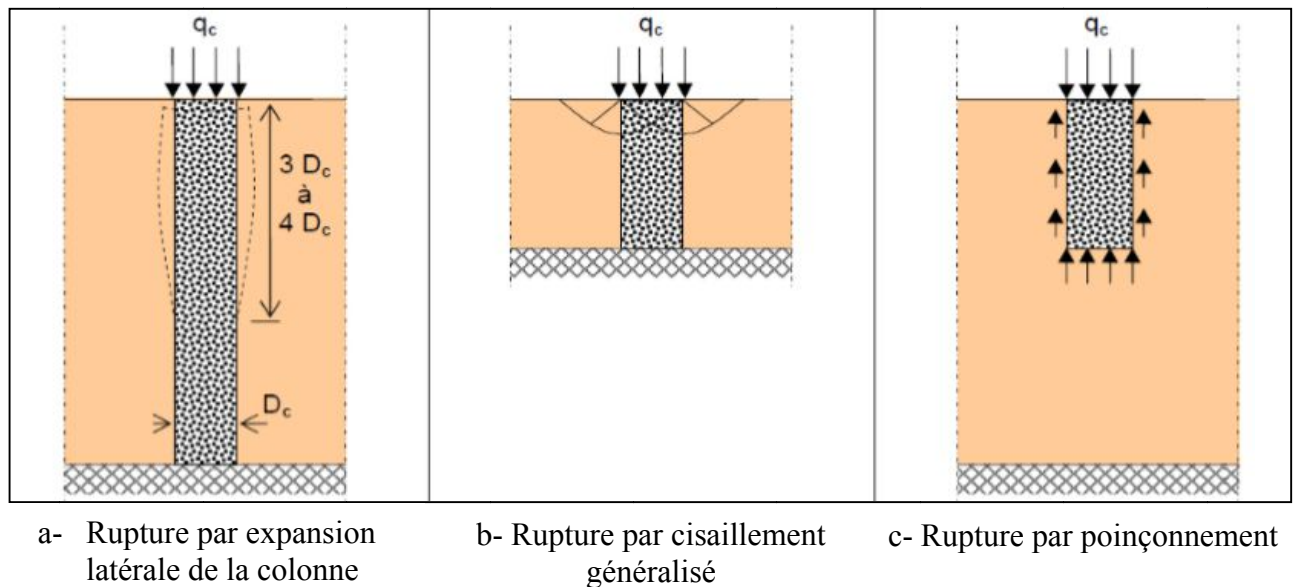


**Figure III. 10.** Répartition des contraintes verticales et horizontales et déformation axiale en surface d'une colonne sous une fondation souple

#### III.4.8.3.3. Mécanisme de rupture de la colonne ballastée

Les mécanismes de rupture d'une colonne ballastée isolée dans un massif de sol mou homogène sous la charge axiale limite  $\sigma_{clim}$  correspondent aux trois configurations schématiques de la (Figure III.11):

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

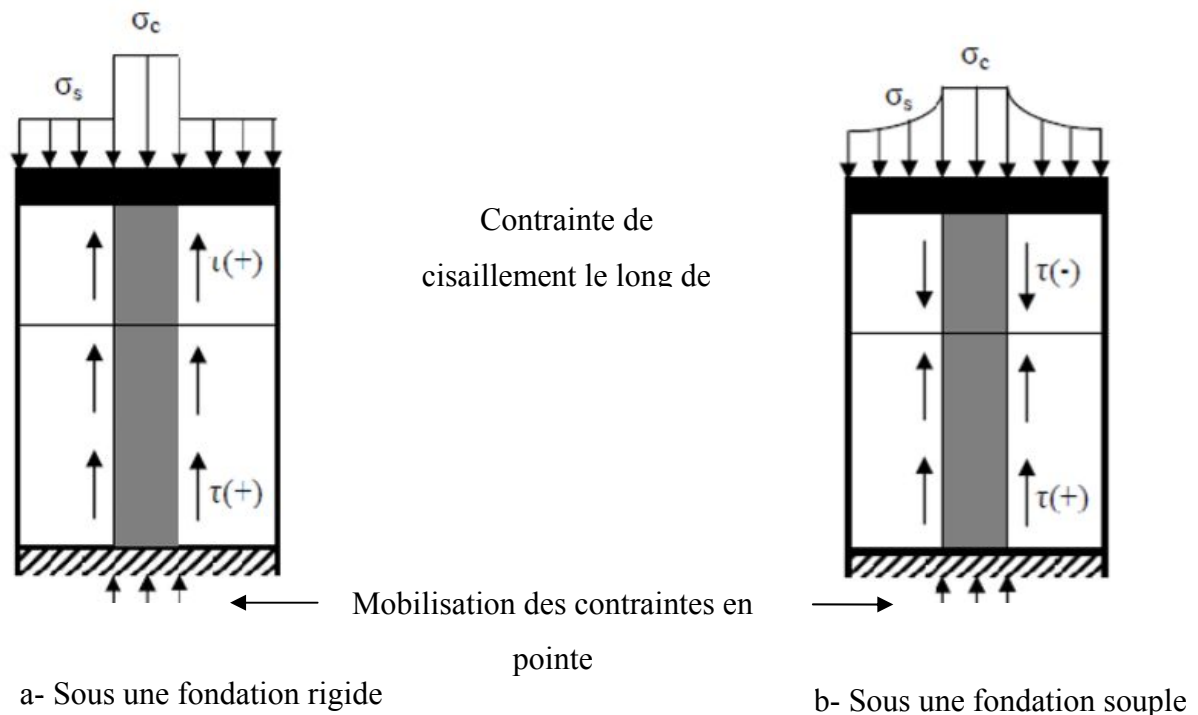


**Figure III. 11.** Type de rupture d'une colonne isolée chargée en tête exécutée dans une couche compressible homogène

#### III.4.8.3.4. Interaction entre le sol et la colonne ballastée

L'interaction entre le sol et la colonne ballastée (Figure 30) dépend de la rigidité relative de la fondation et du sol d'assise. Dans le cas des colonnes courtes ou flottantes :

- Pour la fondation souple, le tassement du sol est plus important que celui de la colonne et le sol a un effet d'entraînement sur le ballast sur une profondeur critique où les contraintes de cisaillement sont négatives (frottement négatif).
- Lorsque la fondation est rigide, les tassements en surface du sol et en tête de la colonne sont identique ; les contraintes de cisaillement qui s'exercent à l'interface sol/ballast demeurent positives le long de la colonne et le sol a tendance à freiner le ballast (frottement positif).



**Figure III. 12.** Interaction Sol/structure : répartition des contraintes de cisaillement le long d'une colonne ballastée courte et effet de pointe

#### III.4.8.4. Comportement mécanique d'un réseau de colonnes ballastées sous une charge verticale

##### III.4.8.4.1. Propriétés du sol entre les colonnes

D'une manière générale, l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols fins (limons et argiles) est faible entre les colonnes. Par contre, les sols sableux peuvent être densifiés entre les colonnes comme il a montré **Chambosse en 1983 et Bell en 1986**. Leurs travaux montrent clairement que les améliorations des propriétés mécaniques des sols fin pulvérulents sont possibles et essentiellement lorsque le maillage des colonnes est relativement serré.

Slocombe *et al.*, par leurs travaux qui ils ont fait en 2000, montrent que les colonnes en groupe conduisent à une meilleur densification des sols pulvérulents lâches et qu'il se produit un resserrage, dans le temps, des particules du sol après la dissipation des pressions interstitielles.

**III.4.8.4.2. Comportement des colonnes ballastées sous une fondation souple**

Pour les fondations souples, la mise en place du matelas de répartition est indispensable pour une meilleure répartition des contraintes.

Le report de charge conduit à des tassements qui sont plus au moins proches et comme pour une colonne isolée chargée en tête, la contrainte horizontale totale confinant le ballast résulte de la contrainte horizontale initiale qui règne le sol avant traitement et d'une contrainte supplémentaire de compression exercée dans le ballast.

**III.4.8.4.3. Comportement des colonnes ballastées sous une fondation rigide**

Pour ce type de fondation la concentration des contraintes est plus accentuée que dans le cas de la fondation souple et les tassements sont identiques en raison du caractère indéformable de la fondation. Pour cette raison de l'égalité des tassements en tête de la colonne et à la surface du sol, le frottement demeure positif sur toute la hauteur des colonnes (Dhouib 2005).

Comme pour une colonne chargée en tête la contrainte horizontale autour les colonnes décroît linéairement en fonction de la profondeur.

**III.4.8.4.4. Comportement des colonnes ballastées en zone sismique**

En zone sismique, les colonnes ballastées agissent comme des drains et permettent de dissiper les surpressions interstitielles et d'atténuer, par conséquent, la contrainte de cisaillement induite par le séisme. En effet, cette contrainte se répartit entre le sol et la colonne en proportion du transfert de charge et des raideurs relatives sol/colonne ballastées.

**III.4.9. Dimensionnement des colonnes ballastées**

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

Des étapes doivent être suivies afin de déterminer le dimensionnement des colonnes ballastées (maillage, diamètre et nombre de colonne) :

- 1) Déterminer la densité relative des sables liquéfiables.
- 2) Il faut retrouver la densité relative qu'il faut atteindre, ça veut dire la valeur de la résistance à la pointe du pénétromètre ( $q_c$ ).

Voilà une des méthodes pour déterminer cette densité relative proposée par Jamiolkowski et al 1985 (MOKADEME et OUALI in BAKEL O. et HAMZA M. 2017) :

- Cette méthode est basée sur la résistance à la pointe ( $q_c$ ) :

$$Dr(\%) = 66 \log \left( \frac{q_c^*}{\sigma'_{v0}} \right) - 98$$

Avec :

- $q_c^*$  : la résistance à la pointe en  $t/m^2$  ;
- $\sigma'_{v0}$  : la contrainte effective verticale  $t/m^2$  ;
- $Dr$  : densité relative en %.

- 3) Déterminer le taux d'incorporation qui permet de déterminer le pourcentage de matériau incorporé par rapport au sol naturel :

$$a = A_c / A$$

Avec :

- $A_c$  : section de la colonne ballastée ;
- $A$  : section de la maille des colonnes ballastées.

- 4) Le nombre de colonnes sera obtenu en divisant la section à traiter par la section totale :

$$N_{\text{colonne}} = S_{\text{traitée}} / A$$

#### III.4.10. Résultats obtenus dans les planches d'essais

Les planches d'essais sont un véritable plan d'expérience identifiant parfaitement l'objectif visé pour définir les conditions finales de mise en œuvre pour aboutir au résultat escompté.

Vu l'hétérogénéité des caractéristiques géotechniques des couches du sol du terminal à conteneur du port d'Alger, un total de six (6) planches d'essais ont été réalisées dans les terre-pleins du terminal, afin de valider la bonté du traitement conçu dans une phase initiale à partir de l'analyse des propriétés géotechniques des sols, et d'obtenir le maillage qui répond au taux de substitution estimé dans le dimensionnement, ainsi que des buts recherchés en ce qui concerne les tassements et la liquéfaction.

À partir des résultats des planches d'essais, ils ont divisé le terminal en quatre zones, chaque zone comprend une ou deux planches, tel que schématisé dans la figure suivante :

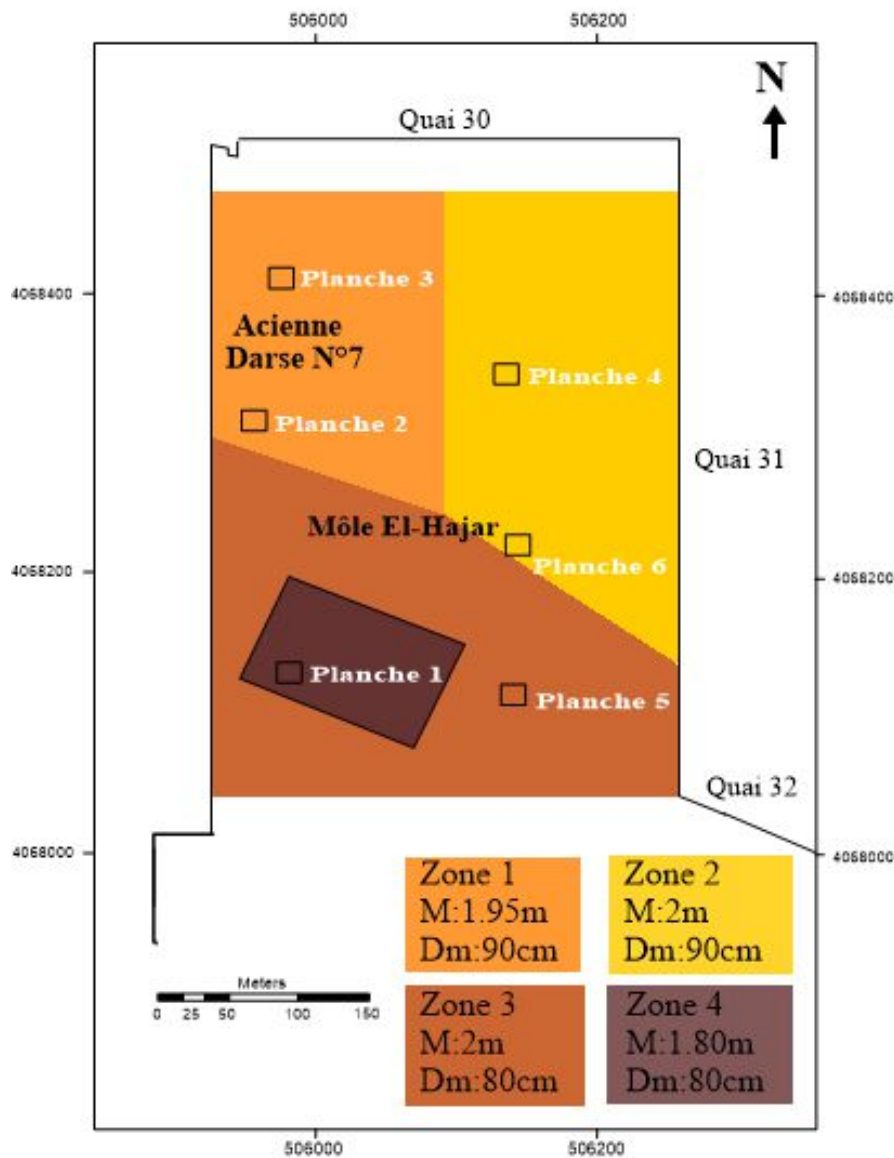


Figure III. 13. Emplacement des planches dans le TAC

**ZONE 1 : Remblais de l'ancienne darse N°7 :**

Les planches d'essais réalisées dans cette zone sont la planche n° 2 qui a un ensemble de 23 colonnes et la planche n°3 qui a un ensemble de 27 colonnes.

Les diamètres obtenus dans les colonnes de ces deux planches d'essais ont une moyenne de 90cm.

Le maillage testé dans la planche n° 2 est composé de colonnes réparties selon une distribution hexagonale, avec une séparation entre axes de 2,20 m, et pour atteindre le taux de substitution recherché dans cette zone qui est à l'ordre de 18,7%, un nouveau maillage fût

essayé dans la planche n° 3. Le maillage résultant était composé de colonnes réparties selon une distribution hexagonale avec une séparation entre axes de 1,85 m.

#### **ZONE 2 : Remblai de la partie Nord et centre du Môle El-Hadjar :**

Les planches réalisées dans cette zone sont : la planche d'essai n° 4 dont le nombre de colonne ballastée est de 28 colonnes, et la planche n° 6 qui a un totale de 25 colonnes ballastées.

Ainsi, les diamètres obtenus dans cette zone varient entre 0,86 m et 0,93 m.

le maillage adopté dans la planche d'essais n° 4 est composé de colonnes réparties selon une distribution hexagonale, avec une séparation entre axes de 1,85 m, tandis qu'en cas de la planche n° 6, le maillage adopté est d'une distribution hexagonale avec une séparation entre axes des colonne de 2,00 m.

Le taux de substitution du sol obtenu avec le maillage adopté dans la planche d'essais n° 4 est de 19,1%, faiblement supérieur au taux du 18,7% recherché dans cette zone. Par conséquent, le maillage considéré dans la planche d'essai n° 4, était proposé comme définitif dans toute cette zone.

#### **ZONE 3 : Remblais de la zone la plus antérieure du terminale :**

La planche réalisée dans cette zone est la n° 5 qui a un totale de 23 colonnes ballastées. Ainsi, le traitement effectué comprend des colonnes réparties selon une distribution hexagonale avec une séparation entre axes des colonnes de 2,00 m.

Cette zone est la plus ancienne du terminal, d'où que les sols soient plus consolidés. De cette sorte, les diamètres obtenus avec une moyenne de 0,80 m sont inférieurs aux ceux dans le reste des planches d'essais.

#### **ZONE 4 : Remblais de la partie Sud-Ouest du terminal :**

La planche réalisée dans cette zone est la planche d'essai n° 1 qui a un ensemble de 28 colonnes ballastées.

Les diamètres obtenus dans cette planche d'essais ont une moyenne de 0,85 m, où la distance entre deux colonnes est de 1,8 m.

Le taux de substitution obtenu avec cette disposition est du 17,9%, faiblement inférieur au taux considéré lors des calculs des tassements (18,7%), et pour cela une séparation de 1,75 m entre axes est proposée dans cette zone.

**III.5. Conclusion**

Le renforcement du sol par les colonnes ballastées est l'une des techniques préférée par les géotechniciens grâce à ses avantages techniques et économiques. Les colonnes ballastées jouent plusieurs rôle, tel que des drains verticaux et le transfert des charges structurelles vers un substratum grâce à un matelas de réparation.

La réalisation des colonnes ballastées doit être accompagnée d'une série d'essais de contrôle, afin de confirmer que les nouvelles caractéristiques du sol répondent aux objectifs tracés préalablement, d'une part, et d'autre part, de détecter les erreurs de réalisation.

# **Chapitre IV. Vérification du traitement**

**IV.1. Introduction**

La qualité de réalisation des travaux d'amélioration des sols doit être contrôlée pendant et après exécution du traitement des colonnes, afin de vérifier le comportement de ces dernières en terme de déformation et de portance.

**IV.2. Contrôles en cours d'exécution**

Les données importantes de chaque étape de compactage sont mesurées, enregistrées et imprimées sous forme des fiches de synthèse (Figure IV.1) qui donnent, pour chaque colonne, les caractéristiques d'exécution enregistrées automatiquement : date, profondeur et énergie de compactage, afin de vérifier :

- L'intensité du compactage à tous les niveaux de la colonne ;
- La continuité de la colonne sur toute sa longueur ;
- La vitesse de pénétration ;
- L'ancrage de la colonne dans le bon sol ;
- La durée de réalisation d'une colonne.

Le contrôle pendant la réalisation des colonnes ballastées, doit aussi comprendre la vérification de la position du vibreur ainsi que les points de fonçage (c.-à-d. voir si le vibreur est perpendiculaire et s'il est juste au-dessus du point exigé).

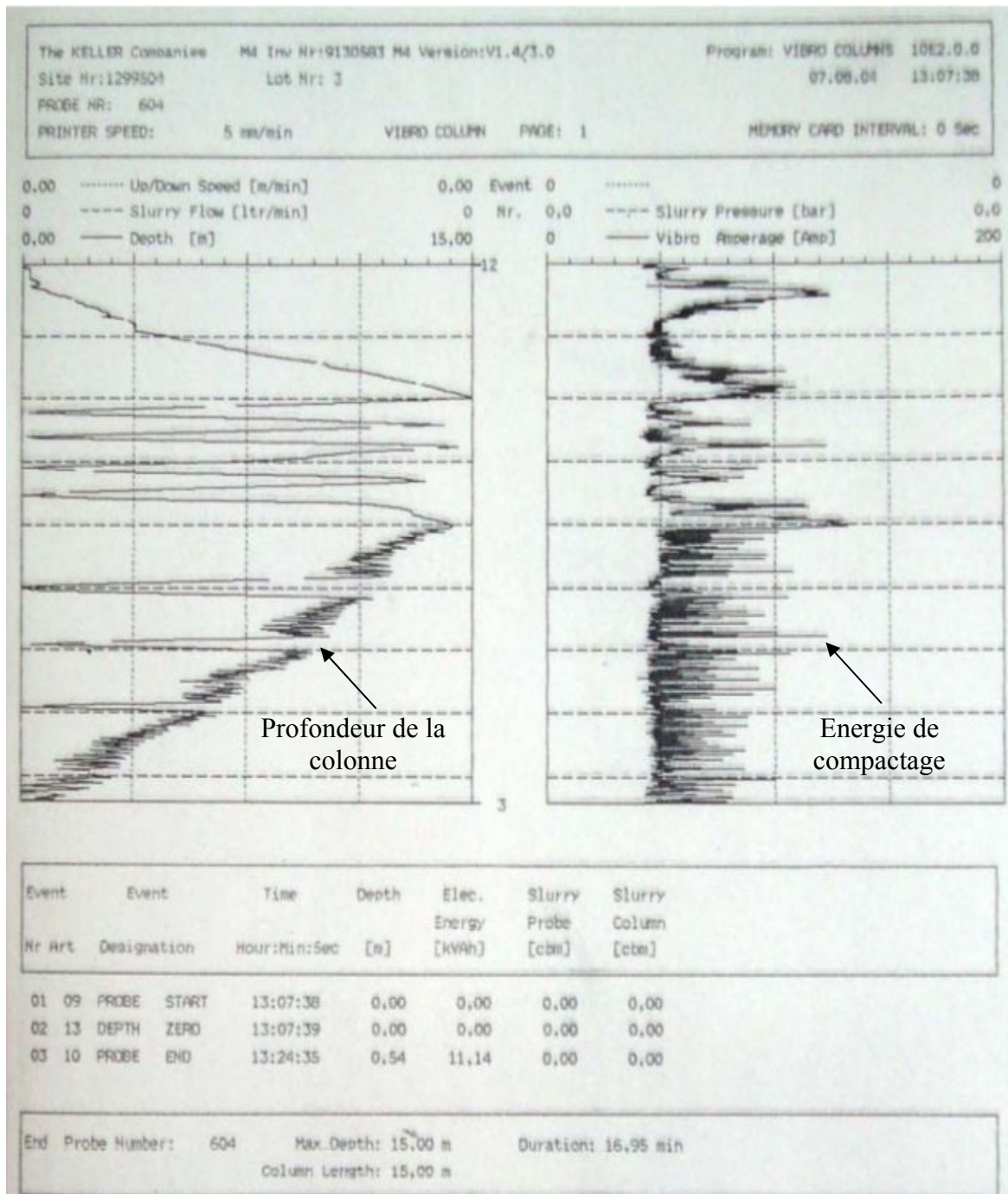


Figure IV. 1. Enregistrement des paramètres (Fiche de synthèse)

### IV.3. Contrôles après l'exécution

#### IV.3.1. Contrôle de diamètre

Le contrôle du diamètre se fait par **paressai de dégarnissage**, qui consiste à mesurer le diamètre de chaque colonne en surface, et sur une seule colonne, à 1 mètre de profondeur.

La fréquence de réalisation de cet essai est d'un essai par tranche de 50 colonnes avec un minimum de trois essais par projet.

#### IV.3.2. L'essai de chargement (Contrôle de portance)

Cet essai est le plus fiable pour le contrôle des colonnes ballastées, car il permet de soumettre la colonne à une charge égale à 1,5 fois la charge à l'ELS, il a pour but de vérifier la conformité des colonnes ballastées en terme de portance et mesurer ainsi les tassements.

La fréquence de réalisation de cet essai est un essai pour chaque 2000 mètre linéaire de colonnes exécutées. Le critère de choix de la colonne à soumettre à cet essai, peut être le faible diamètre et/ou faible énergie de compactage, il consiste à mesurer l'enfoncement de la tête de la colonne à l'aide de trois ou quatre comparateurs soumis à une charge verticale. Cette dernière est appliquée par un vérin hydraulique sur une plaque circulaire d'un diamètre ne dépassant pas 2.5 fois la section théorique de la colonne et d'épaisseur de 1 à 2 cm. Ce vérin qui est actionné par une pompe doit en principe être mené d'une rotule pour assurer la verticalité des efforts.

Chaque palier de chargement est contrôlé au moyen d'un manomètre à pression d'huile et grâce à la pompe hydraulique reliée directement au manomètre, on assure une charge constante pour chaque palier. Les résultats sont tous reportés sur une feuille d'essai (Annexe 4).

La charge dans l'essai de chargement est appliquée progressivement en six paliers après avoir effectué un pré-chargement de 0 à 25%  $Q_N$  maintenu pendant 15 minutes et déchargement rapide pour vérifier le bon fonctionnement du système et pour supprimer les défauts de contact entre la plaque et la tête de colonne. Les paliers seront respectés comme suit :

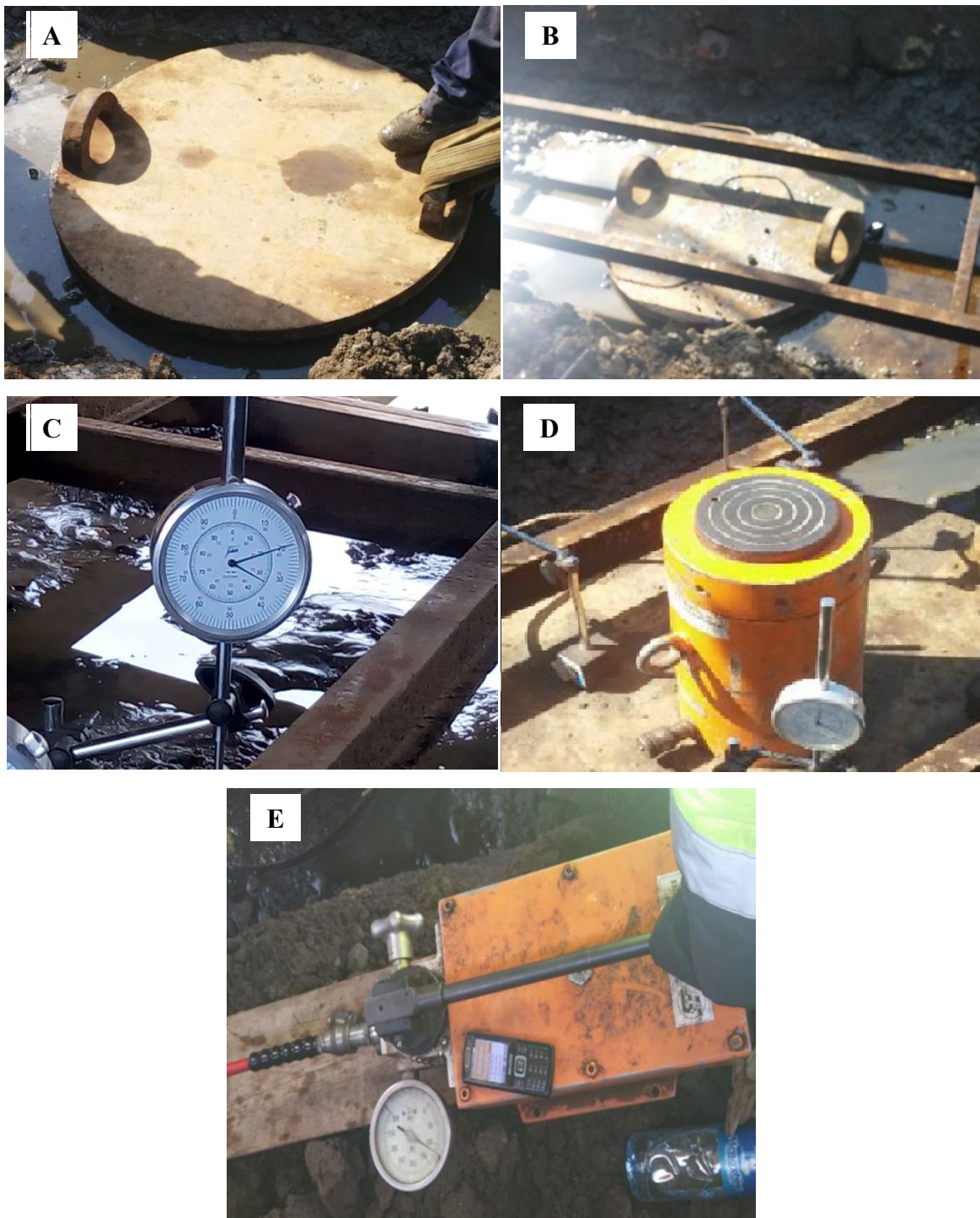
- Chargement de 0 à 150%  $Q_N$  par 6 paliers égaux de 25%  $Q_N$  ;
- Chaque palier est maintenu constant pendant 60 min ;
- Pour chaque palier, les lectures des déformations sont faites aux temps suivant :
  - Toutes les minutes pendant 5 minutes ;
  - Toutes les 5 minutes entre 5 et 30 minutes ;
  - Toutes les 15 minutes entre 30 et 60 minutes.

- Un déchargement par palier de 25%  $Q_N$  maintenu pendant 5 minutes avec une lecture chaque minute.

La déformation est dite **stabilisée** lorsque sa variation n'excède pas 2 centièmes de mm par minute.



Figure IV. 2. Principe de l'essai de chargement



**A** : Plaque métallique ; **B** : poutrelle de référence ;

**C** : Comparateur ; **D** : Vérin hydraulique ;

**E** : Manomètre.

**Figure IV. 3.** Matériel utilisé dans l'essai de chargement (Port d'Alger)

Les essais de chargement sont réalisés dans les premières 4 sections (1, 2, 3 et 4). (Figure IV.4)

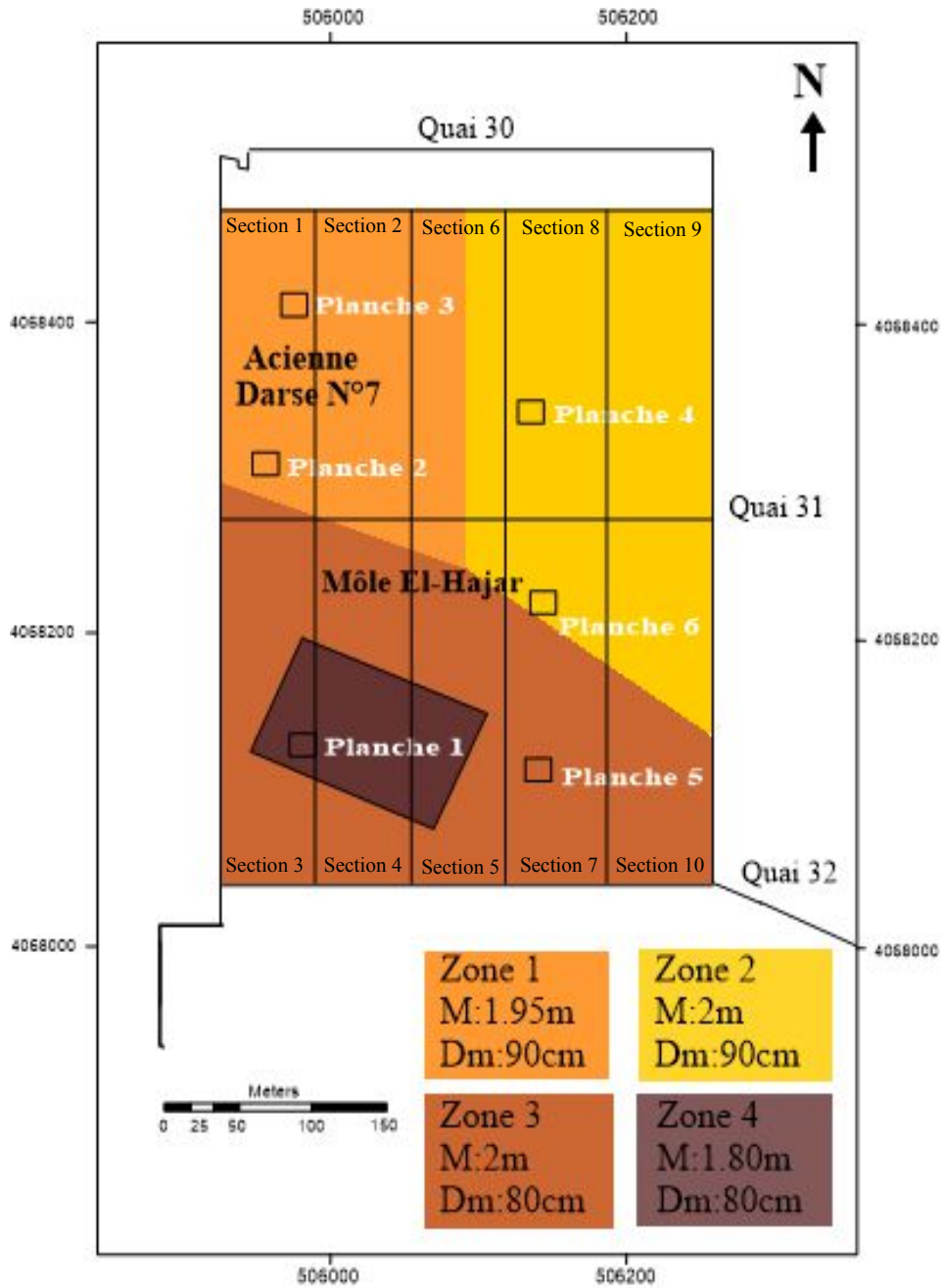


Figure IV. 4. Partition du TAC en zones

### IV.3.2.1. Détermination de la charge nominale d'exécution de l'essai QN :

La charge calculée dans notre projet pour l'exécution de l'essai est de 22 tonnes.

Le détail de calcul est donné ci-dessous :

On a :  $QN = \sigma_c \cdot A_c$  avec  $\sigma_c$  : La charge que reçoit la colonne ;  
 $A_c$  : surface de la colonne

$$A_c = (\pi D_c^2) / 4 = [(3,14) \cdot (1^2)] / 4 = 0,7850 \text{ m}^2$$

$$\sigma_c = (n \cdot \sigma) / ((n-1) \cdot a + 1)$$

$a = AC / A$  avec  $a$  = taux d'incorporation

$A$  : surface de la cellule unitaire =  $\pi D_e^2 / 4$

(Dans notre cas : le maillage est

hexagonal donc :  $D_e = \sqrt[4]{\frac{12}{\pi^2} S} = 1,05 S = 1,05 \text{ S}$ )

$$D_e = 1,05 \cdot 2 = 2,1 \text{ m}$$

$$A = [(3,14) \cdot (2)^2] / 4 = 3,461 \text{ m}^2$$

$$a = 0,7850 / 3,461 = 0,2268$$

$n$  = rapport de concentration des contraintes qui égale à 7 dans la note de calcul

$\sigma$  = charge de service donnée par 95 KPa

$$\sigma_c = (7 \cdot 95) / ((7-1) \cdot 0,2268 + 1) = 281,6841 \text{ KPa}$$

$$QN = 281,6841 \cdot 0,7850$$

$$QN = 221 \text{ KN}$$

$$QN = 221 \cdot 0,1 = 22,1 \text{ tonne,}$$

Soit **QN = 22 tonne**

**Tableau IV. 1.** Valeurs des charges de chaque palier de mesure

	Charges en tonne
25%	5.50
50%	11
75%	16.50
100%	22
125%	27.5
150%	33

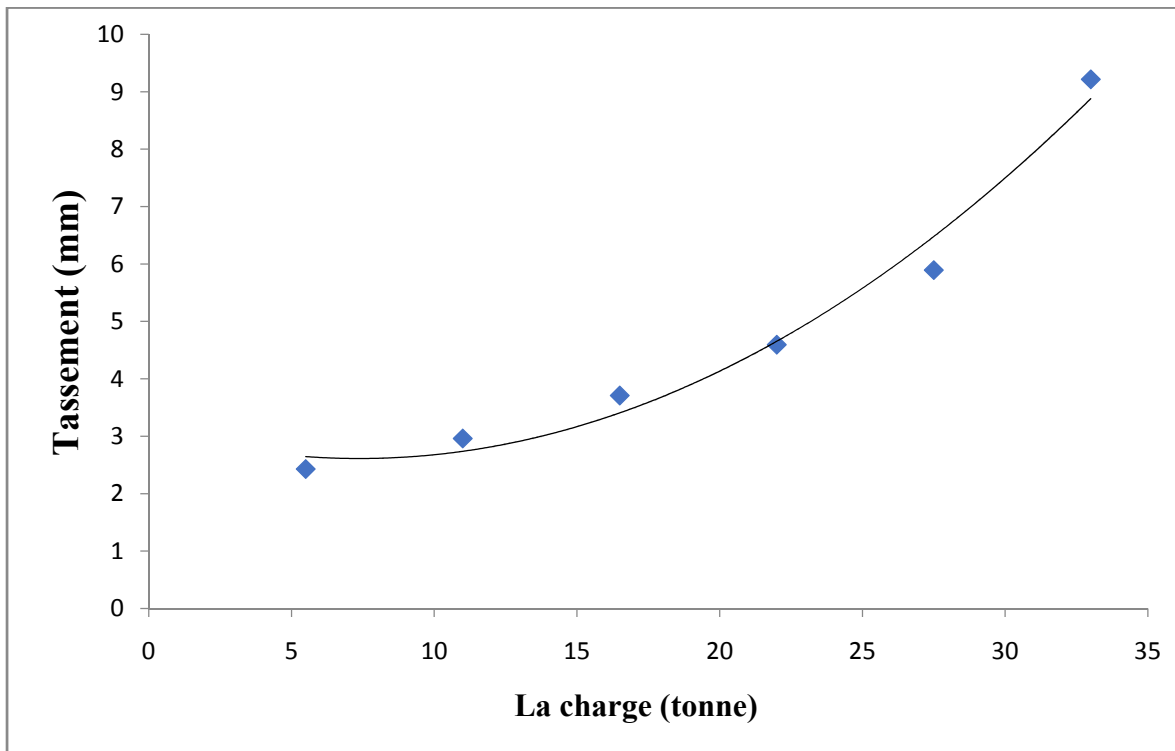
Nous exposons dans ce qui suit les résultats obtenus lors de la réalisation des essais de chargement. (4 exemples appartenant aux différentes sections)

**Exemple 1 : Colonne 1D 262**

**Indication** : Le chiffre **1** indique le numéro de la section, le **D** est la zone d'exécution et le chiffre **262** indique le numéro de la colonne

**Tableau IV. 2.** Valeurs des tassements enfin de chaque palier en fonction des charges appliquées

La charge (t)	Tassement (mm)
5.5	2.43
11	2.9625
16.5	3.71
22	4.595
27.5	5.895
33	9.2175



**Figure IV. 5.** Courbes des tassements à la fin de chaque palier en fonction des charges appliquées

Tableau IV. 3. Valeurs des tassements de chaque palier

Temps (min)	ln T (min)	Tassement (mm)					
		Palier 1	Palie 2	Palie 3	Palie 4	Palie 5	Palie 6
1	0	2.41	2.925	3.6375	4.4325	5.6	8.7325
2	0.69314718	2.4175	2.9375	3.66	4.455	5.6425	8.7925
3	1.09861229	2.425	2.9375	3.66	4.47	5.6725	8.84
4	1.38629436	2.425	2.9375	3.67	4.48	5.6925	8.87
5	1.60943791	2.425	2.9425	3.6725	4.485	5.7075	8.8925
10	2.30258509	2.43	2.9525	3.6725	4.5125	5.755	9.0075
15	2.7080502	2.43	2.9525	3.6725	4.52	5.7925	9.03
20	2.99573227	2.43	2.9525	3.6925	4.5325	5.8325	9.0825
25	3.21887582	2.43	2.955	3.705	4.55	5.85	9.1
30	3.40119738	2.43	2.9625	3.705	4.565	5.87	9.1125
45	3.80666249	2.43	2.9625	3.7295	4.5875	5.875	9.1625
60	4.09434456	2.43	2.9625	3.7295	4.595	5.895	9.2175

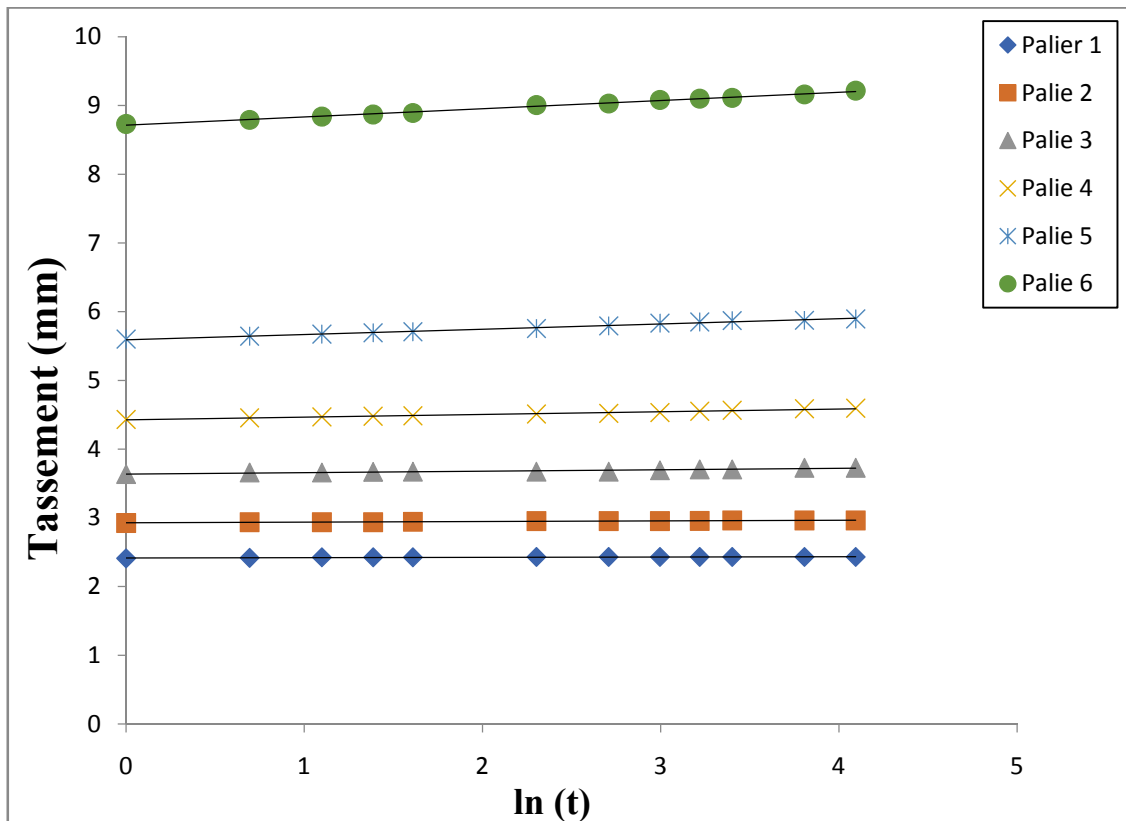
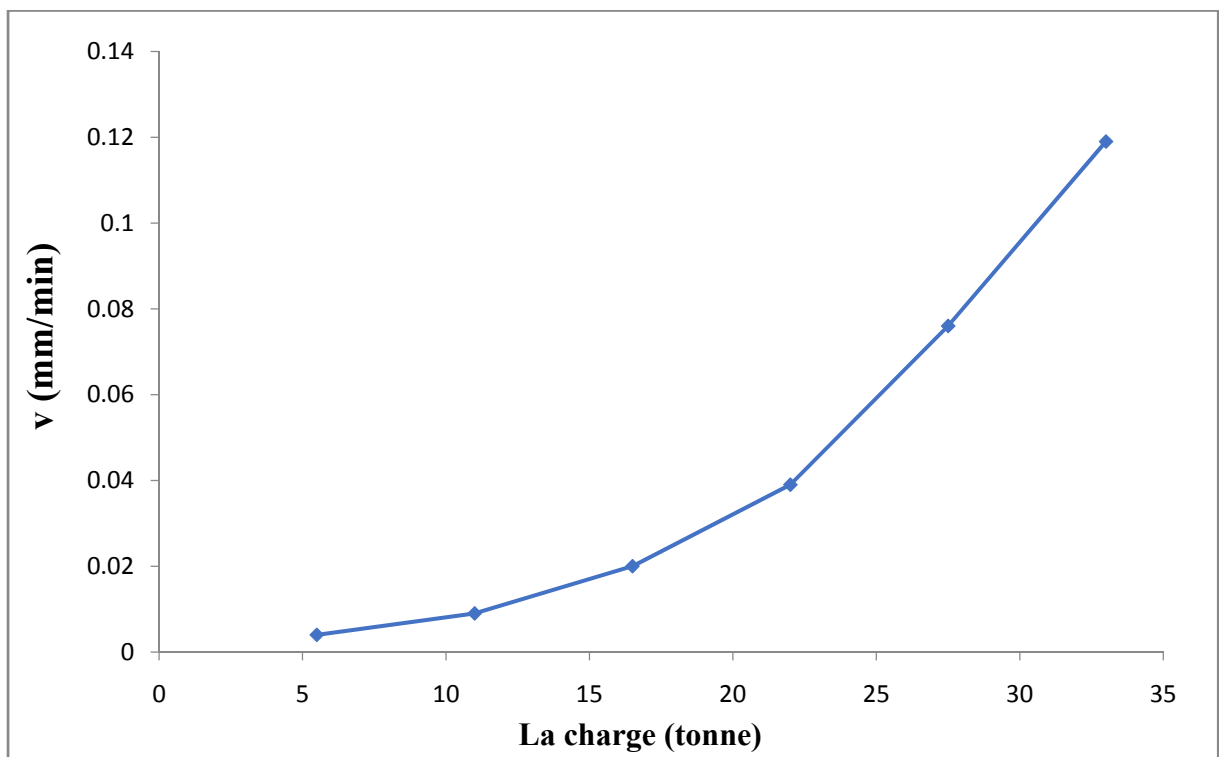


Figure IV. 6. Les variations des tassements de chaque palier au cours du temps

**Tableau IV. 4.** Valeurs des tassements à la fin de chaque palier en fonction des charges appliquées

La charge (t)	La pente V (mm/min)
5.5	0.004
11	0.009
16.5	0.02
22	0.039
27.5	0.076
33	0.119

**Figure IV. 7.** Courbe de la vitesse des tassements en fonction de la charge appliquée

## Exemple 2 : Colonne 2B 406

**Tableau IV. 5.** Valeurs des tassements à la fin de chaque palier en fonction des charges appliquées

La charge (t)	Tassement (mm)
5.5	1.8925
11	2.735
16.5	3.8025
22	4.9325
27.5	5.88
33	7.9375

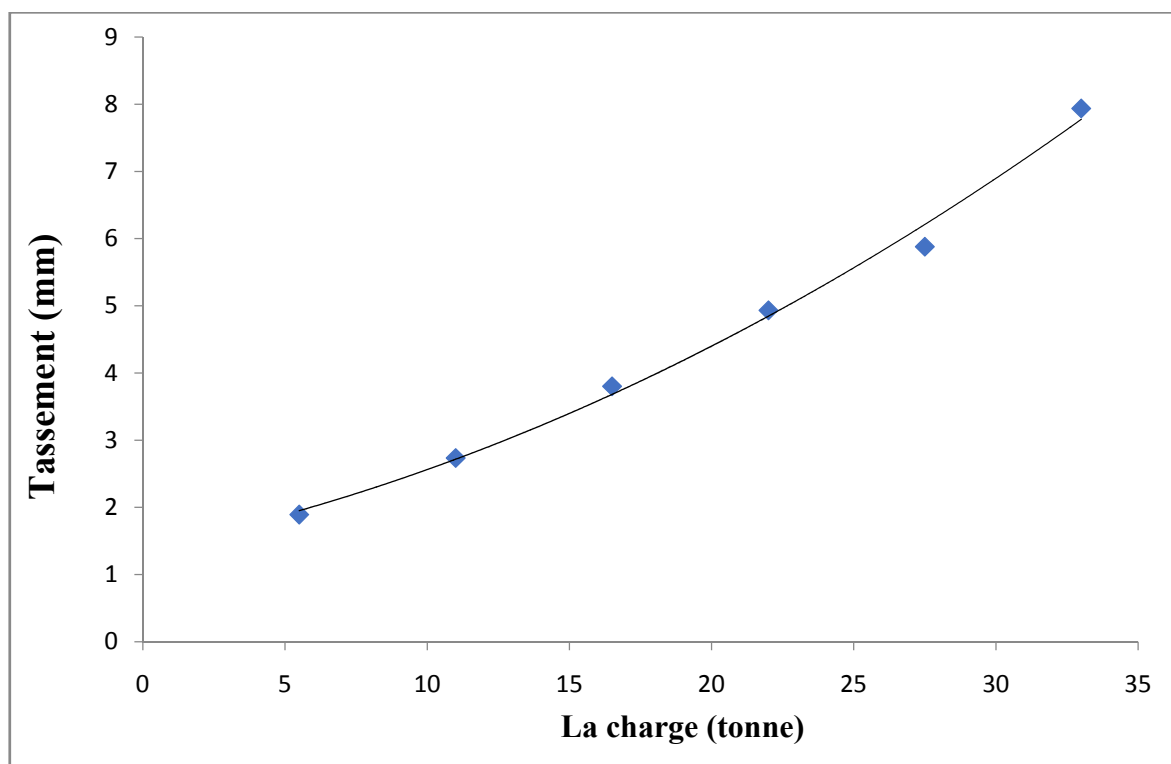
**Figure IV. 8.** Courbes des tassements à la fin de chaque palier en fonction des charges appliquées

Tableau IV. 6. Valeurs des tassements de chaque palier

Temps (min)	ln T (min)	Tassement (mm)					
		Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 4	Palier 5	Palier 6
1	0	1.8825	2.5975	3.615	4.56	5.5975	7.5175
2	0.69314718	1.8835	2.6075	3.635	4.575	5.63	7.5175
3	1.09861229	1.8835	2.62	3.65	4.595	5.6625	7.6125
4	1.38629436	1.8835	2.625	3.655	4.6	5.6725	7.65
5	1.60943791	1.885	2.625	3.66	4.6075	5.6825	7.66
10	2.30258509	1.885	2.6375	3.685	4.6325	5.7525	7.7175
15	2.7080502	1.885	2.735	3.685	4.6695	5.8	7.77
20	2.99573227	1.8895	2.735	3.725	4.6975	5.84	7.8
25	3.21887582	1.89	2.735	3.77	4.7975	5.84	7.8425
30	3.40119738	1.8925	2.735	3.77	4.875	5.855	7.8475
45	3.80666249	1.8925	2.735	3.7825	4.9195	5.8775	7.895
60	4.09434456	1.8925	2.735	3.8025	4.9325	5.88	7.9375

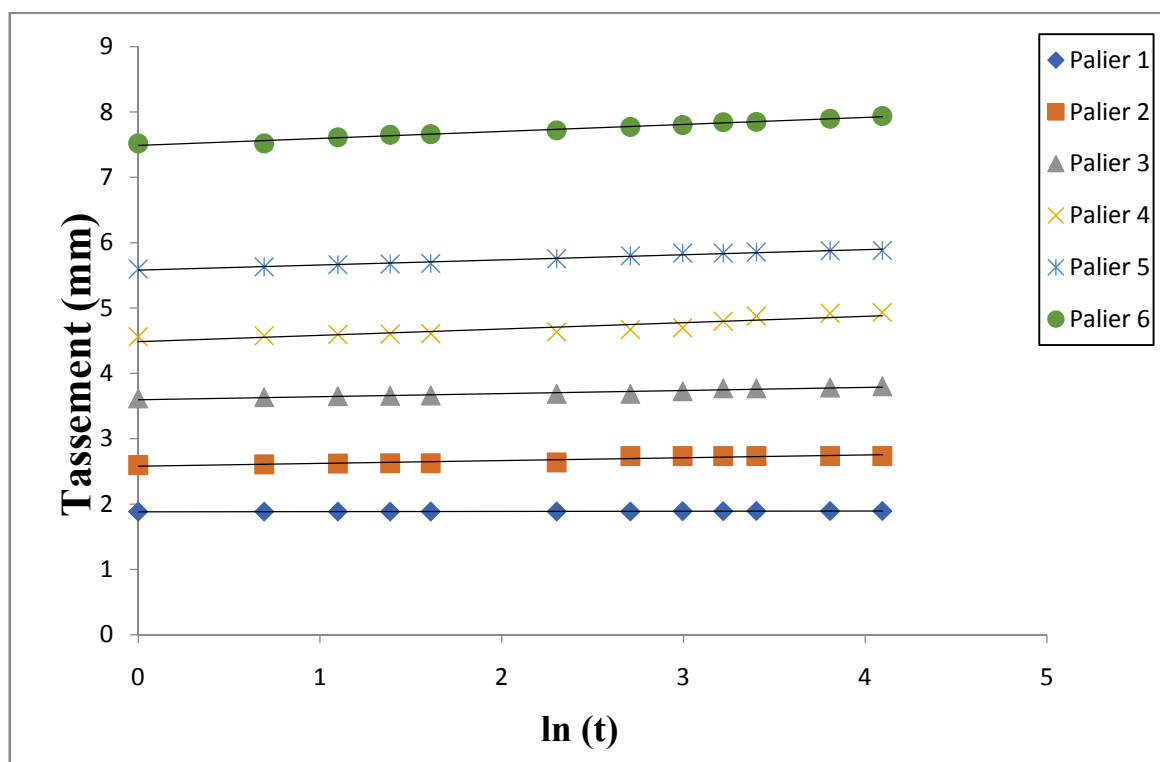
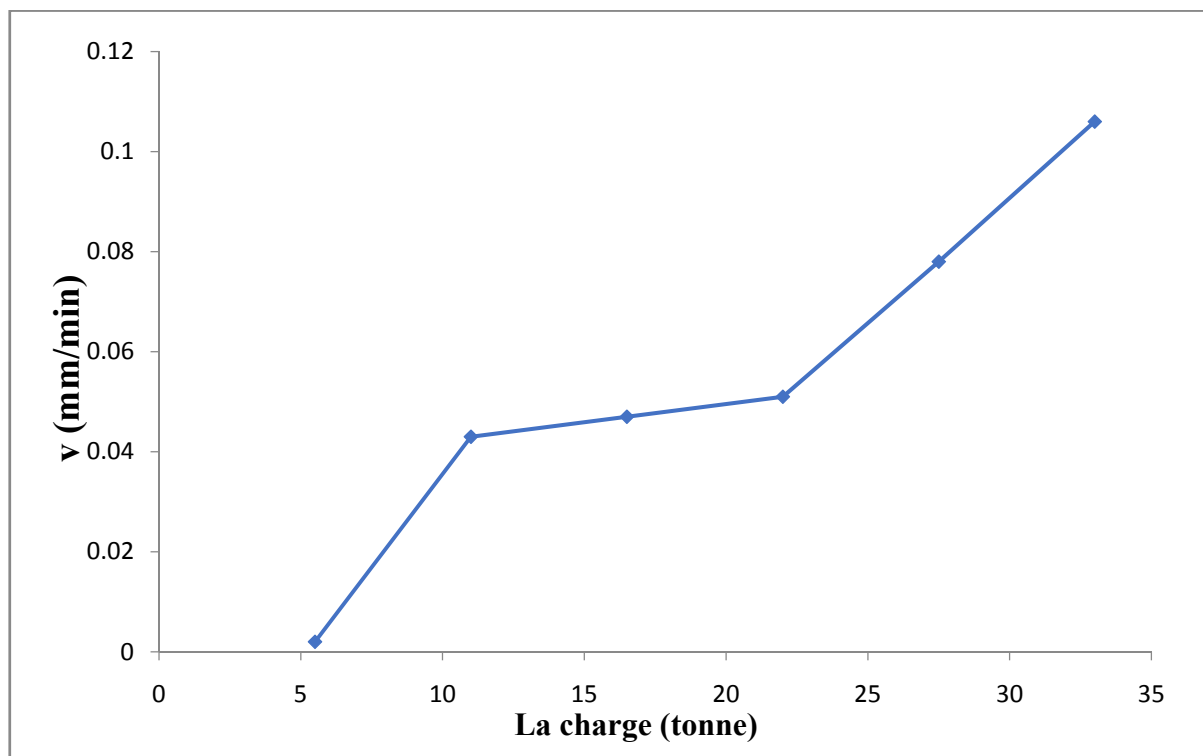


Figure IV. 9. Les variations des tassements de chaque palier au cours du temps

**Tableau IV. 7.** Valeurs des tassements enfin de chaque palier en fonction des charges appliquées

La charge (t)	La pente (mm/min)
5.5	0.002
11	0.043
16.5	0.047
22	0.051
27.5	0.078
33	0.106

**Figure IV. 10.** Courbe de la vitesse des tassements en fonction de la charge appliquée

## Exemple 3 : Colonne 3D 290

**Tableau IV. 8.** Valeurs des tassements à la fin de chaque palier en fonction des charges appliquées

La charge (t)	Tassement (mm)
4.87	1.78
9.74	3.6475
14.61	4.6925
19.48	6.55
24.35	7.91
29.22	9.1175

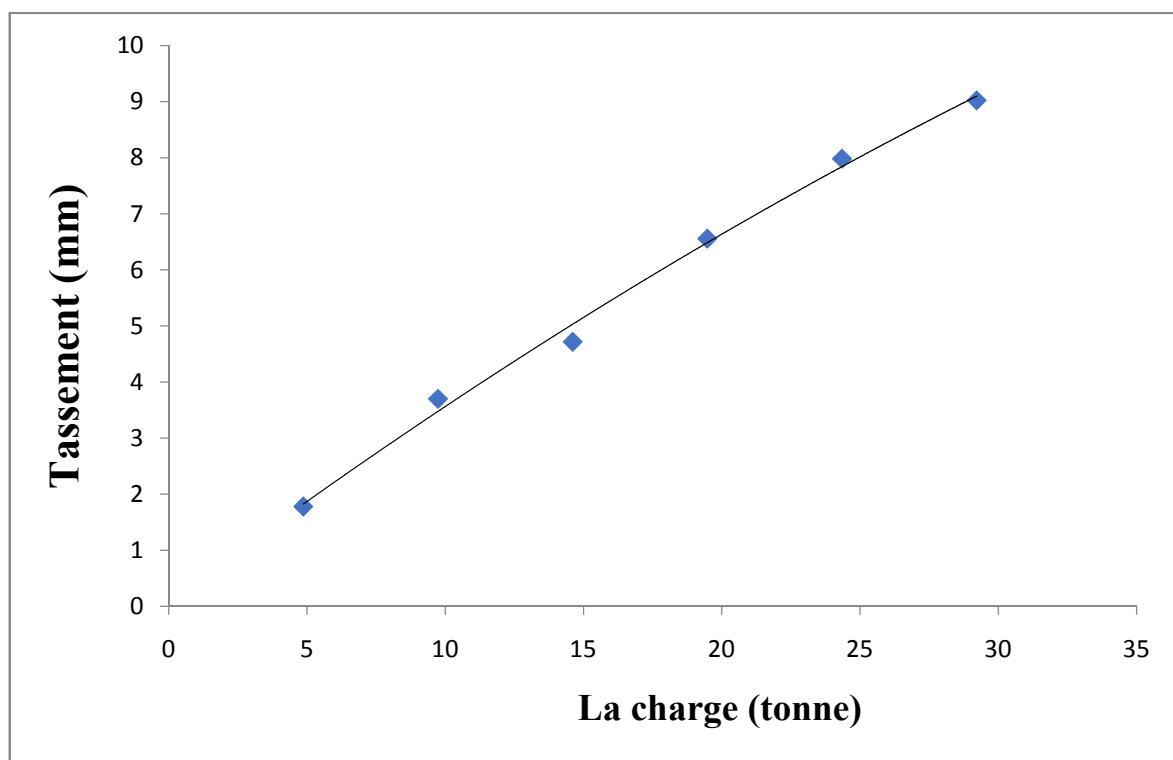
**Figure IV. 11.** Courbes des tassements à la fin de chaque palier en fonction des charges appliquées

Tableau IV. 9. Valeurs des tassements de chaque palier

Temps (min)	ln T (min)	Tassement (mm)					
		Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 4	Palier 5	Palier 6
1	0	1.7275	3.5325	4.59	6.3325	7.605	8.71
2	0.6931472	1.7375	3.5575	4.6275	6.37	7.645	8.7525
4	1.3862944	1.755	3.595	4.65	6.4025	7.695	8.795
8	2.0794415	1.755	3.625	4.65	6.4325	7.7375	8.84
15	2.7080502	1.765	3.625	4.6625	6.46	7.825	8.895
30	3.40119738	1.78	3.635	4.7995	6.495	7.91	8.9475
45	3.80666249	1.78	3.6475	4.6925	6.54	7.91	8.99
60	4.09434456	1.78	3.6475	4.6925	6.55	7.91	9.1175

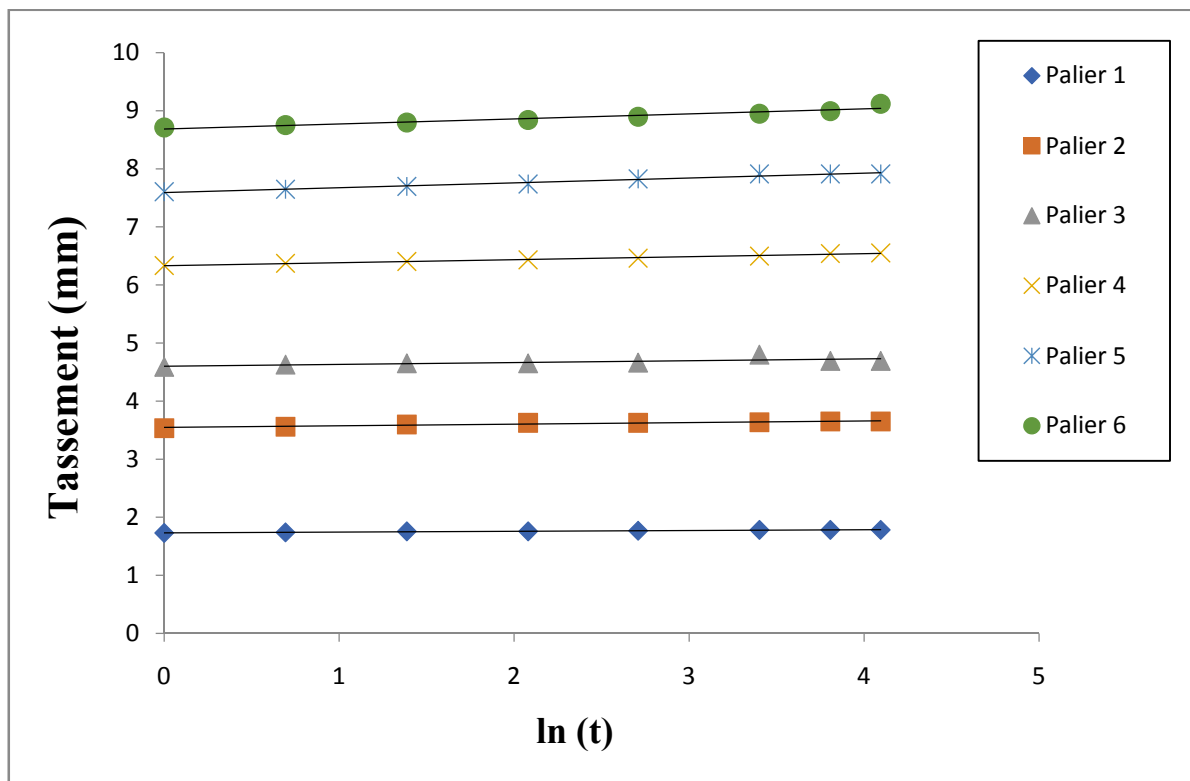
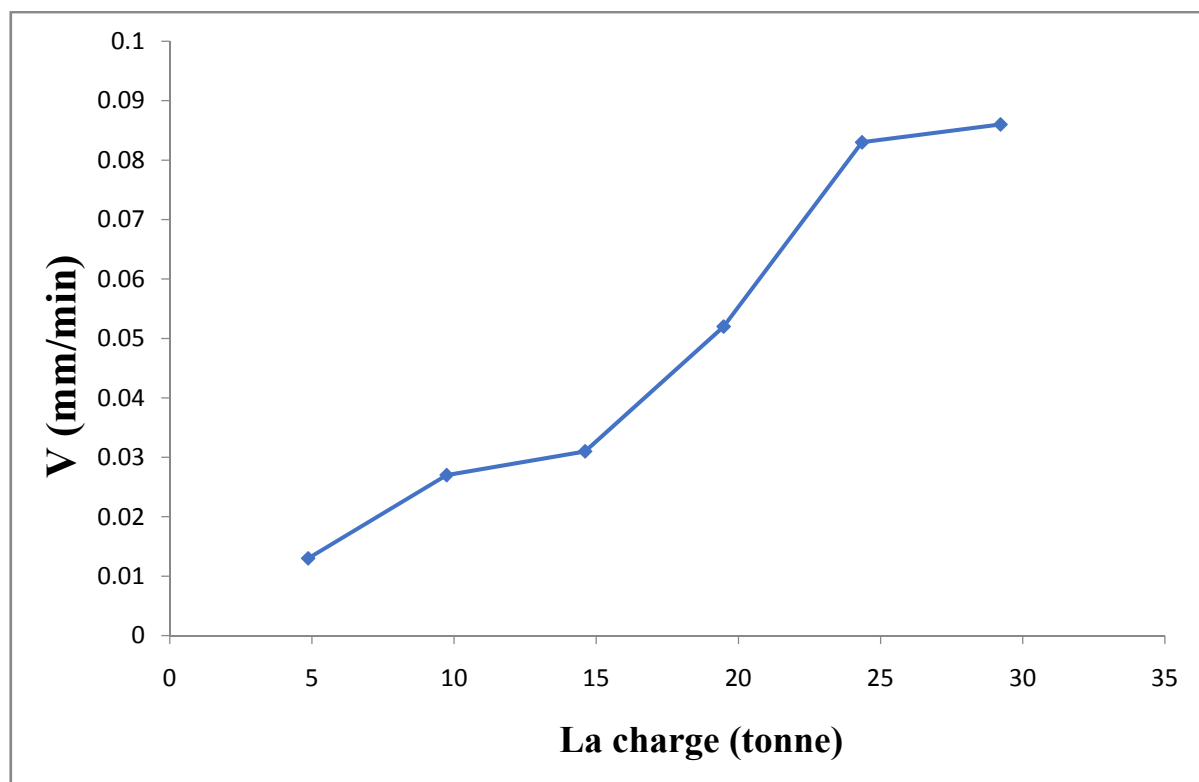


Figure IV. 12. Les variations des tassements de chaque palier au cours du temps

**Tableau IV. 10.** Valeurs des tassements enfin de chaque palier en fonction des charges appliquées

La charge (t)	La pente (mm/min)
4.87	0.013
9.74	0.027
14.61	0.031
19.48	0.052
24.35	0.083
29.22	0.086

**Figure IV. 13.** Courbe de la vitesse des tassements en fonction de la charge appliquée

## Exemple 4 : Colonne 4B 465

Tableau IV. 11. Valeurs des tassements à la fin de chaque palier en fonction des charges appliquées

La charge (t)	Tassement (mm)
5.53	4.4625
11.06	6.825
16.59	9.1395
22.11	11.3125
27.64	13.4375
33.17	15.08

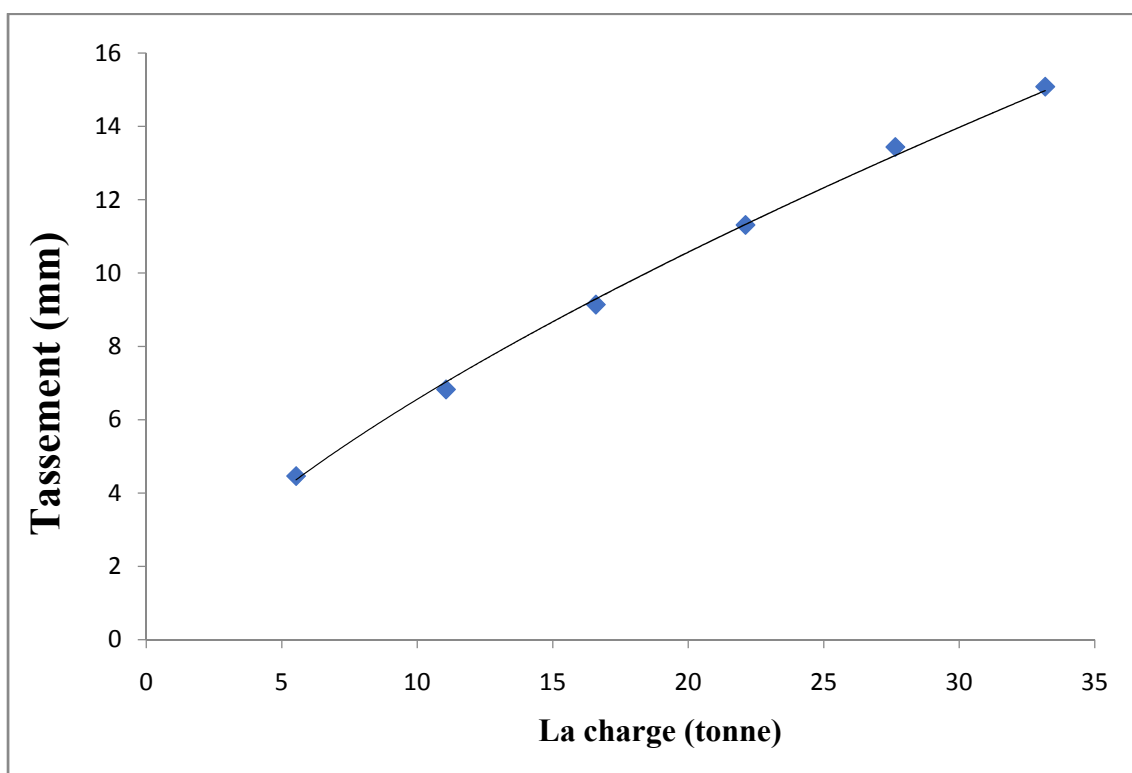


Figure IV. 14. Courbes des tassements à la fin de chaque palier en fonction des charges appliquées

Tableau IV. 12. Valeurs des tassements de chaque palier

Temps (min)	ln T (min)	Tassement (mm)					
		Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 4	Palier 5	Palier 6
1	0	4.345	6.6525	8.9675	11.0625	13.1425	14.74
2	0.6931472	4.375	6.6975	9.0125	11.1175	13.19	14.80
4	1.3862944	4.4	6.72	9.06	11.17	13.24	14.86
8	2.0794415	4.43	6.755	9.07	11.1875	13.2825	14.91
15	2.7080502	4.4475	6.805	9.1	11.2175	13.34	14.95
30	3.40119738	4.4625	6.825	9.1395	11.265	13.3875	15.02
45	3.80666249	4.4625	6.825	9.1395	11.3025	13.415	15.05
60	4.09434456	4.4625	6.825	9.1395	11.3125	13.4375	15.08

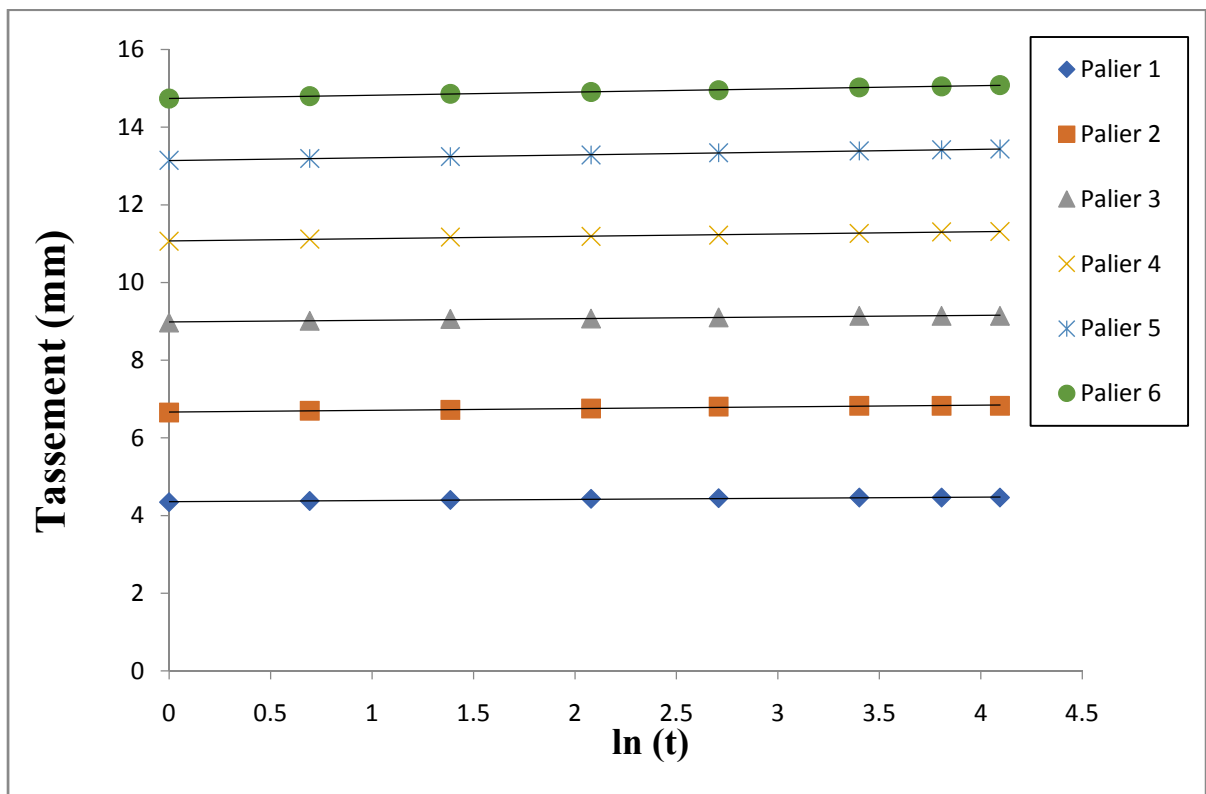
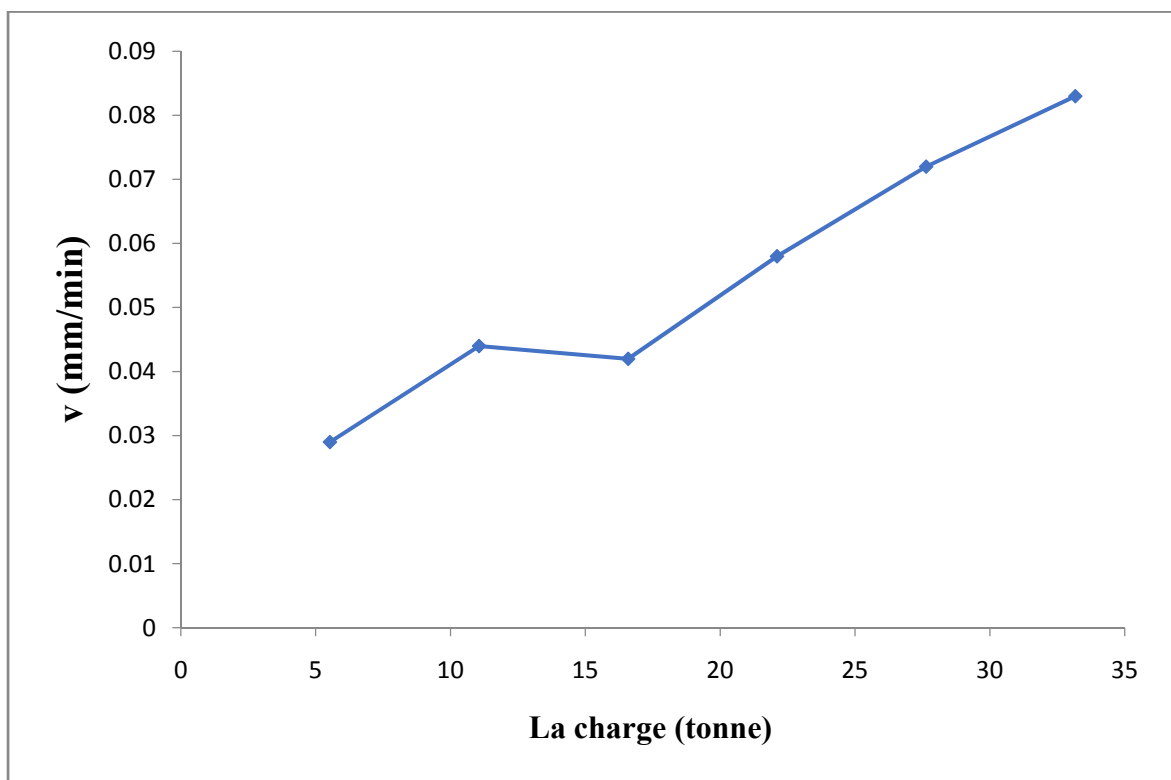


Figure IV. 15. Les variations des tassements de chaque palier au cours du temps

**Tableau IV. 13.** Valeurs des tassements enfin de chaque palier en fonction des charges appliquées

La charge (t)	La pente (mm/min)
5.53	0.029
11.06	0.044
16.59	0.042
22.11	0.058
27.64	0.072
33.17	0.083

**Figure IV. 16.** Courbe de la vitesse des tassements en fonction de la charge appliquée

## Exemple 5 : Colonne 2A 635

Tableau IV. 14. Valeurs de la vitesse des tassements en fonction des charges appliquées

La charge (t)	Tassement (mm)
5.5	3.94
11	4.7925
16.5	5.3125
22	6.04
27.5	6.8
33	8.375

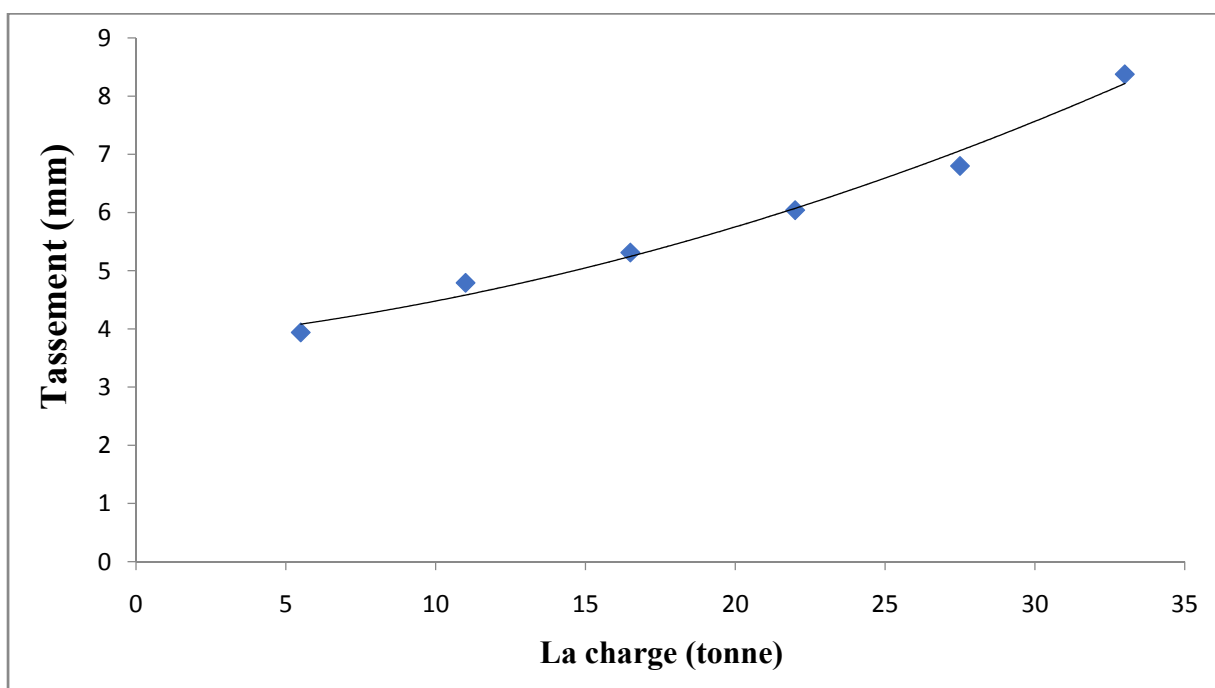


Figure IV. 17. Courbes des tassements à la fin de chaque palier en fonction des charges appliquées

Tableau IV. 15. Valeurs des tassements de chaque palier

Temps (min)	ln T (min)	Tassement (mm)					
		Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 4	Palier 5	Palier 6
1	0	3.9175	4.7025	5.2	5.87	6.5425	7.9225
2	0.6931472	3.92	4.79	5.2125	5.8975	6.5675	7.995
3	1.0986123	3.92	4.7925	5.245	5.91	6.5925	8.04
4	1.3862944	3.9225	4.7925	5.2525	5.915	6.6075	8.085
5	1.6094379	3.925	4.7925	5.2525	5.9225	6.62	8.105
10	2.3025851	3.925	4.7925	5.26	5.94	6.6475	8.185
15	2.7080502	3.9375	4.7925	5.2625	5.9775	6.6725	8.225
20	2.9957323	3.94	4.7925	5.2725	5.98	6.6925	8.2575
25	3.2188758	3.94	4.7925	5.275	6.015	6.695	8.285
30	3.4011974	3.94	4.7925	5.285	6.0325	6.715	8.2975
45	3.8066625	3.94	4.7925	5.3125	6.0375	6.74	8.3525
60	4.0943446	3.94	4.7925	5.3125	6.04	6.75	8.375

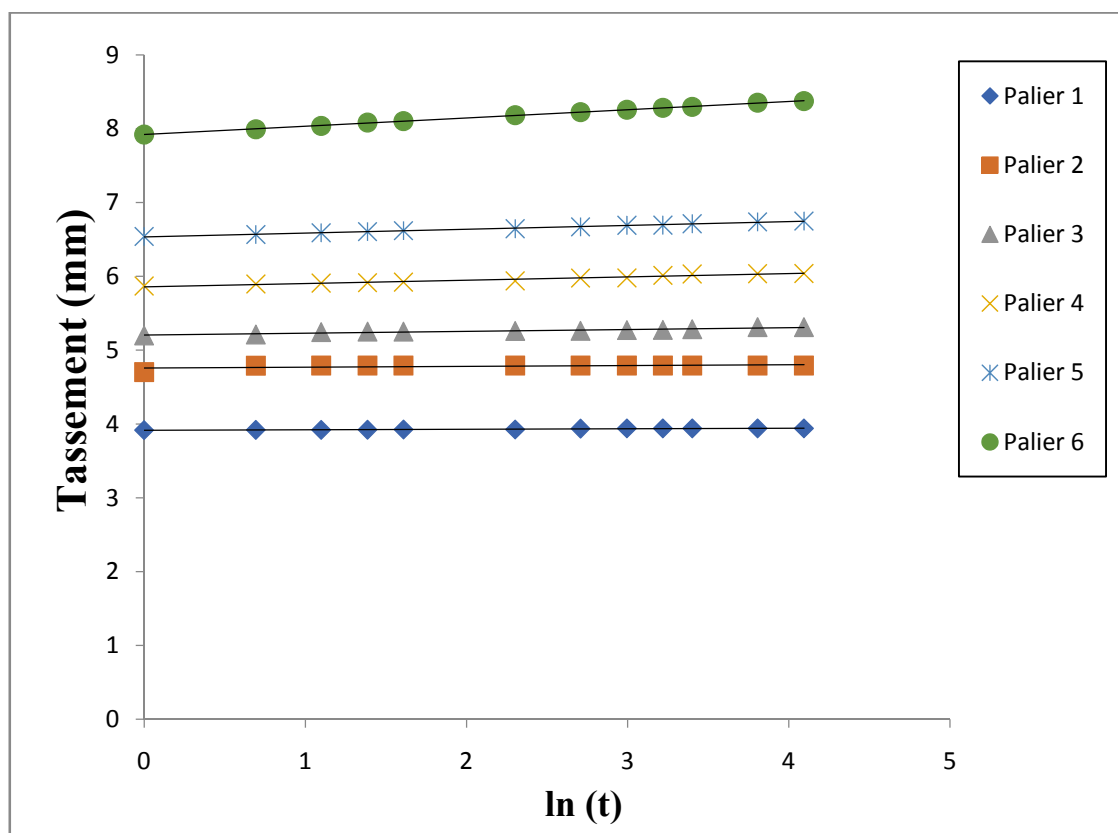
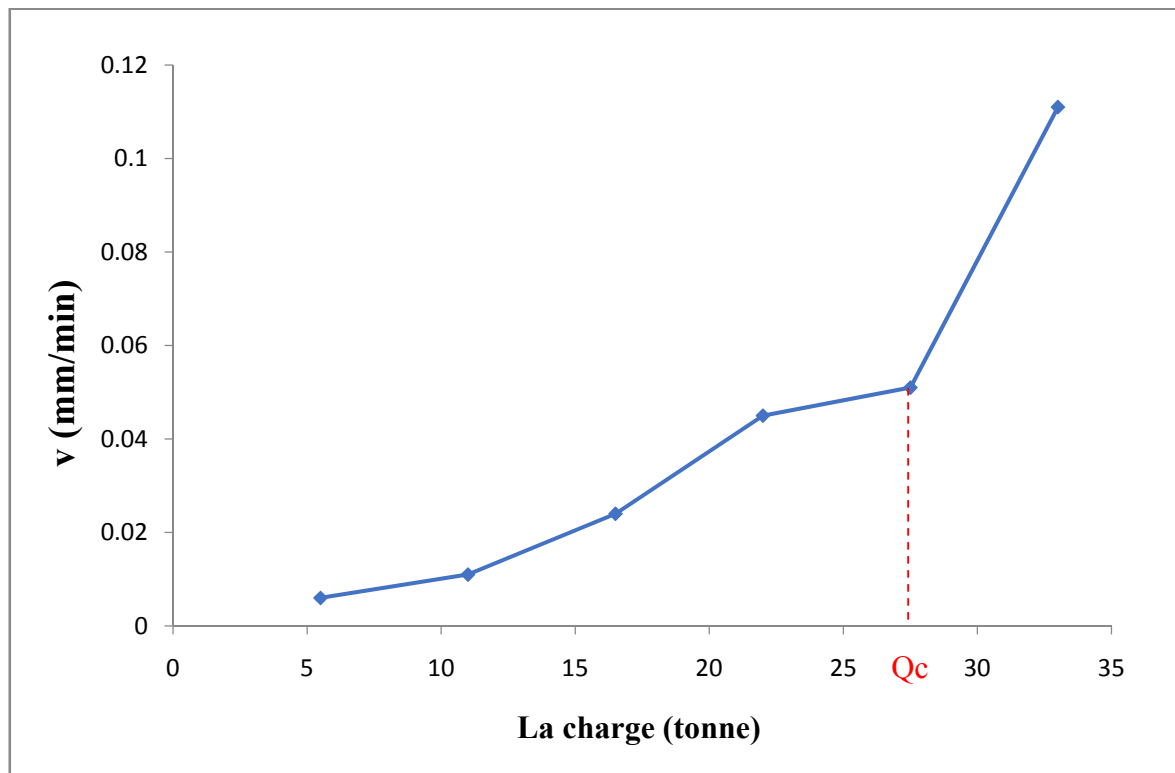


Figure IV. 18. Les variations des tassements de chaque palier au cours du temps

**Tableau IV. 16.** Valeurs de la vitesse des tassements en fonction des charges appliquées

La charge (t)	La pente (mm/min)
5.5	0.006
11	0.011
16.5	0.024
22	0.045
27.5	0.051
33	0.111

**Figure IV. 19.** Courbe de la vitesse des tassements en fonction de la charge appliquée

**Commentaires :**

- Les courbes des tassements à la fin de chaque palier en fonction des charges appliquées indiquent qu'il y'a une relation proportionnelle entre les tassements et les charges appliquées ;
- Les courbes des tassements de chaque palier en fonction du temps ont été réalisées pour nous aider à déterminer la pente (a) dans chaque palier, qui signifie la vitesse du tassement (V) ;
- Les courbes de la vitesse des tassements en fonction de la charge appliquée ont été réalisées pour voir si la charge critique de fluage « Qc » a été atteinte.
  - Dans l'exemple 1, 2, 3 et 4, la charge critique n'est pas atteinte, ce qui indique que la colonne est bien réalisée et est donc conforme aux exigences de portance et de tassement ;
  - Par contre dans l'exemple 5, on remarque un changement rapide de l'allure du tassement signifiant la rupture de la colonne, cela s'explique par l'atteinte de la charge critique de fluage de la colonne à plus de 125% de la charge nominale soit 27,5 tonnes.

Par ailleurs les dispositions de sécurité ont été soigneusement observées et nous travaillons avec un facteur de sécurité de 1,5 la charge à l'ELS, tout ensachant que toutes les colonnes choisies pour les essais de chargement présentent un faible diamètre et/ou un faible compactage, ce qui signifie que ces colonnes sont les plus défavorables. Autrement, les autres colonnes permettront largement d'atteindre l'objectif du traitement.

**IV.3.3. Essai au pénétromètre statique CPT(Contrôle de la continuité et de la compacité)**

Le contrôle de la continuité et de la compacité des colonnes se fait par réalisation d'essais de pénétration statique CPT entre colonnes, afin de vérifier l'amélioration du traitement en terme de densification du sol.

La distinction de l'effet du traitement se fait par superposition des graphes des CPT réalisés avant et après traitement dans la même zone.

A ce titre, les résultats sont mentionnés dans les figures (VI.20 et IV.21) :

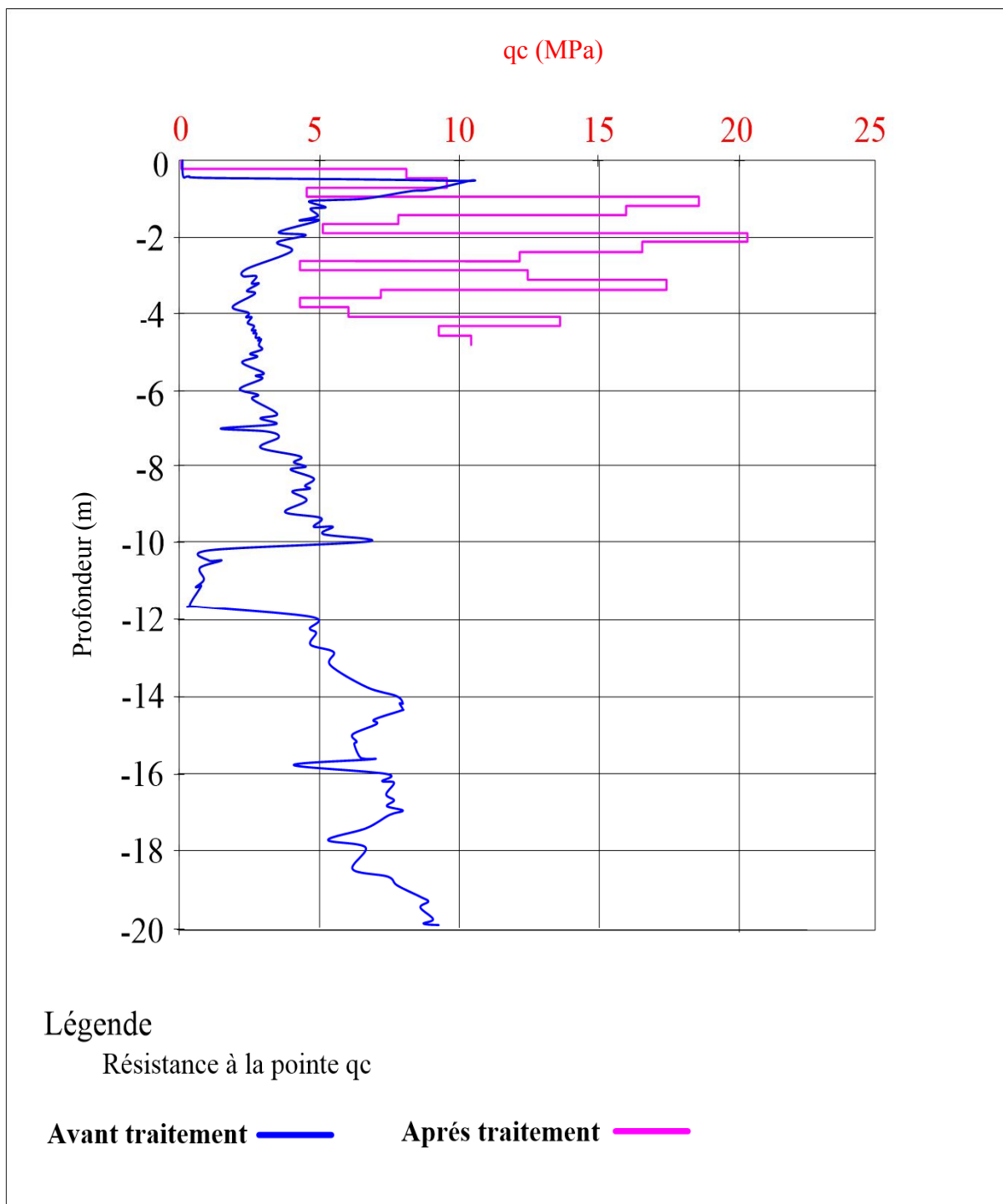
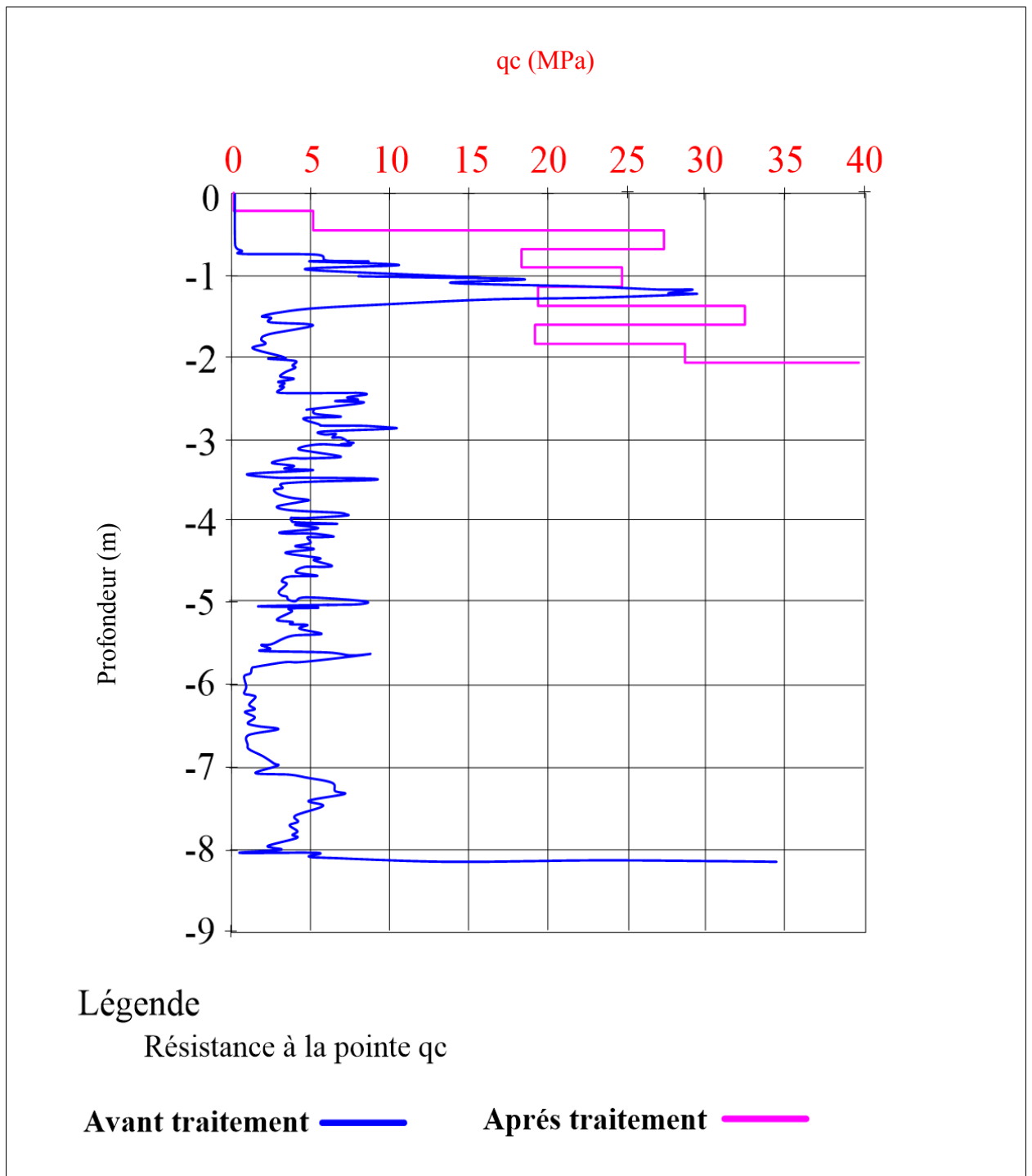


Figure IV. 20. La résistance à la pointe avant et après traitement dans l'ancienne Darse N°7



**Figure IV. 21.** La résistance à la pointe avant et après traitement au niveau de Môle El-Hadjar

D'après la comparaison des résultats des essais au pénétromètre statique avant et après traitement, on distingue que :

- Les profondeurs atteintes après traitement sont faibles par rapport à celles remarquées avant traitement (Enregistrement de refus) ;
- La résistance en pointe est plus importante après traitement.

Cela implique qu'il y'a une amélioration de la portance du sol dans le terminal à conteneur du port d'Alger.

**IV.4. Conclusion**

L'analyse des résultats obtenus en terme d'essais de contrôle des colonnes ballastées ainsi que le sol entre colonnes indique que :

- L'essai au pénétromètre statique permet de déduire qu'il existe un lien entre l'effort de compactage et le comportement des colonnes ballastées vis-à-vis aux étreintes latérales ;
- L'essai de chargement reste l'essai le plus significatif pour démontrer que les colonnes exécutées répondent aux exigences de portance et de tassement sur toute leur profondeur.

## Conclusion générale

Ce présent document expose la méthode la plus convenable pour traiter les différents problèmes de liquéfaction et du tassement dans le terminal à conteneur du port d'Alger constatés après le séisme de Boumerdes en 2003, pour cela une campagne de reconnaissance géotechnique a été réalisée.

Ainsi, l'analyse des résultats géologiques et géotechniques de la zone d'étude permet de distinguer trois couches différentes :

- Une couche de remblai apparaît dans tout le terminal, avec une épaisseur moyenne de 14 mètre dont les résultats des essais CPT montrent que :
  - le sol anthropique de l'ancienne Darse N°7 est un sol lâche dans l'ensemble ;
  - le sol anthropique de Môle El-Hadjar est un sol lâche à moyennement dense.
- Une couche de grès disant plus au moins mince vient au-dessous de la couche de remblai d'une épaisseur moyenne de 2 mètre ;
- Une marne grisâtre à noirâtre, ferme et compacte se trouve au-dessous de la couche de remblai ou de grès en cas de son existence. Les bons résultats de ce sol sont confirmés par l'essai CPT qui montre une bonne résistance à la pointe (qc), ce qui permet de dire que le sol de cette couche est non déformable ainsi qu'il est favorable pour la construction, mais les résultats médiocres trouvés après l'analyse du sol anthropique indiquent que le sol du TAC est déconseillé pour la construction, à cet effet un renforcement de ce sol est une étape primordiale.

La technique la plus adéquate pour l'amélioration du sol au niveau du terminal à conteneurs du port d'Alger est celle des colonnes ballastées à cause du pourcentage important de fines.

Pour que les colonnes ballastées puissent accomplir leur rôle, les recommandations suivantes doivent être adoptées :

### ➤ **Pendant la réalisation des colonnes :**

- Les colonnes doivent avoir des profondeurs suffisantes pour traverser toute la couche sableuse liquéfiable afin de dissiper les pressions interstitielles ;
- L'intensité de compactage doit atteindre ou dépasser 100 A sur toute la longueur de la colonne.

➤ **Après la réalisation des colonnes :**

Il est recommandé de procéder à des essais tels que l'essai de pénétromètre statique CPT entre colonne ainsi qu'à des essais de chargement afin de vérifier la résistance et la capacité portante des colonnes ballastés.

A la fin de ce travail on synthétise que les caractéristiques géotechniques du terminal à conteneurs du port d'Alger sont améliorés, où la couche de remblai lâche est devenue consolidée après la réalisation des colonnes ballastées et donc apte à recevoir des charges d'exploitation plus importantes.

## Références bibliographiques

- AFNOR (2005).** Exécution de travaux géotechniques spéciaux : Amélioration des massifs de sol par vibration. *Livre-Association Française Normalisation-France*. 22 p.
- AMARNI N. (2014).** Evaluation des fréquences de résonance du sol de terminal à conteneur du port d'Alger par la méthode H/V-bruit de fond. *Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. ENSSMAL : Alger*. 14 p.
- AYMÈ A. (1964).** Carte géologique au 1/50000 Alger. N°21. *Publ. ser. Carte. Géol. Algérie, Alger*. 243, 246 p.
- BAKEL O., HAMZA M. (2017).** Amélioration des sols par colonnes ballastées dans le terminal à conteneurs du port d'Alger : Suivi des travaux et contrôle de la qualité par essais mécanique in-situ-*Mémoire de master. Géotechnique. USTHB : Alger*. 9 p.
- BELKAHLA S., BENKREIRA A. (2017).** Travaux de renforcement du terminal à conteneur du port d'Alger ; Contribution à l'analyse des observations expérimentales et modélisation numérique par élément finis-*Mémoire de master. Génie civil. Université de Blida : Alger*. 58, 61 p.
- BENALLAL K., OURABIA K. (1989).** Monographie géologique et géotechnique de la région d'Alger. *Office des publications universitaires*. 109 p.
- BENIDIR N. et 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. Aménagement du littoral. ENSSMAL : Alger*. 6 p.
- BOUKHROUF M., et CHERIFI E. (2012).** Evaluation des fréquences de résonance du sol de l'Est de la baie d'Alger par la méthode H/V-bruit de fond. *Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. ENSSMAL : Alger*. 10, 11 p.
- C.G.S. (2003).** Centre National de recherche appliquée en génie para-sismique.
- CORNEILLE S. (2007).** Etude du comportement mécanique des colonnes ballastées chargées par des semelles rigides. *Thèse de doctorat. Génie Civil-Hydrosystèmes-Géotechnique. Université de Lorraine : France*. 24, 25, 26, 28 p.
- DHOUIB A., BLONDEAU F. (2005).** COLONNES BALLASTÉES : Techniques de mise en œuvre, domaines d'application, comportement, justification, contrôle, axes de recherche et

développement. *Livre. Presses de l'école nationale des ponts et chaussée : FRANCE. 13, 38, 194 p.*

**GHEGEDIBAN S. (2012).** Méthode de calcul de transmission des efforts horizontaux de la semelle aux inclusions rigides. *Mémoire d'ingénieur. Géologie. INSA de Strasbourg : France.16, 17 p.*

**HAMAGA M., SAYAD, R. (2006).** Application de la méthode de fond au glissement de terrain de Telemly-Alger. *Mémoire d'ingénieure. Géotechnique. USTHB : Alger, 62 p.*

**HELLEL M. (2010).** Utilisation du bruit de fond pour l'évaluation de la structure géologique 3D : application à trois sites en contexte de forte sismicité. *Thèse de doctorat. Géotechnique. USTHB : Alger. 36 p.*

**IKHLEF A., MOKRANI S. (2006).** Etude géologique, géophysique et géotechnique du Projet « City Center» Pins Maritimes (Alger). *Mémoire d'ingénieur. Géotechnique .USTHB : Alger.95 p.*

**JICA Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme (2006).** Étude de Microzonage sismique de la Wilaya d'Alger-*Rapport Résumé-Document non publié. Alger : JICA.*

**MEGHRAOUI M. (1988).** Géologie des zones sismiques du Nord de l'Algérie. Paléosismologie, tectonique active et synthèse sismotectonique. *Thèse de doctorat. Géologie. Université Paris VI : France.356 p.*

**NOUI A. (2012).** CONCEPTION DES FONDATIONS SUR COLONNES BALLASTÈES CAS D'OUVRAGES D'ARTS. *Mémoire de magister. Géotechnique. Université El Hadj Lakhdar : Batna.4 p.*

**RECOMMANDATIONS COLONNES BALLASTEES (version n°2 de 2011).** Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et sous ouvrages sensibles au tassement-*CFMS-Revue française de géotechnique.5, 6p.*

**REZGUI W., CHERIET W. (2008).** Etude de l'envasement du port d'Alger au moyen du Cs-137. *Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. ENSSMAL : Alger.15 p.*

**SACI L. (2011).** Etude de l'évolution des paramètres dynamiques des sols à partir d'essais géophysiques. *Mémoire de magister. Géotechnique et Environnement. Université Mouloud Mammeri : Tizi Ouzou. 7, 8 p.*

**SEMMANE F. (2005).** Caractérisation de la source sismique à partir des données en champ proche. Application aux séismes de Tottori (Japon) et Boumerdes (Algérie). *Thèse de doctorat. Géologie. Université Joseph Fourier : Grenoble I. 178 p.*

**SERTIER N. (2005/2006).** Amélioration des sols. *Mémoire de Licences IUP. Géologie. Université de la Réunion : France. 22, 34 p.*

**SIX V. (2006).** Analyse du comportement des colonnes ballastées : influence des conditions initiales. *Thèse de doctorat. Génie civil. Université des sciences et technologies : Lille. 13 et 14 p.*

**ZGHIMI I. (2012).** Etude numérique de l'influence des paramètres géotechniques sur le comportement des sols renforcés par colonnes ballastées. *Mémoire de magister. Génie civil. Université Mouloud Mammeri : Tizi Ouzou. 37 p.*

# **Annexes**

## Annexe 1 : Cordonnées géographiques

- du TAC

	X	Y
1	505927.072	4068491.55
2	506088.874	4068493.05
3	506088.874	4068491.55
4	506239.094	4068493.05
5	505927.072	4068262.04
6	506088.874	4068192.8
7	506239.094	4068056.59
8	506239.094	4068033.86
9	506253.594	4068027.68
10	506253.594	4067933.02
11	505995.297	4067933.02
12	505995.297	4067951.31
13	505927.072	4067951.31
14	505941.056	4068073.36
15	506072.093	4068017.57
16	506109.266	4068104.89
17	505978.229	4068160.67

- Des sondages carottés

	X	Y
S01	506023.59	4068504.6
S02	506123.59	4068504.6
S03	506223.59	4068504.6
S04	506248.59	4068429.5
S05	506248.59	4068329.5
S06	506248.59	4068229.5
S07	506248.59	4068129.5
S08	505958.59	4068429.6
S09	506093.59	4068429.6
S10	506028.59	4068359.6
S11	506173.59	4068359.6
S12	505958.59	4068289.6
S13	506093.59	4068289.6
S14	506028.59	4068219.6
S15	506173.59	4068219.6
S16	505958.59	4068149.6
S17	506093.59	4068149.6
S18	506028.59	4068079.6
S19	506173.59	4068079.6
S20	505958.59	4068019.6
S21	506083.59	4068009.6
S22	506238.59	4068009.6

- **Des essais CPT**

	X	Y
C01	505973.59	4068494.6
C02	506073.59	4068494.6
C03	506173.59	4068494.6
C04	506243.59	4068479.5
C05	506243.59	4068379.5
C06	506243.59	4068279.5
C07	506243.59	4068179.5
C08	506241.62	4068079.5
C09	506028.59	4068429.6
C10	506173.59	4068429.6
C11	505958.59	4068359.6
C12	506093.59	4068359.6
C13	506028.59	4068290.6
C14	506173.59	4068290.6
C15	505958.59	4068219.6
C16	506093.59	4068219.6
C17	506028.59	4068149.6
C18	506173.59	4068149.6
C19	505958.59	4068079.6
C20	506083.59	4068079.6
C21	506028.59	4068009.6
C22	506173.59	4068009.6
C23	506238.59	4067949.6

- **Des colonnes ballastées**

Nom de la colonne	X	Y
1A 226	505 969,28	4 068 265,86
1A 271	505 964,22	4 068 253,19
1A 478	505 940,57	4 068 270,74
1B 089	505 981,10	4 068 299,99
1B 239	505 969,28	4 068 318,51
1B 432	505 952,40	4 068 304,86
1C 125	505 977,73	4 068 331,19
1C 295	505 964,22	4 068 350,69
1C 417	505 954,08	4 068 354,59
1D 081	505 981,10	4 068 362,39
1D 226	505 969,28	4 068 371,16
1D 262	505 965,91	4 068 363,36
2A 189	506 035,15	4 068 260,99
2A 239	506 031,77	4 068 280,49
2A 635	505 997,99	4 068 272,69
2B 406	506 016,56	4 068 293,16
2B 553	506 004,75	4 068 307,79
2B 674	505 994,62	4 068 309,74
2C 639	505 997,99	4 068 358,49
2D 459	506 013,19	4 068 396,51
2D 508	505 008,13	4 068 376,04
2D 632	505 997,99	4 068 383,84
2E 440	506 014,88	4 068 438,44
2E 506	506 008,13	4 068 411,14
2E 553	506 004,75	4 068 424,79
2F 167	506 994,62	4 068 442,34
3A 256	505 967,73	4 068 989,51
3B 383	505 957,42	4 068 009,57

3B 571	505 941,71	4 068 026,51
3C 068	505 983,63	4 068 052,48
3C 290	505 966,79	4 068 055,45
3C 605	505 941,37	4 068 055,63
3D 290	505 966,61	4 068 091,89
3D 611	505 941,75	4068 053,61
3E 191	505 975,08	4 068 130,39
3E 291	505 966,83	4 068 129,58
3E 463	505 952,66	4 068 117,61
3E 489	505 951,10	4 068 122,11
3F 260	505 969,46	4 068 182,51
3F 473	505 965,99	4 068 236,51
3G 329	505 960,96	4 068 203,71
3G 535	505 943,48	4 068 215,51
3H 116	505 952,44	4 068 174,80
4A 243	506 030,08	4 067 961,51
4A 252	506 029,85	4 067 979,87
4A 671	505 993,53	4 067 978,47
4B 153	506 040,06	4 068 016,96
4B 465	506 014,75	4 068 006,07
4C 420	506 019,68	4 068 069,91
4D 800	505 989,85	4 068 106,58
4E 322	506 026,06	4 068 115,24
4E 483	506 013,95	4 068 140,96
4F 638	505 997,36	4 068 169,97
4F 651	505 994,58	4 068 144,65
4G 333	506 022,84	4 068 209,70
4G 406	506 016,44	4 068196,03

**Annexe 2: Essai de compressibilité des sols :**

- **Tableau relative à la compressibilité des sols**

<b>Indice de compressibilité(Cc)</b>	<b>Appréciation</b>
$C_c < 0,02$	Sol très incompressible
$0,02 < C_c < 0,05$	Sol incompressible
$0,05 < C_c < 0,1$	Sol peu compressible
$0,1 < C_c < 0,2$	Sol de compressibilité moyenne
$0,2 < C_c < 0,3$	Sol assez compressible
$0,3 < C_c < 0,5$	Sol très compressible

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

<b>Coefficient de gonflement (Cg%)</b>	<b>Appréciation</b>
$0,04 < C_g < 0,25$	Sol gonflant
$0,02 < C_g < 0,04$	Sol peu gonflant

- **Tableau de poids volumique sec**

<b>Poids volumique sec</b>	<b>Appréciation</b>
$\gamma_d < 1,6$	Faible
$1,6 < \gamma_d < 1,8$	Moyenne
$\gamma_d > 1,8$	Dense

**Annexe 3 : Champ d'application des colonnes ballastées : nature et résistance des sols**

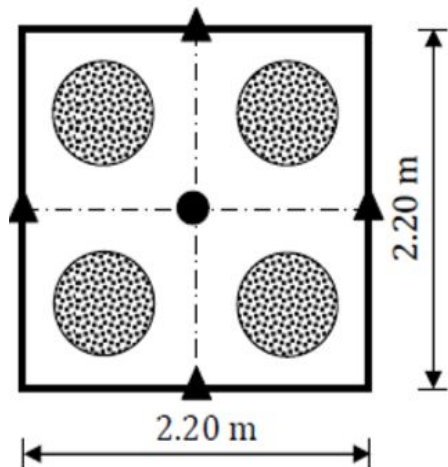
Sols	Faisabilité	Ereinte latérale(1)				Remarques
		P <sub>1</sub> (KPa)	q <sub>c</sub> (MPa)	N <sub>SPT</sub> (coups)	C <sub>u</sub> (KPa)	
Argile	Oui	150-400	0,6-1,2	4-6	25-50	-
Limon	Oui	150-400	0,6-1,2	4-6	25-50	-
Sable fin lâche	Oui	150-400	0,6-1,2	4-6	-	-
Tourbe	Non	-	-	-	-	Matériaux évolutif
Autres Sols organiques	Non	-	-	-	-	-
Remblai inerte	Oui	200-500	0,6-1,6	-	-	Matériaux évolutif
Décharge	Non	-	-	-	-	Matériaux évolutif

## Annexe 4 : Feuille d'essai pour l'essai de chargement

Début 9h45mn									1D 262	
Dossier n° :		Ouvrage : SECTION- I ZONE- D,				Date de l'essai : 4/03/2015,				
Chantier : Port d'Alger,		Type de colonne : CBH,				Opérateur : ZAATOUCHE/GHANEMI/ FERNANE,				
Client : EPAL, Comparateur : 4 2 3 1 Quai 30		Essai sur colonne isolée N° 262 S : 86,59 Cm2, Diamètre réelle de la colonne (0,9m sur 1m),				Charge à 100% : 22,0 Tonnes Charge à 150% : 32,0 Tonnes Vérification avant essai : Oui, Page 1/3				
Palier de charge %	Charge appliquée Bars	Charge réels appliquée Bars	Charge appliquée tonne	Temps cumulé H : mn	Mesure des tassements avec comparateur				Tassement moyen (mm)	Observations
					N°01 (mm)	N°02 (mm)	N°03 (mm)	N°04 (mm)		
0%	0		0	0	1.64	0.71	0.7	2.13	1.295	
25%	64		5.5	15	2.45	1.53	1.91	3.3	2.2975	
0%	0		0	0	1.82	0.89	1	2.41	1.53	
25%	64	80	5.5	0:01	2.52	1.64	2.04	3.44	2.41	
				0:02	2.53	1.64	2.05	3.45	2.4175	
				0:03	2.54	1.64	2.06	3.46	2.425	
				0:04	2.54	1.64	2.06	3.46	2.425	
				0:05	2.54	1.64	2.06	3.46	2.425	
				0:10	2.54	1.64	2.07	3.47	2.43	
				0:15	2.54	1.64	2.07	3.47	2.43	
				0:20	2.54	1.64	2.07	3.47	2.43	
				0:25	2.54	1.64	2.07	3.47	2.43	
		75		0:30	2.54	1.64	2.07	3.47	2.43	
				0:45	/	/	/	/		
				1:00	/	/	/	/		
50%	127	130	11	0:01	2.98	2.11	2.61	4	2.925	
				0:02	3	2.12	2.62	4.01	2.9375	
				0:03	3	2.12	2.62	4.01	2.9375	
				0:04	3	2.12	2.62	4.01	2.9375	
				0:05	3.01	2.13	2.62	4.01	2.9425	
				0:10	3.04	2.14	2.62	4.01	2.9525	
				0:15	3.04	2.14	2.62	4.01	2.9525	
				0:20	3.05	2.15	2.62	4	2.955	
				0:25	3.06	2.15	2.61	4	2.955	
				0:30	3.07	2.16	2.61	4.01	2.9625	
				0:45	3.07	2.16	2.61	4.01	2.9625	
				1:00	3.07	2.16	2.61	4.01	2.9625	
75%	191	200	16.5	0:01	3.71	2.8	3.32	4.72	3.6375	
				0:02	3.73	2.82	3.35	4.74	3.66	
				0:03	3.73	2.82	3.35	4.74	3.66	
				0:04	3.74	2.83	3.36	4.75	3.67	
				0:05	3.75	2.83	3.36	4.75	3.6725	
				0:10	3.77	2.85	3.38	4.75	3.6875	
				0:15	3.77	2.85	3.38	4.75	3.6875	
		195		0:20	3.77	2.85	3.38	4.77	3.6925	
				0:25	3.79	2.86	3.39	4.78	3.705	
				0:30	3.79	2.86	3.39	4.78	3.705	
				0:45	3.79	2.86	3.39	4.8	3.71	
				1:00	3.79	2.86	3.39	4.8	3.71	
100%	254	260	22	0:01	4.38	3.54	4.19	5.62	4.4325	
				0:02	4.39	3.56	4.23	5.64	4.455	
				0:03	4.4	3.57	4.25	5.66	4.47	
				0:04	4.41	3.59	4.26	5.66	4.48	
				0:05	4.42	3.59	4.26	5.67	4.485	
				0:10	4.44	3.61	4.3	5.7	4.5125	
				0:15	4.45	3.62	4.3	5.71	4.52	

				0:20	4.46	3.62	4.32	5.73	4.5325	
				0:25	4.48	3.64	4.34	5.74	4.55	
				0:30	4.49	3.66	4.35	5.76	4.565	
		250		0:45	4.5	3.67	4.39	5.79	4.5875	
				1:00	4.52	3.68	4.39	5.79	4.595	
125%	318	320	27.5	0:01	5.46	4.61	5.46	6.87	5.6	
				0:02	5.5	4.65	5.51	6.91	5.6425	
				0:03	5.53	4.68	5.54	6.94	5.6725	
				0:04	5.55	4.7	5.56	6.96	5.6925	
				0:05	5.56	4.71	5.57	6.99	5.7075	
				0:10	5.6	4.76	5.63	7.03	5.755	
		300		0:15	5.63	4.79	5.67	7.08	5.7925	
				0:20	5.69	4.83	5.7	7.11	5.8325	
				0:25	5.71	4.85	5.71	7.13	5.85	
				0:30	5.75	4.86	5.73	7.14	5.87	
				0:45	5.76	4.86	5.73	7.15	5.875	
				1:00	5.78	4.88	5.75	7.17	5.895	
150%	381	390	33	0:01	8.28	7.3	8.54	10.81	8.7325	
				0:02	8.35	7.38	8.58	10.86	8.7925	
				0:03	8.41	7.42	8.63	10.9	8.84	
				0:04	8.45	7.45	8.66	10.92	8.87	
		370		0:05	8.47	7.47	8.68	10.95	8.8925	
				0:10	8.59	7.58	8.8	11.06	9.0075	
				0:15	8.62	7.6	8.82	11.08	9.03	
				0:20	8.68	7.64	8.88	11.13	9.0825	
				0:25	8.69	7.66	8.9	11.15	9.1	
		360		0:30	8.71	7.67	8.91	11.16	9.1125	
				0:45	8.76	7.71	8.96	11.22	9.1625	
				1:00	8.83	7.79	9	11.25	9.2175	
125%	318	320	27.5	0:01	8.83	7.78	9	11.25	9.215	
				0:02	8.83	7.78	9	11.25	9.215	
				0:03	8.83	7.78	9	11.25	9.215	
				0:04	8.83	7.78	9	11.25	9.215	
				0:05	8.83	7.78	9	11.25	9.215	
100%	254	250	22	0:06	8.62	7.54	8.78	11.1	9.01	
				0:07	8.61	7.54	8.77	11.1	9.005	
				0:08	8.61	7.54	8.77	11.1	9.005	
				0:09	8.61	7.54	8.77	11.1	9.005	
				0:10	8.61	7.54	8.77	11.1	9.005	
75%	191	190	16.5	0:11	8.38	7.3	8.55	10.9	8.7825	
				0:12	8.38	7.3	8.55	10.9	8.7825	
				0:13	8.38	7.3	8.55	10.9	8.7825	
				0:14	8.38	7.29	8.55	10.9	8.78	
				0:15	8.37	7.29	8.55	10.9	8.7775	
50%	127	130	11	0:16	8	6.9	8.23	10.58	8.4275	
				0:17	8	6.9	8.23	10.58	8.4275	
				0:18	8	6.89	8.23	10.58	8.425	
				0:19	7.99	6.89	8.22	10.57	8.4175	
				0:20	7.99	6.89	8.21	10.57	8.415	
25%	64	70	5.5	0:21	7.47	6.36	7.73	10.11	7.9175	
				1:22	7.47	6.36	7.73	10.11	7.9175	
				0:23	7.47	6.35	7.72	10.11	7.9125	
				0:24	7.46	6.35	7.72	10.11	7.91	
				0:25	7.46	6.35	7.71	10.11	7.9075	
0%	0	0	0	0:26	5.48	4.5	5.63	7.1	5.6775	
				0:27	5.44	4.46	5.59	7.05	5.635	
				0:28	5.42	4.45	5.56	7.01	5.61	
				0:29	5.4	4.44	5.54	7.01	5.5975	
				0:30	5.38	4.42	5.52	7	5.58	

**Annexe 5:** Disposition et résultats des sondages de pénétration statique CPT avant et après traitement



- Sondage CPT au centre semelle carrée,
- ▲ Sondage CPT en périphérie.

