

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
جامعة البليدة  
UNIVERSITÉ -SAAD DAHLAB- BLIDA



كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie  
قسم الهندسة المدنية  
Département de Génie Civil  
MÉMOIRE DE MASTER EN GÉNIE CIVIL  
Spécialité : Géotechnique

**Thème**

**ÉTUDE DE SOUTÈNEMENT DE LA STATION DE METRO  
"SMAIL YEFSAH"  
BAB EZZOUAR, ALGER**

Réalisé par :

SAHER FERIEL

TALEB OUAFIA

Encadré par :

N. OUHDADOU

PROMOTION : 2023/ 2024

## ملخص

في إطار تحضير أطروحة الماستار تخصص جيوتقني، اهتمنا بدراسة و تصميم الدعم المؤقت لمحطة مترو إسماعيل يفصح الواقعة على امتداد الخط 1 من مترو الجزائر بين الحراش ومطار هواري بومدين الدولي. للقيام بذلك، قمنا أولاً بتطوير ملف جيوتقني بناء على نتائج المسح الجيوتقني. بعد ذلك اقترحنا حلين، وهما جدار الأوتاد والجدار المصبوب، باستخدام الدعائم الأفقية كنظام دعم. للقيام بهذه الحسابات، استخدمنا برنامج بلاكسيس الذي يعبر عن النتائج على شكل إزاحات الجدار واستقرار الانزلاق.

بناء على النتائج المتحصل عليها، اخترنا الحل الأفضل وهو جدار الأوتاد.

**الكلمات المفتاح :** جدار الأوتاد، الجدار المصبوب، التصميم . Plaxis2D , جداران الحجاب الحاجز

## RÉSUMÉ

Dans le cadre de la préparation de notre mémoire de master en géotechnique, nous nous sommes intéressés à l'étude de soutènement provisoire de la station de métro Smail Yefsah située sur l'extension de la ligne 1 du métro d'Alger entre El Harrach et l'Aéroport international Houari Boumediene. Pour ce faire, nous avons d'abord élaboré le profil géotechnique à partir de l'exploitation des résultats de la reconnaissance géotechnique. Par la suite, nous avons proposé deux solutions à savoir, paroi en pieux et paroi moulée en utilisant comme système d'appui : des butons. Pour achever ces calculs, nous avons utilisé le logiciel Plaxis2D. Les résultats sont indiqués en termes de déplacements de la paroi ainsi que la stabilité au glissement. D'après les résultats obtenus, nous avons recommandé la solution paroi en pieux qui présente une sécurité acceptable et un coût plus économique.

**Mots clé :** PLAXIS 2D, paroi en pieux, paroi moulée, modélisation, écran de soutènement.

## **ABSTRACT**

As part of the preparation of our master's thesis in geotechnics, we were interested in the study of the provisional support of the Smail Yefsah metro station located on the extension of Algiers metro line 1 between El Harrach and Houari Boumediene International Airport. To do this, first, we developed the geotechnical profile based on the results of the geotechnical survey. Subsequently, we proposed two solutions, a pile wall and a diaphragm wall, using struts as the support system. To complete the calculations, we used the Plaxis 2D software. The results are indicated in terms of wall displacements and sliding stability. Based on the results obtained, we recommended the pile wall solution, which presents acceptable safety and lower costs.

**Keywords :** Plaxis 2D, Pile wall, Diaphragm wall, Modeling. Retaning screens.

## REMERCIEMENTS

*Louange à Allah le Miséricordieux, de nous avoir ouvert les yeux et orienté vers le savoir, infime qu'il soit par rapport à l'immensité de sa science, et de nous avoir armé de courage et de persévérance pour mener à terme ce travail.*

*Nous tenons à adresser tous nos remerciements aux personnes qui nous ont aidé à la réalisation de notre travail.*

*Tous nos remerciements les plus sincères et profonds à notre promotrice Mme. **ADJLANE** née **OUHDADOU** qui a suivi et veillé sur le bon déroulement de ce travail avec ses conseils et ses remarques constitutives, et surtout pour sa compréhension et le soutien moral qu'elle nous a apporté. Ses remarques et ses conseils avertis nous ont permis de réaliser notre travail.*

*Ainsi nous remercions Mr. **CHERCHALI** pour sa disponibilité et ses conseils.*

*Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leur générosité et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.*

*Nos remerciements vont aussi aux membres de jury d'avoir accepté d'évaluer notre modeste travail.*

*Enfin, nos sincères reconnaissances et gratitude à toute personne qui a contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail sans oublier nos camarades en génie civil.*

## **DÉDICACES**

*C'est avec un grand plaisir que je dédie ce travail fruit de mes études :*

*A Ma chère mère **FATIHA***

*Pour toute l'affection qu'elle m'a donnée, la source de la tendresse,*

*A mon cher père **ABDELKADER***

*Qui me guide dans ma vie et que j'imite son honnêteté. Son sérieux et sa responsabilité de ces engagements*

*A mes frères : **ABDELMALEK, RIADH, NACER.***

*A ma sœur : **SALSABILE.***

*Que dieu vous garde en bonne santé*

*Sans oublier mon binôme, mon amie et ma collègue **Ouafia**, merci pour votre présence, pour ces moments passés, et pour les deux années de master 1 et 2 qui sont pleines d'aventures, ce fut un honneur de réaliser ce projet en votre compagnie.*

*A toute la famille **SAHER et EL AICHI.***

*A Toute la promo de master 2 géotechnique 2023/2024*

*« A toute personne qui m'aime »*

**FERIEL.**

## **DÉDICACES**

*C'est avec un grand plaisir, que je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents **Ben Aissa** et **Houria** pour leur patience, leur encouragement et leur soutien.*

*Mon cher frère **Mohamed** et mes chers sœurs **Souhila**, **Khadidja**, **Fella**, **Meriem** et **Nihad**. Mes chers amies **Houria** et **Rayan** pour leur encouragement, leur patience et qu'ils sont toujours avec moi et je leurs remercie pour tous les moments passés avec eux.*

*Sans oublier mon binôme, mon amie et ma collègue **Feriel**, merci pour votre présence, pour ces moments passés, et pour les deux années de master 1 et 2 qui sont pleines d'aventures, ce fut un honneur de réaliser ce projet en votre compagnie.*

*La personne qui est dans mon cœur, je l'oublierai jamais jusqu'au jour de notre rencontre.*

*Toute personne qui occupe une place dans mon cœur.*

*Tous les membres de ma famille, Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.*

**OUAFIA.**

# TABLE DES MATIÈRES

ملخص

RÉSUMÉ

ABSTRACT

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

INTRODUCTION GÉNÉRALE ..... 27

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE ..... 18

I.1. Introduction ..... 19

I.2. L'excavation ..... 19

I.2.1. Méthode d'excavation ..... 20

I.2.2. Facteurs influants sur le choix d'une méthode d'excavation ..... 25

I.2.3. Excavation dans les différents types de sols ..... 25

I.3. Les écrans de soutènement ..... 26

I.3.1. Les pieux sécants ..... 26

I.3.2. La paroi moulée ..... 28

I.4. Les systèmes d'appui ..... 31

I.4.1. Les butons ..... 31

I.4.2. Les tirants d'ancrage ..... 33

I.5. Mode de rupture des ouvrages de soutènement ..... 33

I.6. Méthodes de calcul des écrans de soutènement ..... 35

I.6.1. Méthodes classiques ..... 35

I.6.2. Méthode au coefficient de réaction ..... 41

I.6.3. Méthodes empiriques et semi empiriques ..... 42

I.6.4. Méthode des éléments finis ..... 42

I.7. Conclusion ..... 44

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DU SITE DU PROJET ..... 45

II.1. Introduction ..... 46

II.2. Présentation de l'extension El Harrach – Aéroport ..... 46

II.3. Situation géographique du site ..... 47

II.4. Contexte géomorphologique ..... 48

II.5. Contexte géologique ..... 49

II.5.1. Géologie régionale ..... 49

II.5.2. Géologie du site ..... 50

II.6. Contexte hydrogéologique.....	51
II.7. Contexte climatique.....	52
II.8. Conditions sismiques.....	53
II.9. Conclusion.....	55
CHAPITRE III : SYNTHÈSE GÉOTECHNIQUE.....	57
III.1. Introduction.....	58
III.2. Programme de la reconnaissance géotechnique.....	58
III.2.1. Essais in-situ.....	59
III.2.2. Essais de laboratoire.....	73
III.3. Etude d'homogénéité.....	77
III.4. Modèle de sol.....	83
III.5. Conclusion.....	83
CHAPITRE IV : MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU SOUTÈNEMENT DE LA STATION.....	84
IV.1. Introduction.....	85
IV.2. Description du code Plaxis 8.6.....	85
IV.3. Le modèle de comportement intégré dans Plaxis (MCM).....	87
IV.4. Caractéristiques géométriques et géotechniques.....	88
IV.4.1. Coupe géotechnique du modèle.....	88
IV.4.2. Caractéristiques physiques, mécaniques et élastiques des sols.....	88
IV.4.3. Caractéristiques des pieux.....	89
IV.4.4. Caractéristiques des parois moulées.....	89
IV.4.5. Caractéristiques des butons.....	90
IV.5. Modélisation du soutènement de la station par le logiciel Plaxis2D.....	90
IV.5.1. Paroi en pieux sécants avec butons.....	90
IV.5.2. Paroi moulée avec butons.....	117
IV.6. Estimation du coût des solutions.....	137
IV.6.1 Coût des pieux sécants.....	137
IV.6.2 Coût des parois moulées.....	137
IV.6.3 Coût des poutres de couronnements.....	137
IV.6.4 Coût des butons.....	138
IV.7. Conclusion.....	138
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	139
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	143
ANNEXES.....	145

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1:</b> Excavation à ciel ouvert en pente.....	21
<b>Figure I.2:</b> Excavation à ciel ouvert en porte-à-faux.....	21
<b>Figure I.3:</b> Méthode d'excavation "Top Down".....	22
<b>Figure I.4:</b> Méthode d'excavation de contreventement.....	23
<b>Figure I.5:</b> Déformation de la longue portée par rapport aux plus petites.....	24
<b>Figure I.6:</b> Déformation de la longue portée par rapport aux plus petites.....	25
<b>Figure I.7:</b> Mur de pieux sécants classique (gauche) et en touches de piano (droite).....	26
<b>Figure I.8:</b> Vue en plan du processus d'exécution d'une paroi en pieux sécants.....	27
<b>Figure I.9:</b> Schéma des étapes de réalisation d'une paroi moulée.....	30
<b>Figure I.10:</b> Pieux avec butons.....	32
<b>Figure I.11:</b> Paroi avec tirants d'ancrages.....	33
<b>Figure I.12:</b> Les différentes formes d'instabilité.....	34
<b>Figure I.13:</b> Équilibre du coin de Coulomb.....	36
<b>Figure I.14:</b> Le coin de Rankine.....	37
<b>Figure I.15:</b> Déplacements nécessaires à la mobilisation des états limites (poussée et butée).....	38
<b>Figure I.16:</b> État limite de poussée du sol (sans talus $\beta=0$ , sans frottement sol écran $\delta = 0$ ).....	39
<b>Figure I.17:</b> Equilibre de Boussinesq et de Rankine.....	40
<b>Figure I.18:</b> Exemple de maillage dans Plaxis.....	43
<b>Figure II.1:</b> Tracé de la ligne 1 lot 1 extension B.....	47
<b>Figure II.2:</b> Plan de situation de la station Smail Yefsah.....	48
<b>Figure II.3:</b> Extrait de la carte N°21 Alger bis au 1/50.000 <sup>ème</sup> .....	50
<b>Figure II.4:</b> Coupe géologique.....	51
<b>Figure II.5:</b> Graphique climatique de la wilaya d'Alger.....	53
<b>Figure II.6:</b> Carte du Zonage Sismique du Territoire National.....	54
<b>Figure III.1:</b> Plan d'implantation des essais in-situ.....	59
<b>Figure III.2:</b> Piézomètres à corde vibrante_SC69. Pression.....	72
<b>Figure III.3:</b> Lectures des piézomètres à corde vibrante_SC69.....	72
<b>Figure IV.1:</b> Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input).....	86
<b>Figure IV.2:</b> Fenêtre principale du programme de calcul.....	86
<b>Figure IV.3:</b> Barre d'outils de la fenêtre principale du programme (Output).....	87
<b>Figure IV.4:</b> Barre d'outils de la fenêtre principale du programme (Curves).....	87
<b>Figure IV.5:</b> Géométrie du modèle de la paroi en pieux sécants avec butons.....	91
<b>Figure IV.6:</b> Nombres d'éléments et de nœuds.....	91
<b>Figure IV.7:</b> Maillage de la paroi en pieux avec butons sous Plaxis.....	92
<b>Figure IV.8:</b> Conditions hydrauliques initiales.....	93
<b>Figure IV.9:</b> Pressions interstitielles.....	93
<b>Figure IV.10:</b> Valeurs de $K_0$ .....	94
<b>Figure IV.11:</b> Contraintes effectives.....	94
<b>Figure IV.12:</b> Modélisation de la 1 <sup>ère</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.....	96
<b>Figure IV.13:</b> Modélisation de la 1 <sup>ère</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.....	97
<b>Figure IV.14:</b> Déplacements horizontaux (phase 01).....	97
<b>Figure IV.15:</b> Déplacements verticaux (phase 01).....	98
<b>Figure IV.16:</b> Déplacement total (phase 01).....	98
<b>Figure IV.17:</b> Modélisation de la 2 <sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.....	99

<b>Figure IV.18:</b> Résultats de déformations de la 2 <sup>ème</sup> phase. ....	100
<b>Figure IV.19:</b> Déplacements horizontaux (phase 02).....	100
<b>Figure IV.20:</b> Déplacements verticaux (phase 02).....	101
<b>Figure IV.21:</b> Déplacement total (phase 02). ....	101
<b>Figure IV.22:</b> Modélisation de la 3 <sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis. ....	102
<b>Figure IV.23:</b> Résultats de déformations de la 3 <sup>ème</sup> phase. ....	103
<b>Figure IV.24:</b> Déplacements horizontaux (phase 03).....	103
<b>Figure IV.25:</b> Déplacements verticaux (phase 03).....	104
<b>Figure IV.26:</b> Déplacement total (phase 03). ....	104
<b>Figure IV.27:</b> Modélisation de la 4 <sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis. ....	105
<b>Figure IV.28:</b> Résultats de déformations de la 4 <sup>ème</sup> phase. ....	106
<b>Figure IV.29:</b> Déplacements horizontaux (phase 04).....	106
<b>Figure IV.30:</b> Déplacements verticaux (phase 04).....	107
<b>Figure IV.31:</b> Déplacement total (phase 04). ....	107
<b>Figure IV.32:</b> Modélisation de la 5 <sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis. ....	108
<b>Figure IV.33:</b> Résultats de déformations de la 5 <sup>ème</sup> phase. ....	109
<b>Figure IV.34 :</b> Déplacements horizontaux (phase 05).....	109
<b>Figure IV.35 :</b> Déplacements verticaux (phase 05).....	110
<b>Figure IV.36 :</b> Déplacement total (phase 05). ....	110
<b>Figure IV.37 :</b> Modélisation de la 6 <sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis. ....	111
<b>Figure IV.38 :</b> Résultats de déformations de la 6 <sup>ème</sup> phase. ....	112
<b>Figure IV.39 :</b> Déplacements horizontaux (phase 06).....	112
<b>Figure IV.40 :</b> Déplacements verticaux (phase 06).....	113
<b>Figure IV.41 :</b> Déplacement total (phase 06). ....	113
<b>Figure IV.42 :</b> Coefficient de sécurité de la 1 <sup>ère</sup> excavation (Pieux sécants avec butons). ....	114
<b>Figure IV.43 :</b> Coefficient de sécurité de 2 <sup>ème</sup> excavation (Pieux sécants avec butons). ....	114
<b>Figure IV.44 :</b> Coefficient de sécurité de 3 <sup>ème</sup> excavation (Pieux sécants avec butons) ....	115
<b>Figure IV.45 :</b> Coefficient de sécurité de 4 <sup>ème</sup> excavation (Pieux sécants avec butons) ....	115
<b>Figure IV.46 :</b> Coefficient de sécurité de 5 <sup>ème</sup> excavation (Pieux sécants avec butons) ....	116
<b>Figure IV.47 :</b> Coefficient de sécurité de 6 <sup>ème</sup> excavation (Pieux sécants avec butons) ....	116
<b>Figure IV.48 :</b> Géométrie du modèle de la paroi moulée avec butons.....	117
<b>Figure IV.49 :</b> Modélisation de la 1 <sup>ère</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.....	118
<b>Figure IV.50 :</b> Résultats de déformations de la 1 <sup>ère</sup> phase.....	119
<b>Figure IV.51 :</b> Déplacements horizontaux (phase 01).....	119
<b>Figure IV.52 :</b> Déplacements verticaux (phase 01).....	120
<b>Figure IV.53 :</b> Modélisation de la 2 <sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis. ....	120
<b>Figure IV.54 :</b> Résultats de déformations de la 2 <sup>ème</sup> phase.....	121
<b>Figure IV.55 :</b> Déplacements horizontaux (phase 02).....	122
<b>Figure IV.56 :</b> Déplacements verticaux (phase 02).....	122
<b>Figure IV.57 :</b> Modélisation de la 3 <sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis. ....	123
<b>Figure IV.58 :</b> Résultats de déformations de la 3 <sup>ème</sup> phase. ....	124
<b>Figure IV.59 :</b> Déplacements horizontaux (phase 03).....	124
<b>Figure IV.60 :</b> Déplacements verticaux (phase 03).....	125
<b>Figure IV.61 :</b> Modélisation de la 4 <sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis. ....	126
<b>Figure IV.62 :</b> Résultats de déformations de la 4 <sup>ème</sup> phase. ....	127
<b>Figure IV.63 :</b> Déplacements horizontaux (phase 04).....	127
<b>Figure IV.64 :</b> Déplacements verticaux (phase 04).....	128

<b>Figure IV.65</b> : Modélisation de la 5 <sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis. ....	129
<b>Figure IV.66</b> : Résultats de déformations de la 5 <sup>ème</sup> phase. ....	130
<b>Figure IV.67</b> : Déplacements horizontaux (phase 05).....	130
<b>Figure IV.68</b> : Déplacements verticaux (phase 05).....	131
<b>Figure IV.69</b> : Modélisation de la 6 <sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis. ....	131
<b>Figure IV.70</b> : Résultats de déformations de la 6 <sup>ème</sup> phase. ....	132
<b>Figure IV.71</b> : Déplacements horizontaux (phase 06).....	133
<b>Figure IV.72</b> : Déplacements verticaux (phase 06).....	133
<b>Figure IV.73</b> : Coefficient de sécurité de la 1 <sup>ère</sup> excavation (Paroi moulée avec butons).....	134
<b>Figure IV.74</b> : Coefficient de sécurité de la 2 <sup>ème</sup> excavation (Paroi moulée avec butons).....	134
<b>Figure IV.75</b> : Coefficient de sécurité de la 3 <sup>ème</sup> excavation (Paroi moulée avec butons).....	135
<b>Figure IV.76</b> : Coefficient de sécurité de la 4 <sup>ème</sup> excavation (Paroi moulée avec butons).....	135
<b>Figure IV.77</b> : Coefficient de sécurité de la 5 <sup>ère</sup> excavation (Paroi moulée avec butons).....	136
<b>Figure IV.78</b> : Coefficient de sécurité de la 6 <sup>ère</sup> excavation (Paroi moulée avec butons).....	136

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau II-1</b> : Coefficient d'accélération selon la classe d'ouvrage et la zone de sismicité .....	55
<b>Tableau III-1</b> : Sondages carottés réalisés au niveau la station. ....	59
<b>Tableau III-2</b> : Résultats des essais au Standard Pénétration Test (SPT) du sondage S33-1. ....	64
<b>Tableau III-3</b> : Résultats des essais au Standard Pénétration Test (SPT) du sondage S34.....	64
<b>Tableau III-4</b> : Résultats des essais au Standard Pénétration Test (SPT) du sondage SC66.....	65
<b>Tableau III-5</b> : Résultats des essais au Standard Pénétration Test (SPT) du sondage SC68.....	66
<b>Tableau III-6</b> : Résultats des essais au Standard Pénétration Test (SPT) du sondage SC69.....	67
<b>Tableau III-7</b> : Résultats des essais pressiométriques_SC46.....	68
<b>Tableau III-8</b> : Résultats des essais pressiométriques_SC47.....	69
<b>Tableau III-9</b> : Lectures piézométriques à tube ouvert_SC68.....	70
<b>Tableau III-10</b> : Des lectures piézométriques à corde vibrante_SC69. ....	71
<b>Tableau III-11</b> : Résultats des poids volumiques , teneurs en eau et degrés de saturation. <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
<b>Tableau III-12</b> : Résultats de l'analyse granulométrique..... <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
<b>Tableau III-13</b> : Résultats des limites d'Atterberg. ....	74
<b>Tableau III-14</b> : Résultats de l'essai de cisaillement à la boîte. ....	76
<b>Tableau III-15</b> : Résultats des analyses chimiques.....	77
<b>Tableau III-16</b> : Paramètres physiques et mécaniques du sol.....	83
<b>Tableau IV-1</b> : Caractéristiques physiques, mécaniques et élastiques des sols. ....	88
<b>Tableau IV-2</b> : Propriétés des pieux.....	89
<b>Tableau IV-3</b> : Propriétés de paroi moulée. ....	90
<b>Tableau IV-4</b> : Propriétés des butons. ....	90

# LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATION

## *CHAPITRE I*

**$K_o$**  : Coefficient de pression des terres au repos.

**$K_a$**  : Coefficient de poussée.

**$K_p$**  : Coefficient de butée.

**$\sigma_a$**  : Contrainte de poussée [ $\text{kN/m}^2$ ].

**$\sigma_p$**  : Contrainte de butée [ $\text{kN/m}^2$ ].

**$\beta$**  : Angle de l'inclinaison d'un talus par rapport à l'horizontale [ $^\circ$ ].

**$F_a$**  : Force de poussée [kN].

**$H$**  : Hauteur de mur [m].

**$\delta$**  : Angle de l'inclinaison d'un talus par rapport à la vertical [ $^\circ$ ].

**$\varphi$**  : Angle de frottement [ $^\circ$ ].

**$P(z)$**  : Pression horizontale du sol [ $\text{kN/m}^2$ ].

**$u(z)$**  : Déplacement [m].

**$\alpha$**  : Coefficient de structure.

**$K_h$**  : Coefficient de réaction [ $\text{kN/m}^3$ ].

**$E_M^e$**  : Module pressiométrique équivalent [MPa].

## *CHAPITRE II*

**$A$**  : l'accélération sismique.

## *CHAPITRE III*

**SC** : Sondage carotté.

**SP** : Sondage Pressiométrique.

**PMT** : Essai Pressiométrique.

**SPT** : Essai Pénétration.

**E** : Module de déformation [MPa].

**PL** : Pression limite de l'essai pressiométrique [kN/m<sup>2</sup>].

**γ<sub>h</sub>**: Densité humide [kN/m<sup>3</sup>].

**γ<sub>d</sub>** : Densité sèche [kN/m<sup>3</sup>].

**γ<sub>sat</sub>** : Densité saturé [kN/m<sup>3</sup>].

**ω**: Teneur en eau [%].

**S<sub>r</sub>** : Degré de saturation [%].

**W<sub>L</sub>**: Limite de liquidité [%].

**W<sub>P</sub>** : Limite de plasticité [%].

**IP** : Indice de plasticité [%].

**I<sub>c</sub>** : Indice de consistance [%]

**C<sub>u</sub>** : Cohésion non drainée [bars].

**φ<sub>u</sub>** : L'angle de frottement non drainé [°].

**φ'** : L'angle de frottement effectif [°].

**C'** : Cohésion effective [bars].

**λ** : L'écart type.

**COV**: Coefficient de variation.

## ***CHAPITRE IV***

**v** : Coefficient de Poisson.

**Ψ** : Angle de dilatance.

**E<sub>ref</sub>**: Module de Young de référence [kN/m<sup>2</sup>].

**G<sub>ref</sub>**: Module de cisaillement de référence [kN/m<sup>2</sup>].

**E<sub>oed</sub>** : Module oedométrique [kN/m<sup>2</sup>].

**C'<sub>ref</sub>** : Cohésion de référence [kN/m<sup>2</sup>].

**φ** : Angle de frottement. **W** : Poids [kN].

**d<sub>eq</sub>** : Épaisseurs équivalente [m].

**EA**: Rigidité normale [kN/m].

**EI**: Rigidité en flexion [kNm<sup>2</sup>/m].

**E<sub>b</sub>** : Module de Young de béton [MPa].

**q** : Charge répartie [kPa].

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

La Wilaya d'Alger, capitale administrative et centre économique du pays, s'est développée à un rythme très élevé au cours des deux dernières décennies, l'unité urbaine d'Alger supporte actuellement plus de trois millions d'habitants. Cette croissance démographique si considérable a causé d'énormes difficultés de circulation et de transport. Le recours au développement des moyens de déplacement en commun s'impose comme solution primordiale pour la prise en charge de la demande de déplacement actuelle et future. Cette option a encouragé les autorités pour la réalisation des projets de transport capacitaire en site propre à l'image du tramway et métro d'Alger. La configuration du réseau final de ces deux modes prévoit plusieurs extensions pour la couverture spatiale d'une bonne partie du territoire de la capitale.

Dans ce sens, notre projet de fin d'étude concerne l'étude de soutènement nécessaire pour la réalisation de la station du métro Smail Yefsah située à Bab Ezouar, faisant partie de l'extension El Harach -Aéroport international Houari Boumediene.

Le but de notre travail est de proposer des alternatives pour soutenir l'excavation d'une fouille de 30 m de profondeur, et de comparer les variantes étudiées (paroi en pieux sécants et paroi moulée) afin de sélectionner le soutènement provisoire le plus adéquat. Le choix de soutènement reposera essentiellement sur l'aspect technique (stabilité/sécurité) et le critère économique.

Pour la présentation de ce mémoire, nous nous sommes proposé d'organiser le mémoire en plusieurs chapitres :

Le premier chapitre représente la partie théorique et propose une synthèse de la recherche bibliographique traitant les différents aspects liés à notre projet, à savoir : les procédés de creusement, les types de soutènements et les différentes méthodes de calculs.

Le deuxième chapitre est dédié à la présentation du site du projet par sa localisation et les principales caractéristiques générales de son environnement.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de l'étude géotechnique. Ce travail est développé sur la base des résultats des essais géotechniques mis à notre disposition par le bureau d'étude.

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

---

Le quatrième chapitre est relatif à la partie modélisation par le logiciel Plaxis2D, il expose les résultats des calculs et vérifications effectuées sur les solutions étudiées (déformations, stabilités au glissement). Le choix de la solution est justifié par la comparaison des coûts de réalisation des solutions étudiées.

A la fin, une conclusion générale synthétisant l'essentiel des résultats du travail élaboré est insérée.

# **CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **I.1.Introduction**

Depuis une trentaine d'années, de nouvelles méthodes de construction ont été introduites sur les chantiers, elles permettent de réaliser des ouvrages en site urbain dans des terrains meubles et aquifères sans occasionner de dégâts importants en surface du sol, la simulation d'un ouvrages souterrain est liée étroitement à la méthode d'excavation et la réponse du massif, la connaissance de ses techniques de construction est importante pour arriver à des phasages de modélisation satisfaisante.

Dans ce sens et en relation au sujet de notre projet de fin d'étude qui consiste à étudier les soutènements nécessaires à la réalisation de la station de métro de Smail Yefsah de l'extension du métro d'Alger (El Harrach – Aéroport international), nous consacrons ce premier chapitre à la partie de recherche bibliographique dans laquelle on expose les différentes méthodes d'excavation à ciel ouvert ainsi que la variété des types de soutènements faisables suivies par la description des procédés, leurs mises en œuvre ainsi que leurs avantages et inconvénients. Ensuite on présente les différentes méthodes de dimensionnement et calcul d'un écran de soutènement.

## **I.2. L'excavation**

L'excavation est une partie de terrain creusée à une profondeur d'au moins 1.2 m, les travaux d'excavation sont généralement des travaux impliquant l'enlèvement de terre ou de roche d'un site pour former une face ouverte, un trou ou une cavité à l'aide d'outils, de machines ou d'explosifs. [1] Elle est un segment important de la technologie de base. Par exemple, dans la construction des bases ou des sous-sols de hauts bâtiments d'élévation, les réservoirs d'huile souterrains, les souterrains ou le passage rapide, etc.

Lorsque Terzaghi (1943) a envisagé pour la première fois la stabilité de l'excavation, il a défini celles dont la profondeur d'excavation était inférieure à leur largeur comme une excavation peu profonde tandis que celles dont la profondeur était supérieure à leur largeur étaient une excavation profonde. Des années plus tard, Terzaghi et Peck (1967) et d'autres, dont Peck et al (1977), ont mis à jour que l'excavation dont les profondeurs étaient inférieures de 6 m pouvait être définie comme étant des excavations peu profondes, et celles plus profondes que ça en tant que des excavations profondes. Une fois l'excavation dépasse 6 m (Excavation

profondes), l'utilisation de palplanches comme un soutènement des parois verticales d'excavation devient peu rentable (peu économique).

D'une manière générale, les méthodes d'analyse pour l'excavation peu profonde sont relativement simples. En fait, de plus en plus de projets d'excavation sont situés dans des zones urbaines peuplées.

Pour éviter d'endommager les propriétés adjacentes en raison de l'excavation, des murs de diaphragme sont couramment utilisés en tant que murs de soutènement. De plus, la programmation informatique a fait la plupart du travail d'analyse et de conception, qui s'applique à toutes les profondeurs, en suivant les mêmes théories. Par conséquent, il n'est plus significatif de distinguer entre l'excavation profonde et peu profonde. [2]

### **I.2.1. Méthode d'excavation**

Pratiquement, on dispose de plusieurs méthodes d'excavation, le choix d'une de ces dernières est arrêté en fonction de plusieurs facteurs tels que le budget de construction, la période de construction autorisée, l'existence d'excavations adjacentes, la disponibilité de l'équipement de construction, la zone du chantier de construction, les conditions des bâtiments adjacents, les types de fondation des bâtiments adjacents... etc.

#### **I.2.1.1. Méthode d'excavation à ciel ouvert**

L'exploitation à ciel ouvert est une méthode courante pour extraire des minéraux et des échantillons de la terre. Elle est généralement plus sûre que l'exploitation souterraine et permet l'utilisation de machines lourdes. La méthode à ciel ouvert se divise en deux grands types, à savoir la tranchée ouverte totale en pente inclinée, comme le montre la figure I.1, et la tranchée ouverte totale en porte-à-faux, comme le montre la figure I.2.

Le premier type est supposé être économique puisque le côté de l'excavation est en pente et n'a pas besoin d'être soutenu par un mur de fondation [1].



**Figure I.1:** Excavation à ciel ouvert en pente.

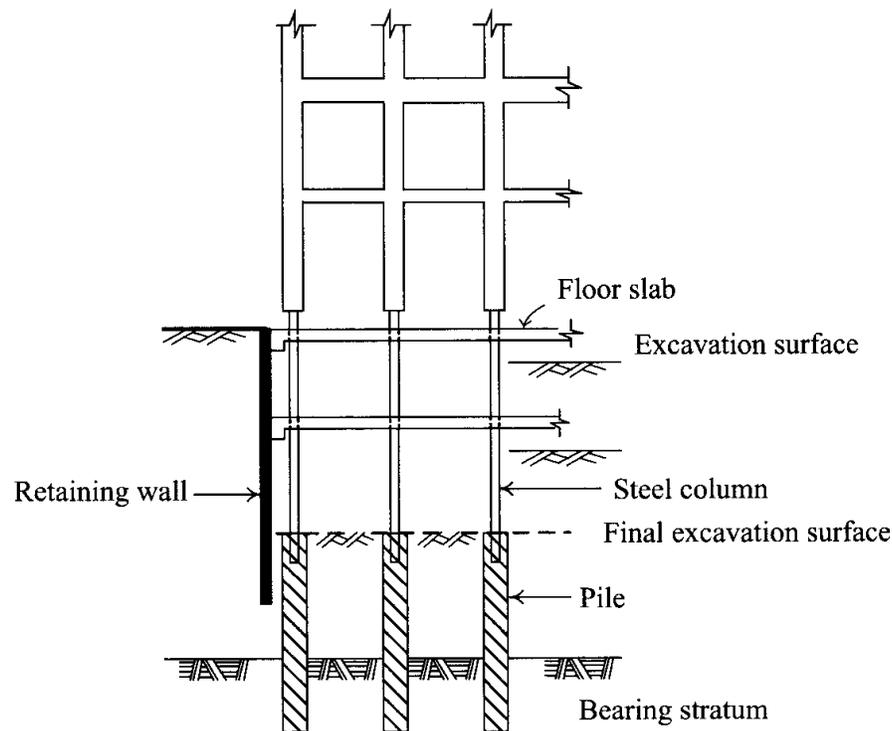


**Figure I.2:** Excavation à ciel ouvert en porte-à-faux.

#### **I.2.1.2. Méthode d'excavation TOP-DOWN**

Cette méthode consiste à entamer les travaux de la structure depuis la surface, ensuite passer en sous œuvre (Dalles et parois) jusqu'au radier pour enfin exécuter les travaux finaux (quais, escaliers et réservations) sans tenir compte du passage du tunnelier.

Cette technique nécessite peu de temps de construction. Un autre avantage est que la zone de construction est plus sûre puisque les dalles sont plus résistantes que les jambes de force. [1] Le choix de la méthode TOP-DOWN intervient après avoir constaté que le passage du Tunnelier dans les stations, provoquerait des prolongements de délais de réalisation de celles-ci.



**Figure I.3:** Méthode d'excavation "Top Down".

Avec la méthode ordinaire, initialement prévu (à ciel ouvert), la réalisation de la structure ne pourrait être entamée qu'une fois les terrassements sont achevés mais surtout, qu'après le passage du tunnelier.

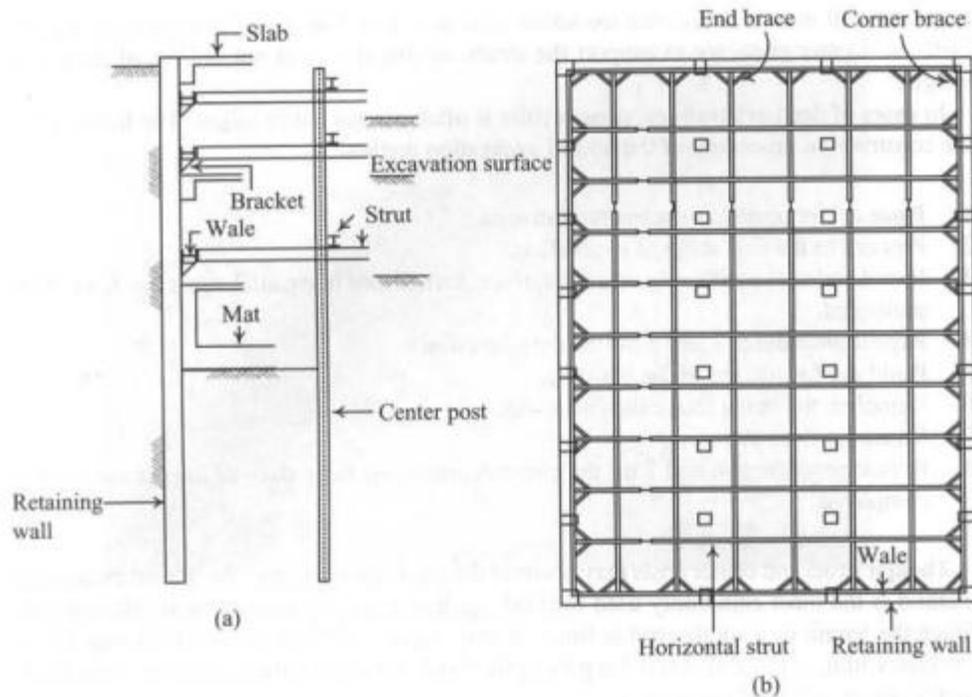
L'interruption des travaux après terrassement, et le temps que le tunnelier passe dans chaque station pour enfin démarrer le génie civil de celles-ci pourrait être considérable, en dépit des délais contractuels mais surtout de la stabilité des soutènements mis en place, à savoir les tirants d'ancrages qui peuvent relâcher, puisque leur efficacité est limitée dans le temps, à deux ans seulement.

### I.2.1.3. Méthode d'excavation contreventée

La méthode de contreventement se base sur l'installation des entretoises horizontales devant les murs de soutènement comme le montre la figure I.4, pour résister à la pression des poussées

des terres derrière les murs. Le système de contreventement comprend un mur, une jambe de force, des poteaux centraux, des bretelles d'extrémité et des renforts d'angle.

Les entretoises des angles et des extrémités ont pour but de réduire l'étendue des côtes sans augmenter le nombre de barres, donc on peut dépasser certaines distances autorisées entre les entretoises horizontales.



**Figure I.4:** Méthode d'excavation de contreventement.

Les étapes de construction par la méthode d'excavation de contreventement sont [1] :

- 1) Placer les poteaux centraux dans le secteur de construction ;
- 2) Procéder à la première étape de l'excavation ;
- 3) Installer Wales au-dessus de la surface d'excavation, puis installer les contrefiches horizontales et les avoir pré chargée ;
- 4) Répéter les procédures 2 et 3 jusqu'à la profondeur conçue ;
- 5) Établir la base du bâtiment ;
- 6) Démolir les contrefiches au-dessus de la base ;
- 7) Construire la galette de plancher ;

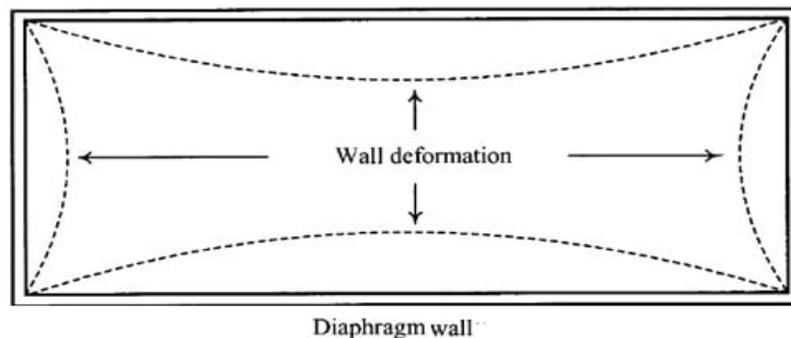
8) Répéter les procédures 6 et 7 jusqu'à ce que la construction des galettes de plancher du rez-de-chaussée soit accomplie.

La méthode d'excavation contreventée est la méthode la plus couramment utilisée, applicable à toute profondeur ou largeur d'excavation.

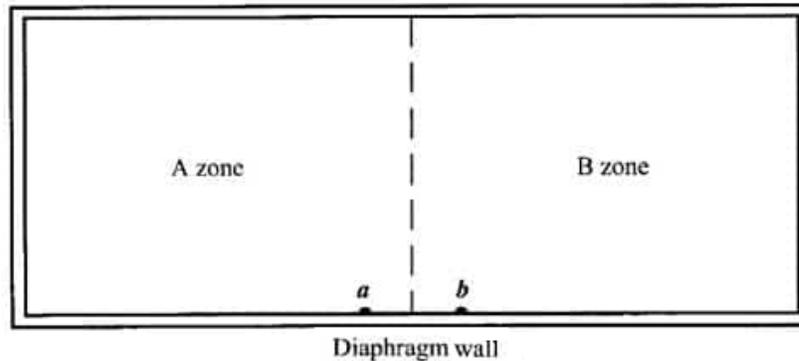
#### I.2.1.4.Méthode d'excavation zoné

Les parois moulées sont utilisées comme mur de soutènement dans la méthode d'excavation zonée. La déformation du mur à plus longue portée serait supérieure à celle du mur à courte portée. Ainsi, les déflexions des murs de plus longue portée sont diminuées en divisant la zone d'excavation en petite zone pour diminuer la déformation et le tassement du mur.

L'excavation commencera dans la zone B tandis que la zone A sera laissée pour soutenir le mur de la zone B. puis des entretoises dans la zone B seront installées et l'excavation commencera dans la zone A. Ce processus se poursuivra par étapes jusqu'à la fin de l'excavation. On peut clairement observer que la charge sur la paroi moulée serait considérablement importante et donc que la déflexion serait grande si la zone n'avait pas été divisée en une zone plus petite [1].



**Figure I.5:** Déformation de la longue portée par rapport aux plus petites



**Figure I.6:** Déformation de la longue portée par rapport aux plus petites.

### **I.2.2. Facteurs influant sur le choix d'une méthode d'excavation**

Le choix d'une méthode d'excavation dépend de plusieurs facteurs :

- Budget de construction ;
- Période de construction autorisée ;
- Disponibilité de l'équipement de construction ;
- Existence d'excavations adjacentes ;
- État des bâtiments adjacents ;
- Types de fondation des bâtiments adjacents ;
- Zone de chantier de construction.

### **I.2.3. Excavation dans les différents types de sols**

#### **1.2.3.1. Excavation dans les sols argileux**

L'excavation dans l'argile pose des problèmes très complexes et doit être abordée avec une grande prudence. Les ruptures de pente peuvent survenir de quelques jours à quelques années après la fin des travaux d'excavation, lorsque le personnel de construction peut-être au travail sur le sol d'excavation ou lorsque les structures ont déjà été érigées. Dans les argiles sensibles, des glissements rétrogrades peuvent se développer à la suite de défaillances locales initiales, causant des dommages non seulement au chantier de construction, mais également aux sites ou aux structures voisins. La conception des excavations non supportées dans les argiles doit être faite par des ingénieurs géotechniciens spécialisés, qui doivent également inspecter les travaux de construction [3].

#### **1.2.3.2. Excavation dans les sols granulaires**

Dans les sols granulaires, on ne peut pas réaliser une excavation non soutenue sauf si la nappe phréatique est au-dessous de notre creusement, ou un drainage a été effectué avant l'excavation. Dans les sols granulaires secs, les pentes de l'excavation doivent être inclinées d'un angle inférieur à l'angle de frottement du sol. Des dispositions devraient être prises pour minimiser l'infiltration des eaux pluviales et détourner les eaux de surface des pentes excavées. Les excavations sous-marines dans des sols granulaires représentent un problème particulier à étudier par un ingénieur ayant de l'expérience dans ce type de travaux [3].

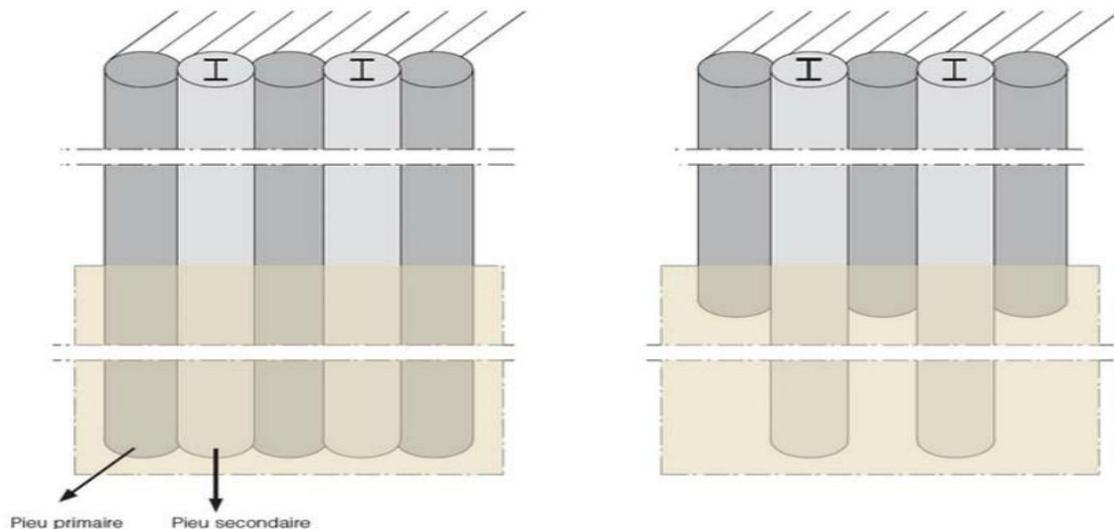
### I.3. Les écrans de soutènement

Les ouvrages de soutènement sont largement rencontrés en génie civil, avec des formes, dimensions et matériaux très variés. Dans la définition de l'Eurocode 7. Les ouvrages de soutènements sont destinés à retenir des terres (sols, roches ou remblais) et de l'eau.

Ils comprennent tous les types de mur et de systèmes d'appuis dans lesquels des éléments de structure subissent des forces imposées par le matériau. On cite ci-après les principales techniques utilisées :

#### I.3.1. Les pieux sécants

Le soutènement formé par des pieux primaires et secondaires intersectés est appelé paroi de pieux sécants (figure I-19). Les pieux primaires peuvent être exécutés moins profondément que les pieux secondaires (rideau de pieux en touches de piano) [4].

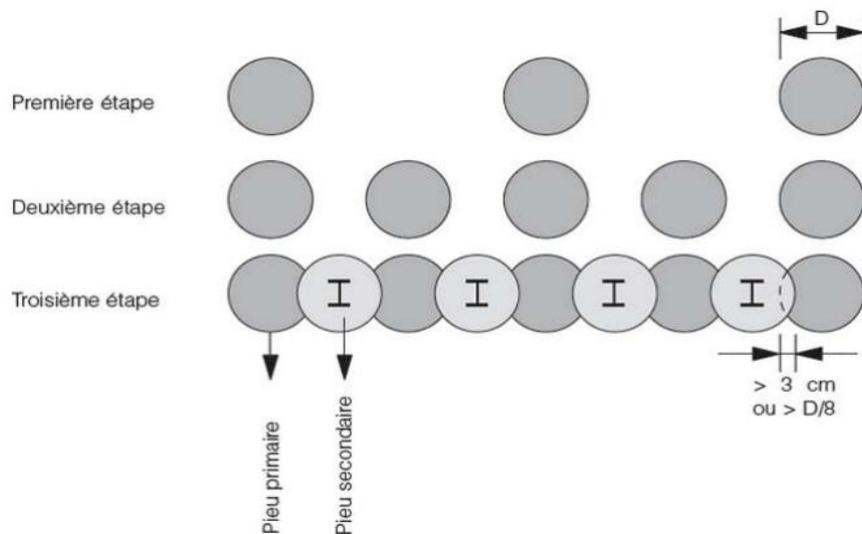


**Figure I.7:** Mur de pieux sécants classique (gauche) et en touches de piano (droite).

✚ Mise en œuvre de paroi en pieu sécant

L'exécution se déroule en plusieurs étapes :

- A. On commence toujours par installer une poutre de guidage pour indiquer les positions des pieux et assurer le guidage durant le forage.
- B. Première étape : une première série de pieux primaires non armés est réalisée suivant la séquence 1 – 5 – 9 – 13 – ... ;
- C. Deuxième étape : une deuxième série de pieux primaires non armés est réalisée suivant la séquence 3 – 7 – 11 – ... ;
- D. Troisième étape : les pieux secondaires en béton armé sont exécutés suivant la séquence 2 – 4 – 6 – 8 – 10 – 12 – ... Les pieux primaires sont partiellement fraisés (figure I-8). Si le rideau de pieux est installé à proximité de constructions susceptibles de tasser, les pieux secondaires sont exécutés en deux étapes suivant les séquences 2 – 6 – 10 – ... et 4 – 8 – 12 – ... ;
- E. La fouille est ensuite excavée jusqu'au niveau d'installation d'un éventuel support horizontal ;
- F. Si nécessaire, le support horizontal est mis en place (tirants d'ancrage, pieux de traction, étançons, ...). Les tirants d'ancrage ou les pieux de traction sont placés à hauteur de l'intersection entre un pieu primaire et secondaire ;
- G. La fouille est à nouveau excavée jusqu'au niveau d'installation d'un éventuel support horizontal supplémentaire ou jusqu'au niveau du fond de fouille final.



**Figure I.8:** Vue en plan du processus d'exécution d'une paroi en pieux sécants.

#### *a- Avantages des pieux sécants*

- Absence de vibrations et faibles nuisances sonores ;
- Peut être réalisé très près de bâtiments adjacents ;
- La capacité portante des murs est améliorée grâce à une surface de contact au sol supérieure, à volume égal de béton.

#### ***b- Inconvénients des pieux sécants***

- Les tolérances de verticalité peuvent être difficiles à atteindre pour les pieux profonds ;
- Une étanchéité totale est très difficile à obtenir dans les joints ;
- Coût accru par rapport aux murs de palplanches.

### **I.3.2. La paroi moulée**

Une paroi moulée est un mur en béton armé coulé dans le sol. Le principe est de creuser une tranchée, constamment tenue pleine de boue durant l'excavation, puis de couler du béton dedans, une fois l'ouvrage terminé, il sert de mur de soutènement, et les matériaux du terrain d'un côté du mur peuvent être excavés, pour réaliser par exemple une tranchée entre deux parois moulées, qui pourra éventuellement être couverte. Elle permet la création des espaces souterrains profondes dans un site urbain construit sur un sol où la nappe phréatique est près de la surface. Le procédé n'est en principe rentable qu'à partir de deux niveaux de sous-sol (des profondeurs de plus de 20 m sont pratiquement courantes).

La paroi moulée sert pour :

- de fondation : lorsqu'elle est descendue jusqu'aux couches porteuses profondes ;
- de soutènement : en maintenant les terres et les surcharges sur la périphérie ;
- de paroi étanche : en protégeant de l'eau extérieure le volume enclos.

Une paroi moulée peut être supportée par des tirants d'ancrages, des butons ou mixte (tirants et butons)

- ***Mise en œuvre des parois moulées***

La mise en œuvre des parois moulées implique plusieurs étapes, à savoir

- **Exécution des murettes guide** : elle est constituée de deux murets en béton armé de 30 cm de large environ et de 80 cm de hauteur espacés de l'épaisseur de la future paroi.

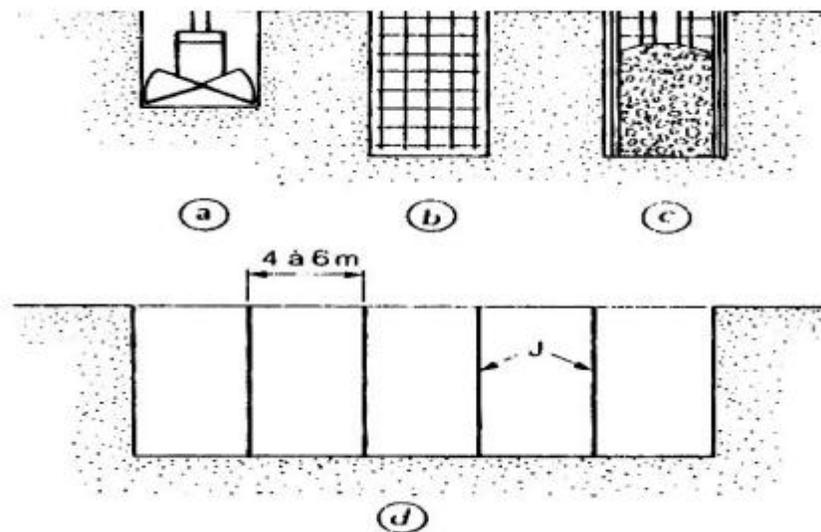
- **Excavation des panneaux :** De façon pratique, la longueur de chaque panneau peut varier d'un minimum de l'ordre de 2 m jusqu'à un maximum qui dépasse rarement 8 à 10 m. On peut opérer par panneaux primaires et secondaires selon le principe de l'excavation alternée

- **La mise en place des joints :** Le joint entre panneaux qui doit assurer la continuité de la paroi constitue un point délicat du procédé : il s'agit à cet endroit de garantir le bon alignement ainsi que le contact béton/béton des deux panneaux adjacents.

- **Utilisation de la boue de perforation :** La boue de perforation joue un rôle capital dans le procédé en maintenant la stabilité de la tranchée durant toute l'excavation, l'équipement et le bétonnage des panneaux. Au cours de la perforation, la boue se charge de sédiments et perd en partie ses propriétés.

- **Mise en place de la cage d'armature :** Le ferrailage d'une paroi est réalisé en éléments discontinus par armatures horizontales et verticales en acier HA ou lisse assemblées sous formes de cages, On assure un enrobage de béton minimum de 7cm en centrant la cage dans la tranchée à l'aide de centreurs de préférence non métalliques, par exemple des écarteurs en béton en forme de patin.

- **Bétonnage :** Le béton de paroi est mis en place au tube plongeur et sans être vibré. Il doit s'écouler facilement pour suivre les contours de l'excavation et enrober correctement les aciers, tout en évitant les ségrégations et les inclusions de boue. [5]



**Figure I.9:** Schéma des étapes de réalisation d'une paroi moulée.

La paroi ou tranchée est réalisée par forage à l'aide d'une benne preneuse dans les terrains meubles, ou d'un outil percutant (ou trépan) dans les terrains raides ou rocheux. La bentonite est une argile colloïdale du type montmorillonite, prédisposée à gonfler considérablement en présence de l'eau, mais d'une manière réversible. On lui attribue la propriété de thixotropie, c'est-à-dire qu'au repos elle prend la forme d'un gel très visqueux nécessitant une contrainte élevée pour le mettre en mouvement.

Une fois le mouvement amorcé, la viscosité diminue et la vitesse croît. Une fois laissée au repos après agitation, cette boue se transforme de nouveau en gel.

#### **Avantages**

- La méthode s'accommode à toutes les situations défavorables dues à l'hydrologie du sol et sa mauvaise qualité ;
- Aucune vibration n'est engendrée ;
- Pas de décompression des terrains, pas de limitation en profondeur ;
- Possibilité d'intégrer le soutènement dans la structure définitive ;
- Permet de réaliser la couverture avant les gros travaux.

#### **Inconvénients**

- Nécessite une plate-forme de travail horizontale.

- Matériel lourd.
- Cette technique est très coûteuse.
- L'élimination de la bentonite polluée pose problème.

#### **I.4. Les systèmes d'appui**

Le principe de fonctionnement d'un écran de soutènement est d'utiliser le sol en fiche comme un niveau d'appui. Lorsque la hauteur libre d'un écran de soutènement devient importante ou lorsque les efforts à reprendre par l'écran sont importants, on peut ajouter des appuis supplémentaires se présentant sous forme de tirants d'ancrage ou butons.

##### **I.4.1. Les butons**

Les butons sont constitués de poutres en béton armé, de profilés ou de tubes en métal ou en bois, disposés à l'horizontale ou incliné, prenant appuis sur deux structures construites en vis à vis.

Les butons ne peuvent exercer leur réaction qu'au près d'un déplacement de la paroi. Le butonnage est une technique de renforcement de la face extérieure de l'écran de soutènement. Après la mise en place des cornières scellées dans la paroi, on met en place les butons avec une grue de levage. Les butons sont ensuite scellés avec un mortier spécial.

On peut distinguer deux types de butonnage :

- le butonnage direct : le bouton prend appui directement sur la paroi ou par l'intermédiaire d'une plaque de raidissement ;
- le butonnage sur lierne : le bouton transmet les charges par l'intermédiaire d'un ou de deux lits de profilés. Cette technique permet de reprendre les efforts de poussée sur la paroi et de les transmettre aux butons. La paroi est ainsi rigidifiée. Les butons peuvent aussi être mis en œuvre sous une force de précontrainte.

La stabilité de ce type de soutènement est assurée par la fiche des éléments verticaux auxquels sont souvent associés des dispositifs d'appuis (tirants ou butons) qui sont mis en place au fur à mesure de l'avancement de creusement. [6]



**Figure I.10:** Pieux avec butons.

- ***Mise en œuvre des butons***

La mise en œuvre des butons implique plusieurs étapes. Tout d'abord, il est nécessaire de préparer la fouille en excavant le sol et en préparant les parois de la fouille pour l'installation des butons. Ensuite, les butons sont installés à l'intérieur de la fouille, soit horizontalement, soit inclinés, en utilisant des boulons d'ancrage pour les fixer aux parois de la fouille. Les butons sont ensuite sollicités à la compression en utilisant des vérins hydrauliques ou des crics mécaniques pour maintenir les parois de la fouille en place [7]. Enfin, les butons peuvent être combinés avec d'autres techniques d'étalement, tels que les tirants d'ancrage, pour assurer la stabilité de la fouille. La mise en place des butons doit être effectuée par des professionnels qualifiés pour garantir la sécurité et la qualité des travaux [8].

***a- Avantages des butons***

- Coût relativement faible.

***b- Inconvénients des butons***

- Ouvrage souvent lourds et encombrants et limités dans les possibilités de mise en œuvre dans les grandes fouilles ;
- Nécessité de présence de moyen de levage sur le chantier

### I.4.2. Les tirants d'ancrage

Un tirant d'ancrage est un dispositif d'ancrage capable de transmettre les forces de traction qui lui sont appliquées à une couche de sol résistante en prenant appui sur la structure à ancrer. Il est utilisé pour stabiliser un soutènement et de reprendre une partie de la poussée des terres. Les tirants d'ancrages sont très fréquents dans le cas des rideaux pour limiter la profondeur à encastrer et reprendre provisoirement les poussées des terres. Ils comportent en général une armature de tirants enfouie dans une gaine remplie de coulis, et un bulbe d'ancrage. Le tirant est scellé dans le rideau à l'aide d'une plaque. [9]



**Figure I.11:** Paroi avec tirants d'ancrages.

### I.5. Mode de rupture des ouvrages de soutènement

Le mode de rupture d'un ouvrage de soutènement dépend de plusieurs facteurs tels que la géométrie de l'ouvrage, la nature et les caractéristiques du sol en place, les charges appliquées, ainsi que les conditions environnementales. Cependant, il est possible de décrire les modes de rupture les plus courants pour les ouvrages de soutènement [10].

Les différentes formes d'instabilité qui peuvent être rencontrées dans les ouvrages de soutènement sont :

- Le glissement de l'ouvrage sur sa base « a »

- Le renversement de l'ouvrage « b »
- Le poinçonnement du sol de fondation « c »
- Le grand glissement englobant l'ouvrage « d »
- La rupture des éléments structuraux de l'ouvrage « e »

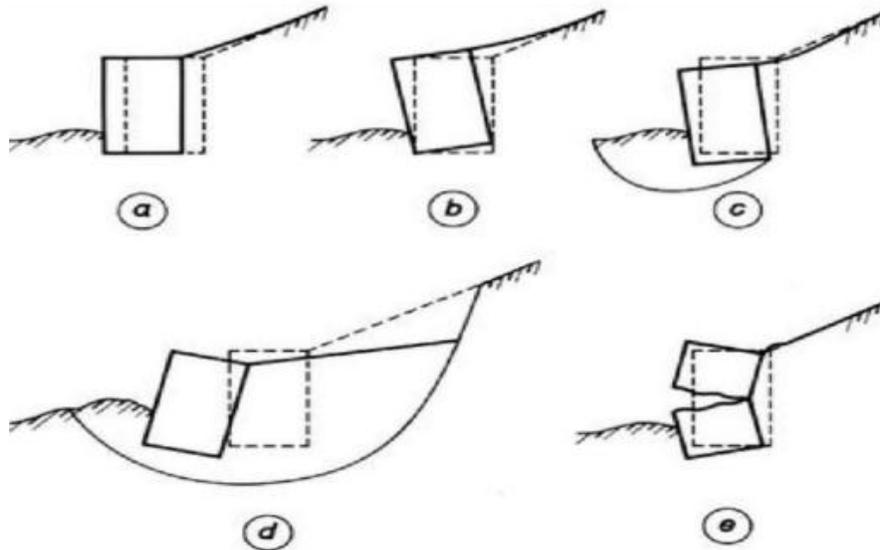


Figure I.12: Les différentes formes d'instabilité.

- ✚ **La rupture par glissement** : Ce mode de rupture se produit lorsque la résistance à la friction entre les différentes couches de sol en place est insuffisante pour empêcher le glissement de l'ouvrage de soutènement. Dans ce cas, le sol se déplace en masse le long d'une surface de rupture plane située à la base du soutènement.
- ✚ **La rupture par basculement** : Ce mode de rupture se produit lorsque l'ouvrage de soutènement tourne autour d'un point de pivotement situé à la base du soutènement. Cela peut se produire si la base de l'ouvrage de soutènement n'est pas suffisamment large ou si le sol sous le soutènement est insuffisamment résistant.
- ✚ **La rupture par renversement** : Ce mode de rupture se produit lorsque l'ouvrage de soutènement bascule complètement en arrière. Cela peut se produire si la base de l'ouvrage de soutènement est insuffisamment large ou si les charges appliquées sont trop importantes.

- ✚ **La rupture par écrasement** : Ce mode de rupture se produit lorsque l'ouvrage de soutènement est soumis à une charge trop importante et que le sol en dessous s'écrase, provoquant l'effondrement de l'ouvrage.
- ✚ **La rupture par déversement** : Ce mode de rupture se produit lorsque l'ouvrage de soutènement ne peut plus résister aux charges appliquées et que la partie supérieure de l'ouvrage se déverse vers l'avant, entraînant un effondrement partiel ou total de la structure.

## I.6. Méthodes de calcul des écrans de soutènement

Dans la littérature géotechnique, on recense autant de méthodes de calcul et de justification. Le choix de la méthode est libre et il dépend du modèle de calcul considéré, On distingue :

- Les méthodes classiques dites à la rupture ;
- La méthode au coefficient de réaction ;
- Les méthodes empiriques et semi-empiriques;
- La méthode des éléments finis, méthodes développées à partir des années 1970.

### I.6.1. Méthodes classiques

Il s'agit des méthodes de dimensionnement et de calcul des ouvrages géotechniques plus anciennes qui se basent sur des théories classiques de la poussée et de la butée. Il y a trois méthodes :

#### I.6.1.1. La méthode de Coulomb (1773)

La théorie de Coulomb comme presque toutes les autres méthodes théoriques de calcul des poussées, s'intéresse à un massif de sol homogène, isotrope et pulvérulent limité par un talus semi-infini plan. Par suite d'un léger déplacement de l'écran, une partie du massif, contenue dans un prisme appelé prisme de glissement, se met en mouvement. Ce prisme est en équilibre sous l'effet de son poids, de la réaction de l'écran et de celle du sol le long de la surface de glissement.

Pour permettre un calcul aisé, Coulomb a fait les hypothèses simplificatrices suivantes :

1° - La surface de glissement dans le sol est un plan.

2° - Le matériau contenu à l'intérieur du prisme de glissement se comporte comme un corps solide indéformable.

3°/ - Le prisme de glissement est en équilibre limite sur les faces en contact avec le massif et l'écran.

4°/ - Le massif considéré n'est pas le siège d'une nappe susceptible d'engendrer des pressions interstitielles. [11]

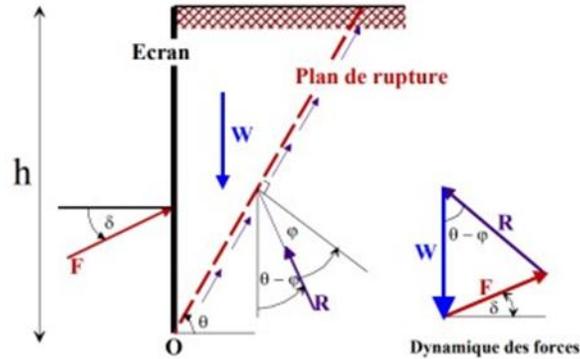


Figure I.13: Équilibre du coin de Coulomb.

- La force de poussée est donnée par la formule suivante :

$$F_a = 0,5 k_a \gamma . H^2 \tag{I.1}$$

- Où  $K_a$  coefficient de poussée, est donné par la formule de Poncelet suivante :

$$K_a = \frac{\sin^2(n-\varphi)}{\sin^2 n . \sin(n-\delta)} \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta) - \sin(\varphi-\beta)}{\sin(n+\delta) . \sin(n-\beta)}} \right]^2 \tag{I.2}$$

- Pour  $\beta = 0 \rightarrow \eta = \pi / 2$  et  $\delta = 0 \rightarrow$  (mur lisse), on obtient :

$$K_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \tag{I.3}$$

### I.6.1.2. La théorie de Rankine

Cette méthode de calcul a été utilisée par un célèbre ingénieur écossais Rankine (1857), et l'approche a depuis été appelée à son nom [12]. La théorie de Rankine étudie l'équilibre, sous l'action de son seul poids, d'un massif pulvérulent indéfini limité par un plan faisant l'angle  $\omega$  sur l'horizontale. Le sol est encore supposé homogène et isotrope, mais Rankine fait l'hypothèse que l'état d'équilibre est identique pour tous les points situés à une même profondeur. La présence de discontinuités (provoquées par exemple par des écrans placés au sein du massif) ne modifie pas la répartition des contraintes verticales dans le sol. Cette théorie constitue le premier effort pour évaluer les contraintes au sein d'un massif de sol. [11]

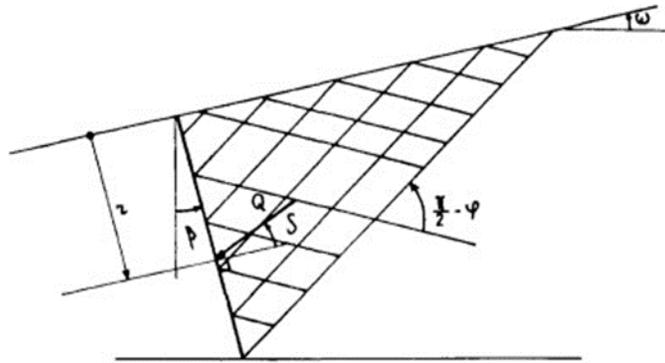


Figure I.14: Le coin de Rankine.

La relation de la résistance, due au cisaillement de Mohr-Coulomb, définit la résistance au cisaillement finale comme suit :

$$\tau_f = c + \sigma'_n \tan \varphi \quad (I.4)$$

Où

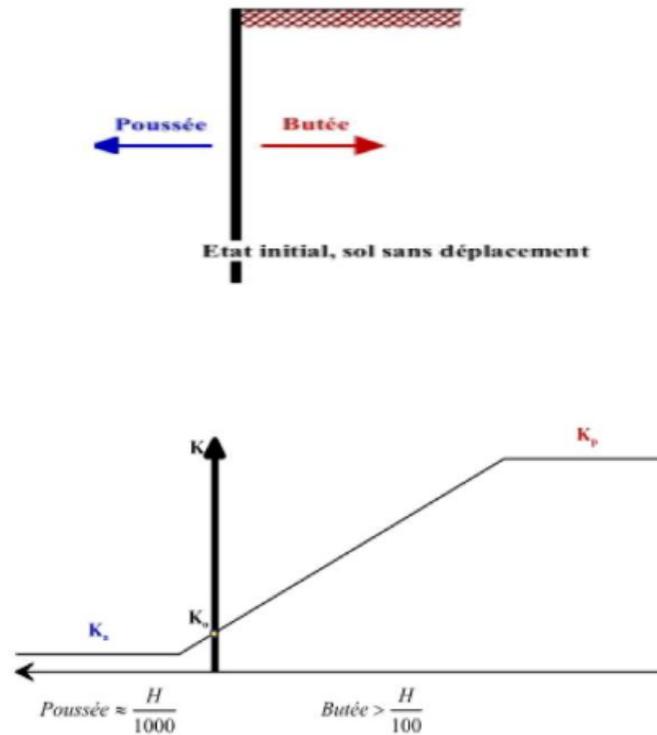
- $c$  : La cohésion effective ;
- $\sigma'_n$ : La contrainte normale effective sur le plan de rupture ;
- $\varphi$ ; L'angle de frottement interne effective.

La contrainte effective est donnée par l'équation :

$$\sigma = \sigma' - u \quad (I.5)$$

Où  $u$  est la pression d'eau interstitielle.

Les contraintes de poussée et de butée qui s'exercent sur le mur sont, pour un sol pulvérulent :  
 Pour qu'il ait équilibre de poussée ou de butée, il faut qu'il y ait déplacements figure I.15 grossièrement de l'ordre de  $(H/1000)$  pour mobiliser la poussée et supérieur a  $(H/100)$  pour mobiliser la butée.



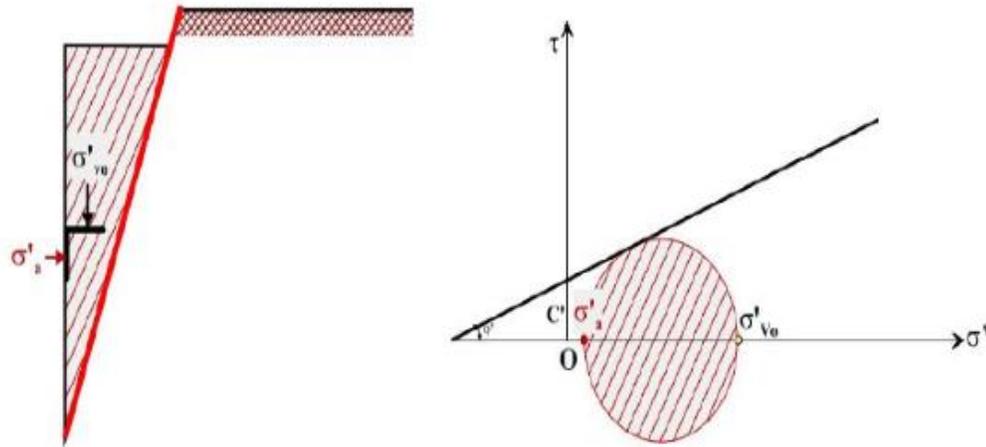
**Figure I.15:** Déplacement nécessaires à la mobilisation des états limites (poussée et butée).

-La contrainte de poussée active est :

$$\sigma_a = k_a \cdot \sigma_v \quad (I.6)$$

Avec :

$$K_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (I.7)$$



**Figure I.16:** État limite de poussée du sol (sans talus  $\beta=0$ , sans frottement sol écran  $\delta = 0$ ).

-La contrainte de butée passive est :

$$\sigma_p = k_p \cdot \sigma_v \tag{I.8}$$

Avec :

$$K_p = \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \tag{I.9}$$

$K_a$  et  $k_p$  s'appliquent sur les contraintes. Ces contraintes sont inclinées de  $\delta = \theta$  par rapport à l'horizontale.

Les contraintes qui s'exercent sur le mur sont, pour un sol cohérent :

- Contrainte active de sol cohérent.

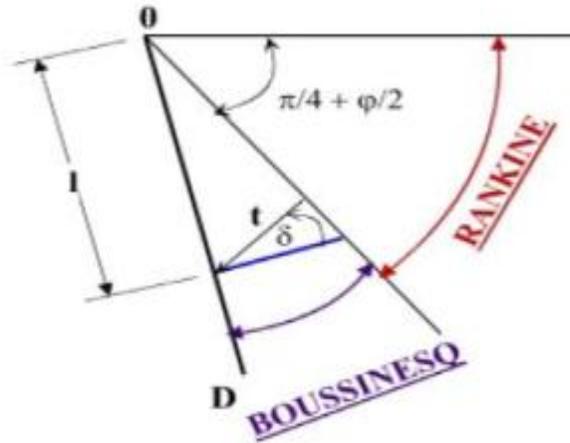
$$\sigma_a = k_a \cdot \sigma_v - 2c\sqrt{k_a} \tag{I.10}$$

Selon cette équation, les contraintes de traction se développent à une profondeur  $z_0$  dans le remblai. Un vide peut se former dans cette région avec le temps. Pendant les tempêtes de pluie, ces vides se remplissent de l'eau, ce qui entraîne des pressions d'eau hydrostatiques à la profondeur  $z_0$ , le long du parement intérieur du mur. [9]

**I.6.1.3. Méthode de Boussinesq**

Boussinesq (1882) a amélioré la théorie de Rankine en prenant l'interaction réelle entre le sol et l'écran, c'est-à-dire en choisissant la valeur de l'angle de frottement  $\delta$  sol-écran. Dans cet équilibre, Boussinesq considère une première zone où on a l'équilibre de Rankine se raccordant à une seconde zone où il tient compte des conditions aux limites sur l'écran.

Boussinesq garde les résultats de Rankine concernant la répartition des contraintes sur l'écran :



**Figure I.17:** Equilibre de Boussinesq et de Rankine.

- L'obliquité des contraintes est constante le long de l'écran OD, elle est choisie et fixée à  $\delta$ .
- La répartition des contraintes sur l'écran est triangulaire.

$$t\alpha = k_a \cdot \gamma \cdot l \tag{I.11}$$

Si Boussinesq avait bien posé le problème, il n'a été résolu qu'en 1948 par Caquot et Kerisel qui en ont donné la démonstration suivante.

On travaillera en coordonnées polaires, pour lesquelles les équations d'équilibre  $\text{div } t + F=0$  s'écrivent :

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{r \partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \gamma \cos \theta \tag{I.12}$$

$$\frac{\partial \tau r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_\theta}{r \partial \theta} + 2 \frac{\tau}{r} = \gamma \sin \theta \tag{I.13}$$

- $\sigma_r$ : Contrainte normale radiale
- $\sigma_\theta$ : Contrainte normale ortho radiale

- $\tau$ : Contrainte de cisaillement

Le système des deux équations différentielles a été intégré par Caquot et Kérisel, les calculs étant améliorés par ABSI pour donner des tables complètes de poussée et butée fournissant les coefficients  $K_a$  et  $K_p$ . Le problème est déterminé par les conditions aux frontières.

- Surface libre : contraintes nulles
- Sur l'écran : obliquité imposée  $\delta$  de la contrainte.

Entre la surface libre et la première ligne de glissement on a un équilibre de Rankine et entre la première ligne de glissement et l'écran un équilibre de Boussinesq.

Le tracé des lignes de glissement montre que les lignes de glissement diffèrent peu de lignes droites dans le cas, d'équilibre de poussée, par contre elles s'en éloignent fortement dans le cas d'équilibre de butée.

### I.6.2. Méthode au coefficient de réaction

La méthode de calcul utilisant la notion de module de réaction est largement utilisée pour le calcul des ouvrages de soutènement souples, particulièrement en France. Il existe ainsi, sur le marché, un certain nombre de programmes de calcul automatique des rideaux et parois utilisant cette méthode et reposant sur des hypothèses variées en matière de discrétisation, construction des courbes d'hystérésis, règles de chargement, déchargement, etc.[13]

Dans le domaine des petits déplacements, cette méthode est basée sur l'hypothèse fondamentale de Winkler 1867 selon laquelle les contraintes à l'interface sol/structure sont proportionnelles au déplacement de celle-ci. Ainsi, si le rideau à une profondeur  $z$ , s'est déplacé de  $u(z)$ , la pression horizontale  $P(z)$  du sol est telle que :

$$P(z) = kh \cdot u(z) \quad (I.14)$$

$kh$ , appelé coefficient de réaction ( $\text{KN/m}^3$ ), n'est pas une grandeur intrinsèque puisqu'il dépend de la nature du sol, de sa rigidité, et des dimensions de rideau. Il est couramment évalué à partir de l'essai pressiométrique en fonction du module pressiométrique équivalent  $E$ . conformément à la formule de Ménard, Bourdon et Houy.

$$Kh = \frac{E_M^e}{\frac{\alpha a}{2} + 0.133(9\alpha)^\alpha} \quad (I.15)$$

Avec

$\alpha$  : Le coefficient de structure.

a: paramètre ayant la dimension d'une longueur, dépend de la géométrie du système sol/rideau.

### I.6.3. Méthodes empiriques et semi empiriques

Elles supposent une cinématique de rupture et de décompression du terrain autour de l'ouvrage. En effet, elles proposent directement le mode de soutènement à adopter à une situation définie à partir d'une classification géotechnique du terrain. Permettent de déterminer les actions s'exerçant sur un soutènement quel que soit sa nature et sans tenir compte de sa déformation. Parmi ces méthodes on note :

- Méthode de TERZAGHI.
- Méthode de PROTODIACONOV.
- Méthode de BIERBAUMER.
- Recommandations de l'AFTES.
- Classification (RMR) (Beiniawski, 89).
- Classification de Barton, 74 (Q System).
- Méthode géomécanique.

### I.6.4. Méthode des éléments finis

Le calcul automatique en génie géotechnique a vu ces dernières années, un développement important avec introduction de la méthode des éléments finis au calcul des ouvrages. Cette méthode permet de discrétiser le système sol/rideau/ancrage en un maillage d'éléments finis dont les propriétés sont variables dans l'espace et en fonction du chargement.

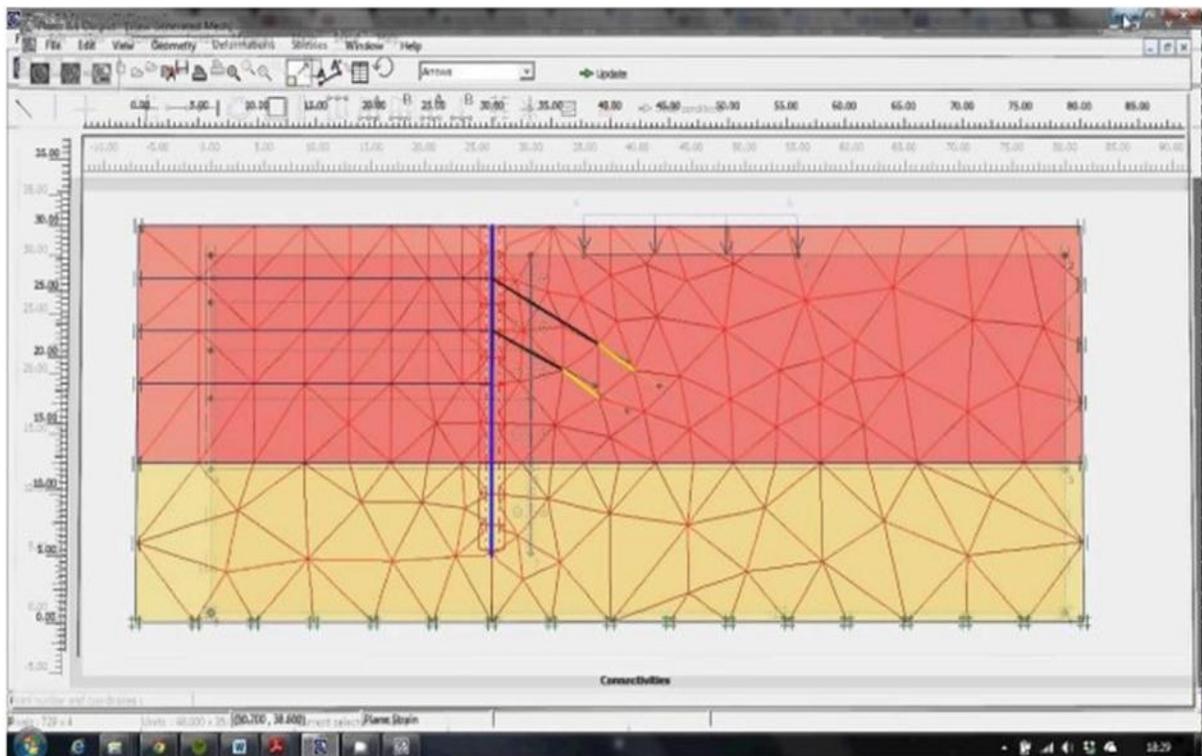
Tous programmes général d'éléments finis permet de faire un calcul de rideaux à l'aide des éléments en déformation plane. Certain logiciel disposant de la possibilité d'inclure d'élément d'interface entre le rideau et le sol permettant ainsi un découlement possible du rideau, ce qui permet une modélisation plus réaliste de l'interface sol/rideau. Donc elle offre la possibilité de

prendre en compte par des méthodes plus traditionnelles, pour cela elle a eu un grand intérêt de la part des ingénieurs de la géotechnique et du génie civil.

D'une façon générale, la résolution par la méthode des éléments finis inclut les étapes suivantes :

- Obtention de la formulation du problème ;
- Réalisation d'un maillage, correspondant à la discrétisation du domaine d'étude en éléments (triangulaire, tétraèdres, hexaèdres...) sur lesquels les champs sont écrits en termes d'un nombre fini de degrés de liberté et de fonctions de base à repère local ;
- Calcul des matrices élémentaires qui, après assemblage, génèrent un système matriciel ;
- Résolution du système algébrique pour l'obtention d'une solution approchée du problème.

Il existe plusieurs logiciels spécialisés d'éléments finis en géotechnique, tel que PLAXIS, CRISP, CESAR, permettant de par leur convivialité et leur interactivité une modélisation aisée de ce type de problème. [9]



**Figure I.18:** Exemple de maillage dans Plaxis.

## I.7. Conclusion

Au terme de cette synthèse bibliographique, nous avons passé en revue les principaux concepts et notions à connaître pour l'étude des dispositifs de soutènement. Nous retenons l'existence d'une variété de méthodes d'excavation de solution de soutènement à mettre en place. Les déterminants du choix de l'une de ces options possibles est la résultante d'une réflexion basée sur deux éléments :

- D'une part sur la faisabilité technique : en relation à la nature du sol, l'environnement du site, le risque sur l'urbanisation,
- Et d'autre part sur la contrainte financière : liée principalement au budget alloué au projet.

Par ailleurs, l'ensemble des méthodes de calcul de ces écrans de soutènement visent la satisfaction des conditions de sécurité de l'exécution de l'ouvrage, et cela par un ensemble de vérifications : vis-à-vis des déformations admissibles et vis-à-vis du glissement.

## **CHAPITRE II : PRÉSENTATION DU SITE DU PROJET**

### II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation du site du projet objet de notre étude, il s'agit de la station "Smail Yefsah" de l'extension du métro d'Alger reliant le centre-ville d'El Harrach à l'Aéroport International Houari Boumediene.

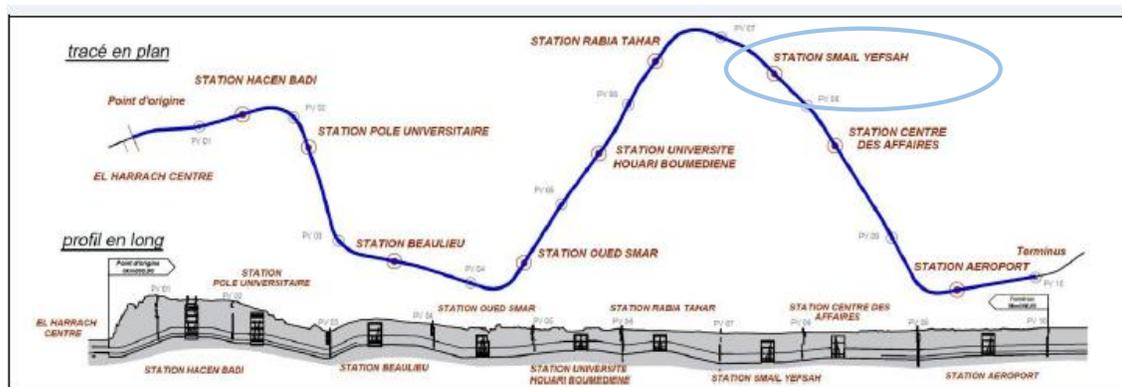
Le chapitre précise d'abord la localisation de la station objet de l'étude, pour enchaîner par la suite la description des différents aspects du site, à savoir : la géomorphologie, la géologie, l'hydrogéologie, le climat et la sismicité de la région.

### II.2. Présentation de l'extension El Harrach – Aéroport

Cosider Travaux Publics est chargée du projet de l'extension de la ligne 1 du métro d'Alger reliant le centre-ville d'El Harrach à l'Aéroport International Houari Boumediene depuis juin 2015. Sur un linéaire de 10 km, l'extension comporte 10 puits de ventilation et 9 stations. Cette ligne desservira des quartiers denses en population tel que : Beaulieu, Oued Smar, Cité 5 juillet, Bab Ezzouar, le pôle universitaire d'El Harrach, le Centre des Affaires de Bab-Ezzouar et l'université Houari Boumediene. Elle relie le Tramway au carrefour de l'université Houari Boumediene et Offrira une multi modalité au niveau de cette station.

Sur cette extension 9 stations seront réalisés :

- Station Hassan Badi.
- Station Pôle universitaire.
- Station Beaulieu.
- Station Oued Smar.
- Station Université Houari Boumediene.
- Station Rabia Tahar.
- **Station Smail Yefsah.**
- Station Centre des Affaires.
- Station Aéroport.



**Figure II.1:** Tracé de la ligne 1 lot 1 extension B.

Par rapport au tracé de l'extension Lot-1(El Harrach Centre – Aéroport d’Alger) qui est une ligne prolongée de l’extension B1 de la première ligne du métro d’Alger. La station Smail Yefsah se situe entre le PK 6+646.5 et PK 6+773.5 d’une longueur de 127m.

### II.3. Situation géographique du site

La station d’étude Smail Yefsah est localisée entre la cité Smail Yefsah et le complexe d’appartements de la cité 5 Juillet dans la commune de Bab Ezzouar, appartenant à la daïra de Dar El-Beida sur la partie Est de la wilaya d’Alger. Cette station située à 15km d’Alger-centre présente un relief pratiquement plat (topographie plane qui fait partie de la plaine de la Mitidja).



**Figure II.2:** Plan de situation de la station Smail Yefsah.

Au plan géométrique, la station de métro Smail Yefsah se caractérise par une longueur de 127m, une largeur de 26m et une profondeur de 30m nécessaire pour sa réalisation. La station contient trois accès et deux escaliers de secours.

### II.4. Contexte géomorphologique

La région d'Alger est constituée de plusieurs ensembles géomorphologiques :

- Le massif et le Sahel d'Alger ;
- La plaine de la Mitidja ;
- L'Atlas Blidéen.

#### 1- Le massif et le Sahel d'Alger

##### a) Le massif d'Alger

Orienté Est-Ouest, il s'étend sur une longueur de 20km et de 6km de largeur. Boisé et recoupé par un réseau de talwegs profonds, sa topographie est très accidentée et son sommet culmine à 407 m.

##### b) Le Sahel d'Alger

Il forme une structure anticlinale asymétrique orientée Est-Ouest. Il englobe tous les petits reliefs qui s'étendent entre le massif de Bouzaréah au Nord et les rives gauches de l'oued El-Harrach au Sud et au Sud – Est.

Il y est reconnu trois parties principales qui sont :

- ✚ Le Sahel d'Alger, essentiellement marneux d'âge Plaisancien. Sa topographie mamelonnée est traversée par un réseau hydrographique peu dense, typique des terrains très peu perméables.
- ✚ Le plateau mollassique d'Alger sur lequel est construit les quartiers d'El Biar, Ben Aknoun et place du 1<sup>er</sup> Mai. Ce massif est limité par les falaises d'El Hamma et de Télémy et celle de Hydra et de Bir-Mourad- Rais.
- ✚ Le piémont sud du Sahel formé de dépôts argilo- caillouteux du comblement de la Mitidja.

### 2- La plaine de la Mitidja

Elle forme une cuvette subsidente, synclinale orientée ENE – OSO. C'est une zone intermédiaire entre le Sahel et l'Atlas Blidéen, dans laquelle s'étendent de grands marécages.

### 3- L'Atlas Blidéen

Il constitue le relief méridional de la région, il est représenté par une succession de massifs montagneux, dont l'altitude maximale est de 1629m, au pic de Sidi Abdelkader. A ces ensembles géologiques s'ajoutent au Nord-Est du Sahel la plaine et à l'Ouest, le cordon littoral dunaire.

## II.5. Contexte géologique

### II.5.1. Géologie régionale

D'après la carte géologique d'Alger bis N°21 au 1/50.000<sup>ème</sup>, la région d'Alger se trouve dans la partie occidentale de la Mitidja, elle est représentée du point de vue géologique par des formations pliocènes récent et quaternaire ancien suivantes :

- Les alluvions récentes (actuelles) cartées (a<sup>2</sup>) ;
- Le sable plus au moins argileux et plus au moins rubéfié (Calabrien-Villafranchien au temps actuel) carté (as) ;
- Calcaire à lithothamniées, souvent construit (biostrome) (Astien) carté (P<sup>2L</sup>) ;
- Les marnes aux argiles du plaisancien cartées (P).

Les principales formations affleurant dans la région d'Alger sont les suivantes:

- Le socle métamorphique (massif d'Alger), Il est constitué de formations de nature pélitique et carbonatée qui ont subi un métamorphisme, il a été recoupé par des manifestations magmatiques ;
- Les lacunes stratigraphiques : la région d'Alger est marquée par les grandes lacunes stratigraphiques du secondaire et de la base du tertiaire (éocène et oligocène) ;
- Les formations tertiaires : ces formations recouvrent en discordance les faciès métamorphiques ;
- Les formations quaternaires : cette série est appelée marnes et cailloutis du comblement de la Mitidja, ces dépôts englobent une multitude de faciès plus ou moins grossiers ;
- Le quaternaire : est constitué dans la région d'Alger par de nombreux termes lithologiques (Sables, grés dunaires, alluvions, éboulis, limons, argiles vaseuse, tourbes argileuses).

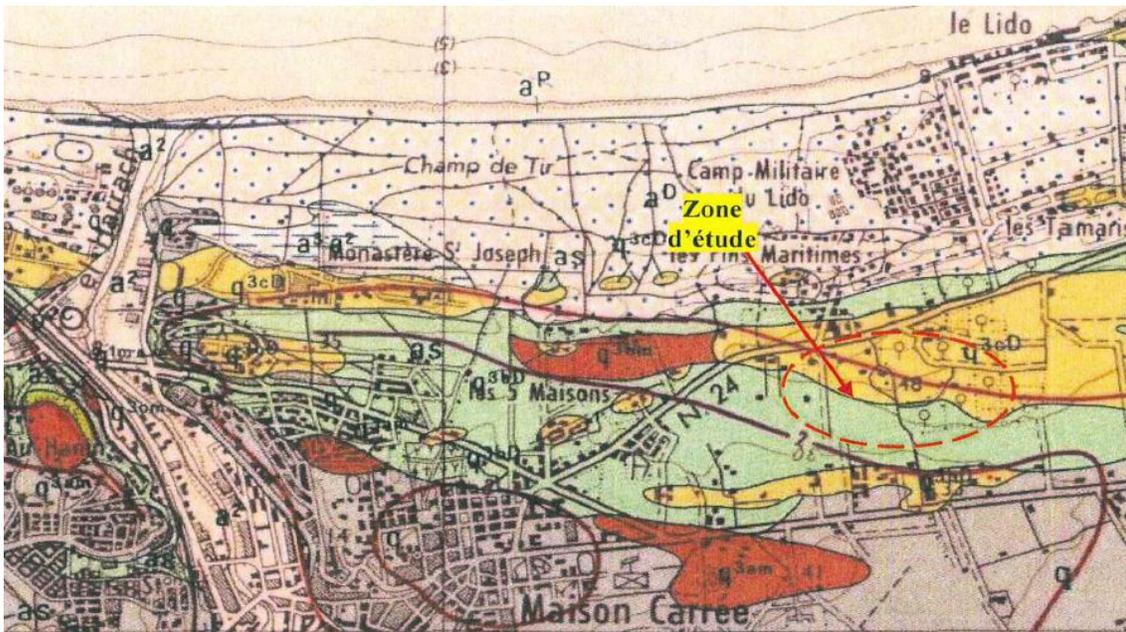


Figure II.3 Extrait de la carte N°21 Alger bis au 1/50.000<sup>ème</sup>.

### II.5.2. Géologie du site

Selon l'information disponible, les sols où la station Smail Yefsah sera creusée concernent des dépôts quaternaires avec faciès lithologique constitués par des argiles limoneuses et des sables limono-argileux, parfois plus ou moins mêlés de cailloux, avec présence des grés et

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION DU SITE DU PROJET

conglomérat superposés aux formations du pliocène supérieur et quaternaire ancien constitués, à l'échelle de l'ouvrage, par les marnes et argiles marneuses dites d'El Harrach.

Globalement, le dispositif géologique-géotechnique est constitué de haut en bas par des remblais avec 3,0 m d'épaisseur, par des argiles limoneuses peu sableuses (QA) jusqu'aux 3,00-10,00 m de profondeur par des sables limono-argileux, parfois plus ou moins mêlés de cailloux, avec présence des grès et conglomérat (Qs), jusqu'aux 10,00-46,00 m de profondeur, par des marnes et argiles marneuses, jaunâtres à grisâtres (QM), jusqu'aux 46,00 – 52,00 m de profondeur au-dessous.

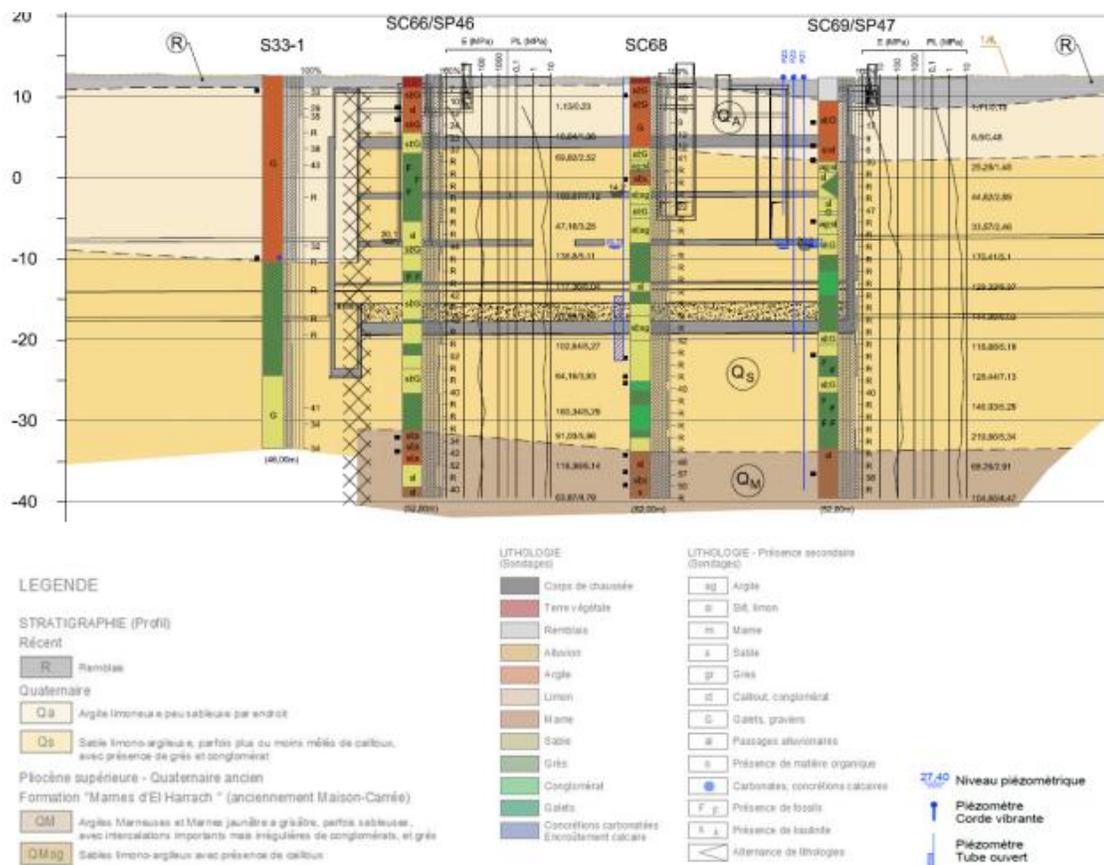


Figure II.4 Coupe géologique.

### II.6. Contexte hydrogéologique

La perturbation des précipitations sur la région d'Alger a engendré un régime hydrographique irrégulier. Durant l'été, les lits d'oued sont à sec, par contre, la période pluvieuse favorise un écoulement et un transport de sédiments.

Le réseau hydrographique de la région est constitué essentiellement de :

- Oued El Harrach;
- Oued El Hamiz;
- Oued Semmar;
- Oued Reghaia;
- Oued Mazafran.

La mollasse astienne constitue le terrain aquifère le plus important de la région, dont son mur est représenté par les marnes bleues du Plaisancien.

Cet aquifère est caractérisé par :

- Les grandes surfaces d’affleurement et d’épaisseur ;
- Une forte perméabilité ;
- Le développement des instabilités ;
- L’alimentation en eau potable ;

Cet aquifère est subdivisé en deux nappes :

### *1) Nappe de la Mitidja*

Elle est captée par de nombreux forages destinés à l’A.E.P. Cette nappe est bien connue par suite des reconnaissances géologiques et hydrogéologiques faites dans le site.

### *2) Nappe du plateau mollassique*

C’est une nappe libre dont les eaux ont été exploitées pour l’alimentation en eau potable d’Alger, suite au captage des sources d’El Hamma de Télémy et de Ben Aknoun.

## **II.7. Contexte climatique**

Alger possède un climat méditerranéen tempéré, marqué par une période pluvieuse offrant des quantités annuelles de précipitations variant en moyenne entre 400 mm et 1 200 mm. Elle est de ce fait plus arrosée que le reste du pays avec des orages parfois très violents, de courte durée et donc d’intensité forte. Les périodes sèches qui s’échelonnent du mois de mai au mois de septembre vont avoir de grandes répercussions dans l’hydrogéologie.

La perturbation des précipitations sur la région d’Alger a engendré un régime hydrographique irrégulier. Durant l’été, les lits d’oued sont à sec, par contre, la période pluvieuse favorise un écoulement et un transport de sédiments.

La grêle peut s'abattre en accompagnement de violentes averses, ainsi qu'une éventuelle chute de neige sur les hauteurs. Cette grêle fond assez vite.

La neige tombe plutôt sur les zones élevées de Bouchaoui, Bouzaréah, Cheraga, Ben Aknoun, Bir Mourad Rais et Douéra. Son épaisseur atteint alors à certains endroits, près de 10 cm.

Les axes routiers sont fréquemment bloqués. Les communes doivent être équipées pour y faire face, sous peine de grands embouteillages en pleines heures de pointe routière au niveau de plusieurs axes routiers importants.

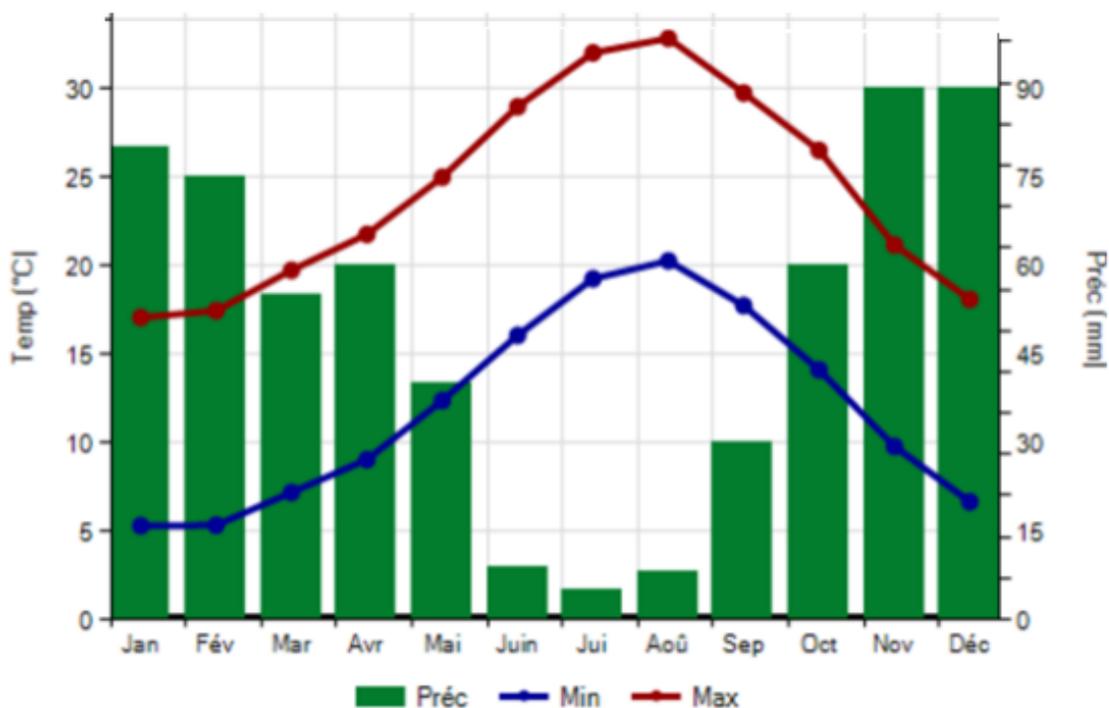


Figure II.5 Graphique climatique de la wilaya d'Alger.

### II.8. Conditions sismiques

La conception et la réalisation du projet devront tenir compte de la sismicité de la région et se référer à la réglementation. Pour le calcul dynamique de l'ouvrage, il y'a lieu de se référer au règlement parasismique Algérien en vigueur.

En Algérie, cinq zones sont définies en fonction de leur sismicité croissante (Figure II.6) :

**Zone 0** : sismicité négligeable ;

**Zone I** : sismicité faible ;



### *-Classification du site*

Pour la prise en compte du risque sismique et en particulier de la valeur du coefficient d'accélération, les tunnels et puits, selon la partie II des RPOA2008 – Règles Parasismiques applicables au domaine des Ouvrages d'Art, sont classés en deux groupes. [14]

- **Groupe 1** Tunnels stratégiques : Ce groupe recouvre les tunnels stratégiques devant rester circulables après avoir subi l'action sismique ultime réglementaire.

- **Groupe 2** Tunnels importants: Dans ce groupe sont classés les tunnels qui se trouvent sur les chemins de wilaya, chemins communaux ou autre voies.

A partir de cette classification, notre ouvrage fait partie du Groupe 1, ouvrages d'importance stratégique. Le coefficient d'accélération est défini en fonction de la zone sismique et de la classe des ouvrages selon le tableau II-1.

**Tableau II-1** : Coefficient d'accélération selon la classe d'ouvrage et la zone de sismicité

Groupe	Zone Sismique			
	I	IIa	IIb	III
1	0.15	0.25	0.30	0.40
2	0.12	0.20	0.25	0.30
3	0.10	0.15	0.20	0.25

Donc, selon les données précédentes nous retenons que le coefficient d'accélération qui sera pris dans les calculs est  $A=0.4g$  ( $g$  étant la gravité prise égale à  $9.81 \text{ m/s}^2$ ).

### **II.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le site du projet de la station Smail Yefsah dont la fouille nécessaire à sa réalisation se caractérise par une longueur de 127m, une largeur de 26m et une profondeur de 30m. Nous avons passé en revue les différents volets caractérisant le site du projet de la station Smail Yefsah, dont les principales conclusions retenues sont :

- Le relief local du projet est pratiquement plat,
- Le climat de la région est de type méditerranéen caractérisé par l'alternance d'une saison sèche et chaude et d'une saison humide, pluvieuse et relativement froide (en moyenne, 600 millimètres par an) ;

- Le sous-sol est caractérisé par la présence des formations suivantes :
  - Des remblais ;
  - Des argiles limoneuses peu sableuse(QA) ;
  - Des sables limoneux-argileux (QMs) ;
  - Des argiles marneuses (QM) ;
- La sismicité du site est très élevée (zone sismique III).

## **CHAPITRE III : SYNTHÈSE GÉOTECHNIQUE**

### III.1. Introduction

Le présent chapitre est consacré à l'élaboration d'une synthèse géotechnique du site du projet. Elle est basée sur l'exploitation des résultats des essais effectués (essais in-situ et essais de laboratoire).

La finalité de ce chapitre vise à proposer un modèle lithologique du sous-sol à considérer pour la phase de la modélisation et l'étude du dispositif de soutènement. Les couches du modèle doivent être identifiées, délimitées (épaisseurs) et caractérisées par les paramètres physiques et mécaniques.

### III.2. Programme de la reconnaissance géotechnique

Pour la reconnaissance du site deux campagnes ont été effectuées, une campagne pendant la réalisation de l'avant projet détaillé (APD), une autre pendant la phase de réalisation de la station Smail Yefsah en 2015. Dans la campagne APD, deux sondages carottés ont été réalisés pour la reconnaissance du sol, le code repère utilisé pour ces deux sondages sont : S33-1 et S34.

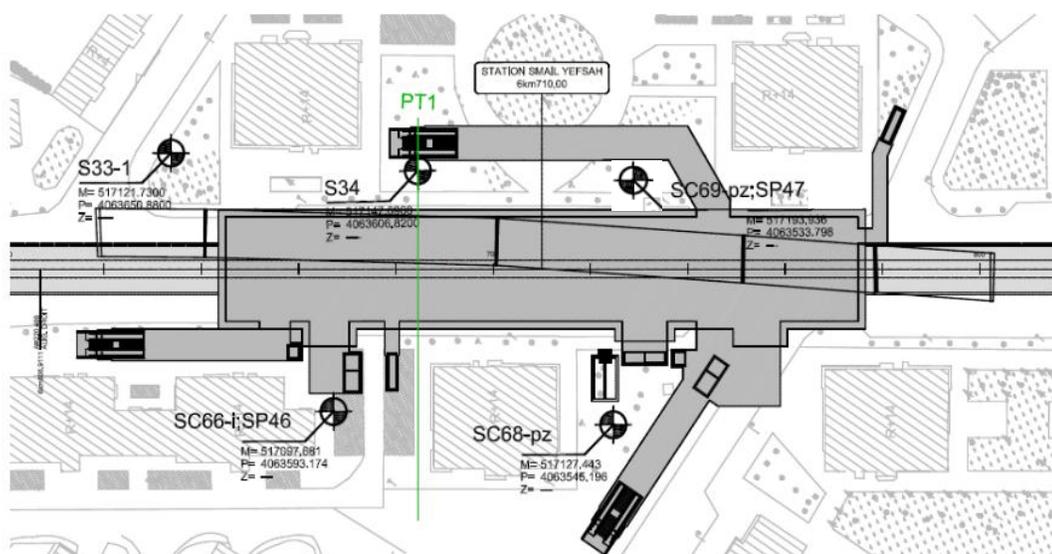
Une autre campagne de prospection a été menée en 2015 avec les débuts de l'exécution des travaux de réalisation de la station Smail Yefsah, celle-ci est complémentaire à la première et apporte plus d'informations sur les caractéristiques du sol en place.

Le programme de cette reconnaissance consiste en la réalisation de :

- Cinq (5) sondages carottés mentionnés dans la carte ci-après : S33-1, S34, SC66, SC68, et SC69.
- Trois (3) essais au standard pénétration test SC66, SC68 et SC69.
- Deux (2) essais pressiométriques SP46 et SP47.
- Des lectures piézométriques de tube ouvert et corde vibrante.
- Des essais de laboratoire effectués sur des échantillons prélevés aux sondages S33-1, S34, SC66, SC68 et SC69.

**Tableau III-1** : Sondages carottés réalisés au niveau la station.

Phase	Sondage	Profondeur(m)
<i>APD</i> Avant projet détaillé	S33-1	46
	S34	31
<i>CPC</i> Campagne de prospection complémentaire	SC66-SP46	52
	SC68	52
	SC69-SP47	52

**Figure III.1** Plan d'implantation des essais in-situ.

### III.2.1. Essais in-situ

#### III.2.1.1. Sondages carottés

L'analyse des carottes des sondages réalisés a permis l'établissement des logs géologiques montrant la lithologie des terrains traversés en profondeurs ainsi que leurs épaisseurs. Les cinq sondages réalisés au niveau de cette zone ont permis de rencontrer la succession lithologique suivante :

- ***Sondage carotté S33-1***

0m – 23m : Argile carbonatée, de couleur brun jaunâtre, avec passage légèrement graveleux, présence de concrétions carbonatées entre 12m et 14m de profondeur.

23m – 37m : Grés jaunâtre à blanchâtre, alvéolaire par endroits, avec alternance de passages durs et friables.

37m – 46m : Sable moyen à fin consolidé à grésifié, renfermant quelques graves et blocs gréseux, brun rougâtre.

- ***Sondage carotté S34***

0m – 0.5m : Remblais.

0.5m – 4.2m : Argile brunâtre à quelques taches brunes foncées carbonatées et peux plastiques.

4.2m – 5m : Argile brun-gris plastique.

5m – 7m : Argile gris-ocre moyennement compacte.

7m – 8.5m : Argile graveleuse, sableuse, brun-ocre.

8.5m – 11m : Argile sableuse rougeâtre.

11m – 12.5m : Argile carbonatée brun-jaunâtre avec présence de grave.

12.5m – 16m : Sable argileux brun-jaune.

16m – 17m : Sable argileux compact.

17m – 18m : Grés tendre, fin, de couleur beige, légèrement carbonaté.

18m – 18.6m : Sable argilo-graveleux, jaune.

18.6m – 19m : Grés fin, beige.

19m – 31m : Sable fin, légèrement argileux, avec passage grésifié épais d'environ 45cm.

- ***Sondage carotté SC66***

0m – 1.5m : Remblais.

1.5m – 3m : Argile limoneuse peu graveleuse brunâtre.

3m – 5m : Argile avec trace de limons vaseuse grisâtre à nuance noirâtre.

5m – 7m : Argile limoneuse peu sableuse avec trace de graviers grisâtre.

7m – 9.5m : Sable limoneux peu argileux marron clair à rougeâtre.

9.5m – 10.5m : Grés sain à fissuré blanchâtre à jaunâtre clair.

10.5m – 15m : Grés lumachellicque sain à fissuré blanchâtre à jaunâtre clair.

15m – 18m : Grés fragile broyé fissuré sous forme de fraguements jaunâtre.

18m – 21m :Sable peu limoneux fin à moyen de couleur jaunatre.  
21m – 21.8m :Sable avec trace de limons et trace de gravies jaunatre.  
21.8m – 24m :Sable consolidé sain à fissuré de couleur jaunatre.  
24m – 25.5m :Grés lumachellique broyé fraguementé jaunatre.  
25.5 – 26.5m :Sable limoneux caillouteux marron claire.  
26.5m – 30m :Sable grossier peu limoneux graveleux brunatre.  
30m – 30.5m :Grés broyé sous forme de graviers jaunatre.  
30.5m – 33m :Sable consolidé sain à fissuré broyé par endroit de couleur jaunatre.  
33m – 34.5m :Grés broyé sous forme de graviers jaunatre.  
34.5m – 36m :Sable consolidé sain à fissuré broyé par endroit de couleur jaunatre.  
36m – 39.20m :Sable limoneux graveleux de couleur jaunatre.  
39.20m – 43.6m :Grés sain à fissuré blanchatre à jaunatre claire.  
43.6m – 45m :Marne peu limoneuse avec trace de sable.  
45m – 46.5m :Marne peu limoneuse peu sableuse de couleur grisatre à verdatre.  
46.5m – 48m :Argile limoneuse sableuse avec trace de marne.  
48m – 50.7m :Sable fin à moyen avec trace de limon jaunatre.  
50.7m – 50.9m :Marne peu limoneuse de couleur grisatre à verdatre.  
50.9m – 52m :Marne peu limoneuse de couleur grisatre à verdatre.

- *Sondage carotté SC68*

0m - 0.8m : Remblais.  
0.8m– 2.5m : Argile peu limoneuse grisatre à brunatre mole avec trace de graviers.  
2.5m – 4.3 : Argile limoneuse brunatre à nuence noiratre mole avec trce de graviers.  
4.3m – 8.7m : Argile vaseuse peu graveleuse noiratre avec présence de matiere organique.  
8.7m – 10.3m :Sable limoneuse graveleuse jaunatre à marron claire.  
10.3m – 11.5m :Sable argileux limoneuse mole grisatre à nuence noiratre.  
11.5m – 11.8m :Passage de grés sous forme de graviers.  
11.8m – 13.3m :Argile limoneuse sableuse avec trace de graviers rougeatre.  
13.3m – 15.7m :Sable limoneux peu argileux jaunatre à marron clair avec un passage de grés broyé.  
15.7m – 17.5m :Sable argileux limoneux avec trace de graviers de couleur rougeatre.

17.5m – 20.5m :Sable limoneux peu argileux avec trace de graviers maron claire à foncé.

20.5m – 25.3m : Grés friable fissuré broyé sous forme de freguement pa endroit.

25.3m - 26.5m : Sable grossier limoneux brunatre.

26.5m – 28m :Grés sain à fissuré jaunatre claire à brunatre.

28m – 29.5m :Sable consolidé fissuré broyé de couleur marron claire.

29.5m – 32.5m :Sable limoneux avec trace d'argile et trace de graviers marron claire à jaunatre.

32.5m – 37.5m :Sable consolidé sain à fissuré broyé par endroit de couleur marron claire.

37.5m – 38.7m :Conglomérats poudingue fissuré broyé par endroit.

38.7m – 40.5m :Grés sain à fissuré de couleur marron claire.

40.5m – 43.6m : Conglomérats poudingue à ciment carbonaté sain à fissuré jaunatre.

43.6m – 44.5m :Grés sain à fissuré jaunatre à marron claire.

44.5m – 46.2m :Sable consolidé avec présence de grés sous forme de cailloux marron claire.

46.2m – 49m :Marne avec trace de limon grisatre.

49m – 50.5m :Marne avec trace de limon et trace de sable grisatre.

50.5m – 51.5m :Marne avec peu de sable grisatre.

51.5m – 52m :Marne limoneux peu sableuse peu graveleuse grisatre à verdatre.

- ***Sondage carotté SC69***

0m – 3m : Remblai.

3m – 7.5m : Argile limoneux vaseuse mole avec trace de graviers brunatre à nuence noiratre.

7.5m – 10.5m : Argile avec trace de sable et trace de limons vaseuse mole grisatre à nuence noiratre.

10.5m – 11.7m : Sable peu argileux limoneux jaunatre.

11.7m – 15m : Alternance sable limoneux avec grés poreux fissuré.

15m – 16.5m : Sable avec trace de limoneux de couleur brunatre.

16.5m – 17m : Sable graveleux limoneux brunatre.

17m – 19.5m : Sable argileux limoneux de couleur rougeatre.

19.5m – 22m : Sable limoneux caillouteux brunatre.

22m – 24m : Grés sain à fissuré friable marron claire à brunatre.

24m – 25m : Conglomérats poudingue à ciment carbonate sain à fissuré marron claire à brunatre.

25m – 27m : Conglomérats poudingue à ciment carbonaté broyé sous forme de fraguements.  
27m – 29.5m : Grés lumachellique fissuré broyé sous forme de fraguements marron claire.  
29.5m – 31.5m : Grés sain à fissuré friable de couleur marron claire.  
31.5m – 33m : Sable peu limoneux avec trace de graviers jaunatre.  
33m – 34.5m : Sable consolidé sain à fissuré de couleur jaunatre.  
34.5m – 37m : Grés lumachellique sous forme de graviers de couleur marron claire à brunatre.  
37m – 39m : Sable peu limoneux avec trace de graviers jaunatre.  
39m – 42m : Grés lumachellique broyé sous forme de graviers de couleur jaunatre claire.  
42m – 43.5m : Grés lumachellique sain à fissuré de couleur brunatre.  
43.5m – 46m : Grés sain à fissuré broyé par endroit de couleur jaunatre.  
46m – 47.5m : Marne compacte avec trace de limons grisatre à verdatre.  
47.5m – 51m : Marne de consistance compacte de couleur grisatre à verdatre.  
51m – 52m : Marne peu sableuse de couleur grisatre à verdatre.

Les logs des sondages carottés SC68 et SC69 sont insérés en annexe A.

#### **III.2.1.2. Résultats des essais SPT**

Les résultats des essais au Standard Pénétration Test (STP) sont résumés dans les tableaux III-2, III-3, III-4, III-5 et III-6.

**Tableau III-2 :** Résultats des essais au Standard Pénétration Test (SPT) du sondage S33-1.

Profondeur (m)		N <sub>SPT</sub>	N <sub>60</sub>	(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	Interprétation des résultats
Début	Fin				
21.00	21.45	32	29	-	Dense
23.00	-	refus	-	-	-
26.50	-	refus	-	-	-
30.00	-	refus	-	-	-
32.00	-	refus	-	-	-
41.00	41.45	41	38	19	Dense
43.00	43.45	34	31	16	Dense
46.00	46.45	34	31	16	Dense

**Tableau OIII-3 :** Résultats des essais au Standard Pénétration Test (SPT) du sondage S34.

Profondeur (m)		N <sub>SPT</sub>	N <sub>60</sub>	(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	Interprétation des résultats
Début	Fin				
3.00	3.45	10	7	-	Lâche
5.00	5.45	14	11	-	compact
8.50	8.95	31	27	-	Dense
11.00	11.45	30	28	-	Compact
13.00	13.45	28	26	16	Compact
15.00	15.45	25	23	12	Compact
17.00	-	refus	-	-	-
19.00	-	refus	-	-	-
22.50	22.95	37	34	17	Dense
24.50	-	refus	-	-	-
26.50	26.95	36	33	17	Dense
28.00	28.45	32	29	15	Dense
30.50	-	refus	-	-	-

Tableau III-4 : Résultats des essais au Standard Pénétration Test (SPT) du sondage SC66.

Profondeur (m)		N <sub>SPT</sub>	N <sub>60</sub>	(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	Interprétation des résultats
Début	Fin				
1.50	1.95	7	5	-	Lâche
3.00	3.45	10	7	-	Lâche
4.50	4.95	8	6	-	Lâche
6.00	6.45	24	19	-	Compact
7.50	7.95	33	29	23	Dense
9.00	9.45	31	27	19	Dense
10.50	-	refus	-	-	-
12.00	-	refus	-	-	-
13.50	-	refus	-	-	-
15.00	-	refus	-	-	-
16.50	-	refus	-	-	-
18.00	-	refus	-	-	-
19.50	-	refus	-	-	-
21.00	21.45	44	40	20	Dense
22.50	-	refus	-	-	-
24.00	-	refus	-	-	-
25.50	-	refus	-	-	-
27.00	27.45	42	39	20	Dense
28.50	28.52	refus	-	-	-
30.00	30.45	42	39	20	Dense
31.50	-	refus	-	-	-
33.00	-	refus	-	-	-
34.50	34.95	52	48	24	Très dense
36.00	-	refus	-	-	-
37.50	-	refus	-	-	-
39.00	39.45	40	37	19	Dense
40.50	-	refus	-	-	-
42.00	-	refus	-	-	-
43.50	-	refus	-	-	-
45.00	45.45	34	31	-	Dense
46.50	46.95	42	39	-	Dense
48.00	48.45	52	48	-	Très dense
49.50	-	refus	-	-	-
51.00	51.45	40	37	-	Dense

Tableau III-5 : Résultats des essais au Standard Pénétration Test (SPT) du sondage SC68.

Profondeur (m)		N <sub>SPT</sub>	N <sub>60</sub>	(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	Interprétation des résultats
Début	Fin				
1.00	1.45	10	7	-	Lâche
2.50	2.95	40	28	-	Dense
4.00	4.45	19	13	-	Compact
5.50	5.95	9	7	-	Lâche
7.00	7.45	12	10	-	Compact
8.50	8.95	12	10	-	Compact
10.00	10.45	41	36	25	Dense
11.50	-	refus	-	-	-
13.00	-	refus	-	-	-
14.50	-	refus	-	-	-
16.00	16.45	22	20	11	Compact
17.50	-	refus	-	-	-
19.00	-	refus	-	-	-
20.50	-	refus	-	-	-
22.00	-	refus	-	-	-
23.50	-	refus	-	-	-
25.00	-	refus	-	-	-
26.50	-	refus	-	-	-
28.00	-	refus	-	-	-
29.50	-	refus	-	-	-
31.00	-	refus	-	-	-
32.50	32.95	52	48	24	Très dense
34.00	-	refus	-	-	-
35.50	-	refus	-	-	-
37.00	-	refus	-	-	-
38.50	-	refus	-	-	-
40.00	--	refus	-	-	--
41.50		refus	-	-	-
43.00	-	refus	-	-	-
44.50	-	refus	-	-	-
46.00	-	refus	-	-	-
47.50	47.95	46	42	-	Dense
49.00	49.45	52	48	-	Très dense
50.50	50.95	50	46	-	Dense
52.00	-	refus	-	-	-

**Tableau 0III-6 :** Résultats des essais au Standard Pénétration Test (SPT) du sondage SC69.

Profondeur (m)		N <sub>SPT</sub>	N <sub>60</sub>	(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	Interprétation des résultats
Début	Fin				
4.50	4.95	11	9	-	Compact
6.00	6.45	17	13	-	Compact
7.50	7.95	9	8	-	Lâche
9.00	9.45	6	5	-	Lâche
10.50	10.95	39	36	25	Lâche
12.00	-	refus	-	-	-
13.50	-	refus	-	-	-
15.00	-	refus	-	-	-
16.50	16.95	47	43	22	Dense
18.00	-	refus	-	-	-
19.50	-	refus	-	-	-
21.00	-	refus	-	-	-
22.50	-	refus	-	-	-
24.00	-	refus	-	-	-
25.50	-	refus	-	-	-
27.00	-	refus	-	-	-
28.50	-	refus	-	-	-
30.00	-	refus	-	-	-
31.50	-	refus	-	-	-
33.00	-	refus	-	-	-
34.50	-	refus	-	-	-
36.00	-	refus	-	-	-
37.50	-	refus	-	-	-
39.00	-	refus	-	-	-
40.50	-	refus	-	-	-
42.00	-	refus	-	-	-
43.50	-	refus	-	-	-
45.00	-	refus	-	-	-
46.50	-	refus	--	-	-
48.00	48.45	58	53	-	Très dense
49.50	-	refus	-	-	-
51.00	-	refus	-	-	-

### III.2.1.3. Résultats des Essais PMT

Les résultats des essais pressiométriques sont donnés par les tableaux III-7 et III-8,

**Tableau III-7 : Résultats des essais pressiométriques\_SC46.**

<b>Profondeur (m)</b>	<b>E<sub>M</sub> (MPa)</b>	<b>PI (MPa)</b>	<b>E<sub>M</sub>/PI (MPa)</b>	<b>Classe de sol (XP P94-011)</b>
3.70	1.13	0.23	4.96	Argile et limons mous
7.40	10.64	1.36	7.80	Sable moyennement compacts
10.00	69.82	2.52	27.69	Sable compacts
14.80	100.07	7.12	14.05	Sable compacts
18.50	47.16	3.25	14.53	Sable compacts
22.20	138.80	5.11	27.18	Sable compacts
25.90	117.36	6.04	19.45	Sable compacts
29.60	63.89	3.88	16.49	Sable compacts
33.30	102.64	5.27	19.48	Sable compacts
37.00	64.16	3.93	16.31	Sable compacts
41.40	160.34	5.29	30.29	Sable compacts
44.40	91.03	5.96	15.28	Argile très ferme à dures
48.10	118.36	6.14	19.28	Argile très ferme à dures
52.00	63.87	4.79	13.34	Argile très ferme à dures

**Tableau III-8 : Résultats des essais pressiométriques\_SC47.**

<b>Profondeur (m)</b>	<b>E<sub>M</sub> (MPa)</b>	<b>PI (MPa)</b>	<b>E<sub>M</sub>/PI (MPa)</b>	<b>Classe de sol (XP P94-011)</b>
3.70	1.71	0.15	11.12	Argile et limons mous
7.40	8.50	0.48	17.63	Argile et limons mous
11.10	25.25	1.45	17.43	Sable moyennement compacts
14.80	44.62	2.89	15.42	Sable compacts
18.50	33.57	2.46	13.63	Sable compacts
22.20	170.41	5.10	33.41	Sable compacts
25.90	129.32	5.37	24.07	Sable compacts
29.60	144.98	6.03	24.04	Sable compacts
33.30	118.68	5.19	22.88	Sable compacts
37.00	128.44	7.13	18.01	Sable compacts
40.70	146.03	5.29	27.58	Sable compacts
44.40	219.66	5.34	41.12	Sable compacts
48.10	68.26	2.91	23.46	Argile très ferme à dure
52.00	104.55	4.47	23.38	Argile très ferme à dure

Les résultats des essais pressiométriques sont insérés en annexe B.

#### **III.2.1.4. Campagne piézométrique**

Pour la définition du modèle hydrogéologique dans la station, deux piézomètres ont été installés ; un piézomètre à tube Ouvert au niveau du sondage SC68 et un piézomètre à corde vibrante au niveau du sondage SC69, les résultats des lectures piézométriques sont données dans les tableaux III-9 et III-10.

Tableau III-9 : Lectures piézométriques à tube ouvert\_SC68.

Niveaux Terrain	Profondeur Zone Percée	Date	Lectures Profondeur (m)
12,37	27,00-35,00	09-11-2015	20,60
		12-11-2015	-
		14-11-2015	20.57
		16-11-2015	20.56
		25-11-2015	20.57
		01-12-2015	20.61
		07-12-2015	20.62
		14-12-2015	20.62
		23-12-2015	20.65
		28-12-2015	20.63
		05-01-2016	20.60
		12-01-2016	20.60
		18-01-2016	20.60
		27-01-2016	20.58
		01-02-2016	20.62
		08-02-2016	20.75
		15-02-2016	20.65
		24-02-2016	20.57
		01-03-2016	20.55
		08-03-2016	20.54
		13-03-2016	20.48
		21-03-2016	20.52
		28-03-2016	20.48
		04-04-2016	20.46
		17-04-2016	20.37
		20-04-2016	-
		02-05-2016	20.59
		16-05-2016	20.56
		24-05-2016	20.78
		29-05-2016	20.47

Tableau III-10 : Des lectures piézométriques à corde vibrante\_SC69.

Sondage N°	Niveaux Terrain	Profondeur Installation	Date	Lectures Pression (Bar)	Niveau Piézométrique Profondeur (m)
SC69_PZ1	12.40	51.0	29-03-2016	2.96	20.72
			09-04-2016	2.96	20.73
			11-04-2016	2.97	20.66
			18-04-2016	2.97	20.71
			27-04-2016	2.95	20.87
			05-05-2016	2.94	20.98
			17-05-2016	2.94	20.93
			22-05-2016	2.94	20.96
			30-05-2016	2.93	21.09
			04-06-2016	2.91	21.24
			12-06-2016	2.90	21.38
SC69_PZ2		34	29-03-2016	1.29	20.78
			09-04-2016	1.29	20.81
			11-04-2016	1.29	20.82
			18-04-2016	1.30	20.76
			27-04-2016	1.29	20.78
			05-05-2016	1.30	20.75
			17-05-2016	1.30	20.70
			22-05-2016	1.30	20.72
			30-05-2016	1.30	20.70
			04-06-2016	1.30	20.74
			12-06-2016	1.30	20.72
SC69_PZ3		17	29-03-2016	-0.02	17.19
			09-04-2016	-0.09	17.95
			11-04-2016	-0.10	17.99
			18-04-2016	-0.10	18.05
			27-04-2016	-0.13	18.33
			05-05-2016	-0.14	18.44
			17-05-2016	0.00	16.95
			22-05-2016	0.00	16.99
			30-05-2016	0.00	16.96
			04-06-2016	0.00	17.03
			12-06-2016	0.00	16.99

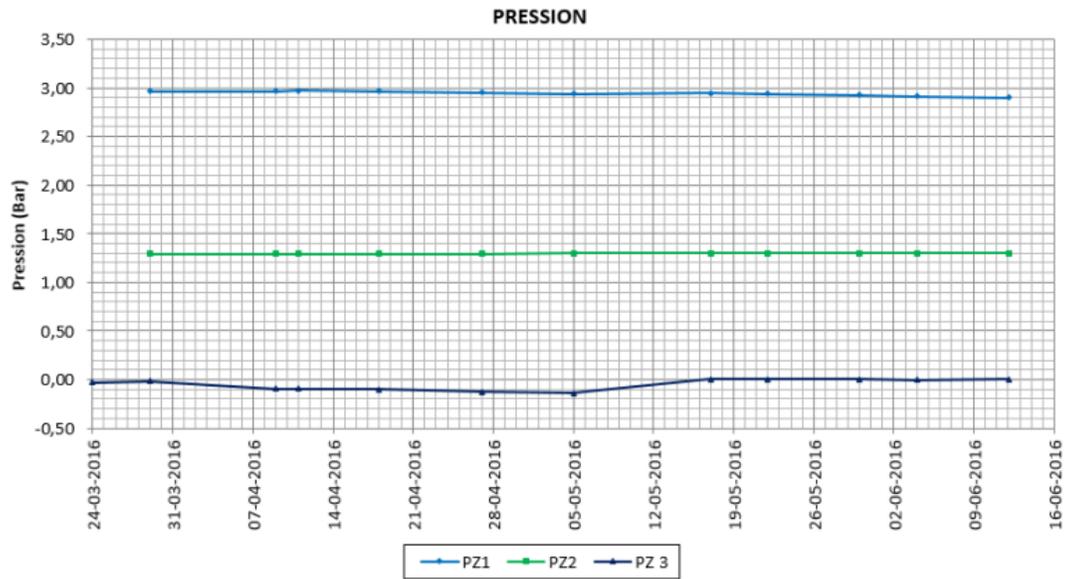


Figure III.2: Piézomètres à corde vibrante\_SC69. Pression.

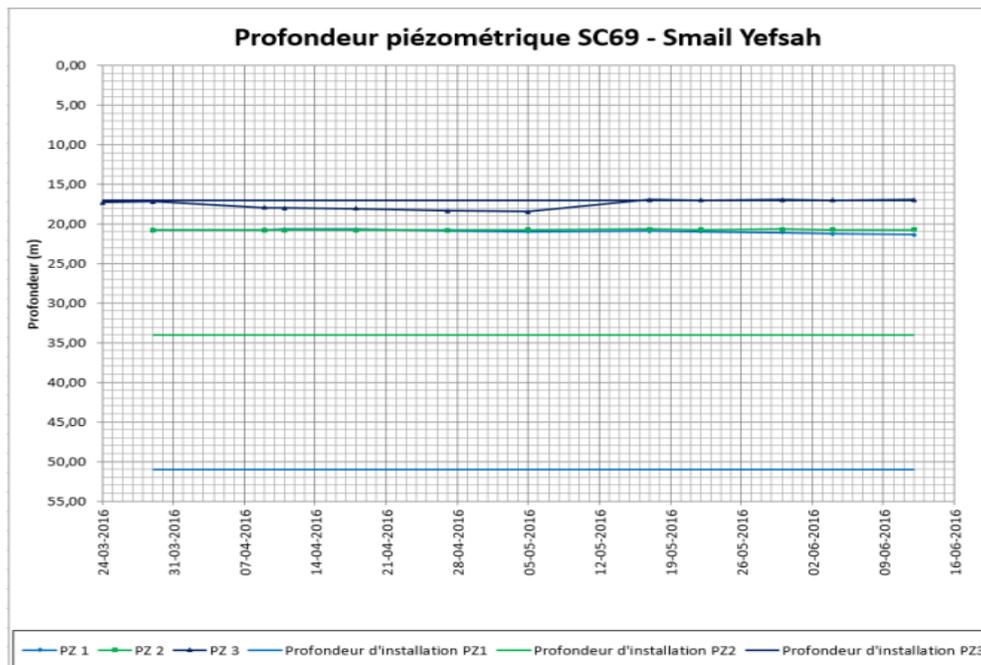


Figure III.3: Lectures des piézomètres à corde vibrante\_SC69.

Après l'analyse des lectures des piézomètres à corde vibrante et à tube ouvert installés à l'endroit de la station Smail Yefsah, le niveau piézométrique a été détecté à 20 m de profondeur.

### **III.2.2. Essais de laboratoire**

Les sondages carottés réalisés nous ont permis de récupérer des échantillons intacts paraffinés, acheminés au laboratoire pour la réalisation des différents essais physiques d'identification, essais mécaniques et essais chimiques.

#### **III.2.2.1 Essais physiques**

##### ***A. Poids volumiques, teneur en eau et degré de saturation***

Les paramètres physiques « poids volumiques secs, poids volumiques humides, poids volumiques des particules solides, teneurs en eau et degrés de saturation » de notre sol sont représentés dans le tableau III-11.

Tableau III-13 : Résultats des limites d'Atterberg.

Sondage N°	Profondeur (m)	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>P</sub> (%)	I <sub>p</sub> (%)	I <sub>c</sub> (%)	Classification des sols (XP P94-011)
S33-1	1.60 – 2.00	56	15	41	0.87	Sol très plastique
	22.20 – 22.70	45	15	30	0.76	Sol plastique
S34	1.70 – 2.00	63	21	42	0.83	Sol très plastique
	5.60 – 6.00	66	21	45	1.06	Sol très plastique
SC66	5.00 – 5.50	47	29	18	1.63	Sol peu plastique
	44.27 – 44.79	52	26	26	1.11	Sol plastique
	46.10 – 46.50	35	25	10	1.58	Sol non plastique
SC68	12.35 – 12.62	31	22	9	2.13	Sol non plastique
	46.52 – 47.03	46	21	25	1.27	Sol plastique
	50.06 – 50.50	39	20	19	0.82	Sol peu plastique
SC69	5.30 – 5.70	55	36	19	0.83	Sol peu plastique
	10.00 – 10.36	58	35	23	1.28	Sol plastique
	17.67 – 17.90	25	19	6	1.75	Sol non plastique
	48.84 – 49.23	47	22	25	1.08	Sol plastique

- L'indice de consistance I<sub>c</sub> vari de 0.76 à 2.13, cela indique un sol très ferme à dur.

### B. Classification des sols

Dans ce qui suit nous allons faire la classification des sols pour les deux sondage SC68 et SC69. La classification des sols concernant les sondages SC66, S33-1 et S34 est inséré en annexe C.

#### ❖ Sondage SC68

##### - Echantillon 01 : [12.35m– 12.62m]

T(80µm) = 32.27 % < 50 % , R (80µm) = 67.73 % > 50 % , donc le sol est un sol grenu.

T(2mm) = 100% > 50 % donc le sol est un sable.

% d'éléments  $< 80\mu\text{m}$  = (32.27 %) est plus de 12%, Soit un sable limoneux ou un sable argileux.

$$\left. \begin{array}{l} WL = 31 (\%) \\ WP = 22 (\%) \\ Ip = 9 (\%) \end{array} \right\} \text{D'après l'abaque de Casagrande, le sol est un sable argileux (SA).}$$

**- Echantillon 02 : [46.52m – 47.03m]**

$T(80 \mu\text{m}) = 99.02 \% > 50 \%$  ,  $R(80\mu\text{m}) = 0.98\% < 50\%$  , donc le sol est un sol fin.

$$\left. \begin{array}{l} WL = 46 (\%) \\ WP = 21 (\%) \\ Ip = 25 (\%) \end{array} \right\} \text{D'après l'abaque de Casagrande, le sol est une argile peu plastique (Ap).}$$

**- Echantillon 03 : [50.06m – 50.50m]**

$T(80 \mu\text{m}) = 94.62 \% > 50 \%$  ,  $R(80\mu\text{m}) = 5.38\% < 50\%$  , donc le sol est un sol fin.

$$\left. \begin{array}{l} WL = 39 (\%) \\ WP = 20 (\%) \\ Ip = 19 (\%) \end{array} \right\} \text{D'après l'abaque de Casagrande, le sol est une argile peu plastique (Ap).}$$

**❖ Sondage SC 69**

**- Echantillon 01 : [05.30m– 05.70m]**

$T(80 \mu\text{m}) = 86.67 \% > 50 \%$  ,  $R(80\mu\text{m}) = 13.33\% < 50\%$  , donc le sol est un sol fin.

$$\left. \begin{array}{l} WL = 55 (\%) \\ WP = 36 (\%) \\ Ip = 19 (\%) \end{array} \right\} \text{D'après l'abaque de Casagrande, le sol est un limon très plastique(Lt).}$$

**- Echantillon 02 : [10.00m – 10.36m]**

$T(80 \mu\text{m}) = 95.03 \% > 50 \%$  ,  $R(80\mu\text{m}) = 4.97\% < 50\%$  , donc le sol est un sol fin.

$$\left. \begin{array}{l} WL = 58 (\%) \\ WP = 35 (\%) \\ Ip = 23 (\%) \end{array} \right\} \text{D'après l'abaque de Casagrande, le sol est un limon très plastique (Lt).}$$

**- Echantillon 03 : [17.67m – 17.90m]**

$T(80\mu\text{m}) = 43.32\% < 50\%$  ,  $R(80\mu\text{m}) = 56.68\% > 50\%$  ,donc le sol est un sol grenu.

$T(2\text{mm}) = 98.93\% > 50\%$  donc le sol est un sable.

% d'éléments  $< 80\mu\text{m} = (43.32\%)$  est plus de 12%, Soit un sable limoneux ou un sable argileux.

$$\left. \begin{array}{l} WL = 28 (\%) \\ WP = 19 (\%) \\ Ip = 9 (\%) \end{array} \right\} \text{D'après l'abaque de Casagrande, le sol est un sable argileux (SA).}$$

**- Echantillon 04: [48.84m– 49.23m]**

$T(80 \mu\text{m}) = 97.45\% > 50\%$  , $R(80\mu\text{m}) = 2.55\% < 50\%$  , donc le sol est un sol fin.

$$\left. \begin{array}{l} WL = 47 (\%) \\ WP = 22 (\%) \\ Ip = 25 (\%) \end{array} \right\} \text{D'après l'abaque de Casagrande, le sol est une argile peuplastique(Ap).}$$

**III.2.2.2. Essais mécaniques**

L'essai de cisaillement UU a donné les caractéristiques mécaniques insérées dans le tableau III-14. Les résultats des essais de cisaillement sont insérés en annexe D.

**Tableau 0III-11 :Résultats de l'essai de cisaillement à la boite.**

Sondage	Profondeur (m)	Cisaillement à la boite	
		Cu (Pa)	$\phi_u$ (°)
S33-1	1.60 – 2.00	57	26
	22.20 – 22.70	127	19
SC34	1.70 – 2.00	116	7
	5.60 – 6.00	192	17

**III.2.2.3. Essais chimiques**

Dans le but de se prononcer sur l'agressivité ou non du sol, une analyse chimique a été réalisée sur deux (02) échantillons de sol extraient du site dont les résultats sont donnés au tableau III-15.

Tableau III-12 : Résultats des analyses chimiques.

Sondage N°	Profondeur (m)	Chlorure Cl <sup>-</sup> (%)	Matière Organique (%)	Carbonates CaCO <sub>3</sub> (%)
SC68	12.35-12.62	0.42	3.32	2.15
SC69	48.84 – 49.23	0.42	5.85	21.00

- La teneur en carbonates dans le sondage SC68 est de (0%-10%), reflète que l'échantillon est une argile et la teneur en carbonates dans le sondage SC69 est de (10% -30%), reflète que l'échantillon est d'argile marneuse.
- Les chlorures dépassent le seuil maximal admis pour l'attaque des aciers fixé à 100 ppm, dans le cas d'implantation d'ouvrages armés au droit de ces sondages et aux profondeurs indiquées, il est nécessaire d'opter pour un béton très compact en adoptant en plus un enrobage suffisant de manière à protéger judicieusement les armatures.
- Le teneur en matières organique (3% - 10) montre que le sol est faiblement organique pour les deux échantillons.

### III.3. Etude d'homogénéité

Pour la détermination des caractéristiques physiques et mécaniques des différentes couches, nous avons utilisé les deux sondages carottés SC68 et SC69.

**-Limon très plastique [ 1.9m- 9.6m ]****❖ Poids volumique sec  $\gamma_d$** 

$$\gamma_{d\text{moyen}} = \frac{\sum \gamma_d}{n} \quad (\text{III.1})$$

$$\gamma_{d\text{moyen}} = \frac{14+15}{2} \rightarrow \gamma_{d\text{moyen}} = 14.5 \text{ kN/m}^3$$

$$\lambda_{\gamma_d} = \sqrt{\frac{(\gamma_d - \gamma_{d\text{moyen}})^2}{n-1}} \quad (\text{III.2})$$

$$\lambda_{\gamma_d} = \sqrt{\frac{(14-14.5)^2 + (15-14.5)^2}{2-1}} \rightarrow \lambda_{\gamma_d} = 0.707$$

$$\text{COV} = \frac{\lambda_{\gamma_d}}{\gamma_d} \quad (\text{III.3})$$

$$\text{COV} = \frac{0.707}{14.5} = 4.87\% < 10\%$$

On prend la valeur moyenne  $\rightarrow \gamma_d = 14.5 \text{ kN/m}^3$

**❖ Tenure en eau  $w$** 

$$W_{\text{moyen}} = \frac{\sum w}{n} \quad (\text{III.4})$$

$$W_{\text{moy}} = \frac{38.9+28.4}{2} \rightarrow W_{\text{moy}} = 33.65 \%$$

$$\lambda_w = \sqrt{\frac{(W - W_{\text{moyen}})^2}{n-1}} \quad (\text{III.5})$$

$$\lambda_w = \sqrt{\frac{(38.9-33.65)^2 + (28.4-33.65)^2}{2-1}} \rightarrow \lambda_w = 7.425$$

$$\text{COV} = \frac{\lambda_w}{W_{\text{moyen}}} \quad (\text{III.6})$$

$$\text{COV} = \frac{7.425}{33.65} = 22.06\% > 10\%$$

On prend la valeur minimale  $\rightarrow W = 28.4 \%$

❖ Poids volumique humide  $\gamma_h$ 

$$\gamma_h = \gamma_d (1+W) \quad (\text{III.7})$$

$$\gamma_h = 14.5 \left( 1 + \frac{28.4}{100} \right) \rightarrow \gamma_h = 18.62 \text{ kN/m}^3$$

❖ Poids volumique saturé  $\gamma_{sat}$ 

$$\gamma_{sat} = \gamma_d \left( 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right) + \gamma_w \quad (\text{III.8})$$

$$\gamma_{smoy} = 26.25 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{sat} = 14.5 \left( 1 - \frac{10}{26.25} \right) + 10 \rightarrow \gamma_{sat} = 19 \text{ kN/m}^3$$

**-Sable argileux [ 9.6m – 46.1m]**❖ Poids volumique sec  $\gamma_d$ 

$$\gamma_{dmoy} = \frac{\sum \gamma_d}{n} \quad (\text{III.9})$$

$$\gamma_{dmoy} = \frac{18.1+19.4}{2} \rightarrow \gamma_{dmoy} = 18.75 \text{ kN/m}^3$$

$$\lambda\gamma_d = \sqrt{\frac{(\gamma_d - \gamma_{dmoy})^2}{n-1}} \quad (\text{III.10})$$

$$\lambda\gamma_d = \sqrt{\frac{(18.1-18.75)^2 + (19.4-18.75)^2}{2-1}} \rightarrow \lambda\gamma_d = 0.919$$

$$\text{cov} = \frac{\lambda\gamma_d}{\gamma_{dmoy}} \quad (\text{III.11})$$

$$\text{cov} = \frac{0.919}{18.75} = 4.9\% < 10\%$$

On prend la valeur moyenne  $\rightarrow \gamma_d = 18.75 \text{ kN/m}^3$

❖ Poids volumique humide  $\gamma_h$

$$\gamma_{dmoy} = \frac{\sum \gamma_d}{n} \quad (III.12)$$

$$\gamma_{hmoy} = \frac{20.4+22.2}{2} \rightarrow \gamma_{hmoy} = 21.3 \text{ kN/m}^3$$

$$\lambda \gamma_h = \sqrt{\frac{(\gamma_d - \gamma_{dmoy})^2}{n-1}} \quad (III.13)$$

$$\lambda \gamma_h = \sqrt{\frac{(20.4-21.3)^2 + (22.2-21.3)^2}{2-1}} \rightarrow \lambda \gamma_h = 1.273$$

$$\text{COV} = \frac{\lambda \gamma_h}{\gamma_{hmoy}} \quad (III.14)$$

$$\text{COV} = \frac{1.273}{21.3} = 5.98\% < 10\%$$

On prend la valeur moyenne  $\rightarrow \gamma_h = 21.3 \text{ kN/m}^3$

❖ **Poids volumique saturé  $\gamma_{sat}$**

$$\gamma_{sat} = \gamma_d \left( 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right) + \gamma_w \quad (III.15)$$

$$\gamma_{sat} = 18.75 \left( 1 - \frac{10}{26.7} \right) + 10 \rightarrow \gamma_{sat} = 21.7 \text{ kN/m}^3$$

❖ **Angle de frottement  $\varphi'$**

Pour le calcul de  $\varphi'$  de la couche de sable, nous avons fait des corrélations entre l'angle de frottement et la résistance d'un sable mesuré au SPT.

D'après Peck, l'angle de frottement effectif est donné par la relation ci-après :

$$\varphi' = 27,1 + 0,3(N_1)_{60} - 0,00054((N_1)_{60})^2 \quad (III.16)$$

- Sondage 68 :

[10m – 10.45m] :  $\varphi' = 34.26^\circ$

[16m – 16.5m] :  $\varphi' = 30.33^\circ$

[32.5m – 32.95m] :  $\varphi' = 33.98^\circ$

- Sondage 69 :

$$[10.5\text{m} - 10.95\text{m}] : \varphi' = 34.26^\circ$$

$$[16.5\text{m} - 16.95\text{m}] : \varphi' = 33.44^\circ$$

$$\varphi'_{\text{moy}} = \frac{\sum \varphi'}{n} \quad (\text{III.17})$$

$$\varphi'_{\text{moy}} = \frac{34.26+30.33+33.98+34.26+33.44}{5} \rightarrow \varphi'_{\text{moy}} = 33.25^\circ$$

$$\lambda_{\varphi'} = \sqrt{\frac{(\varphi' - \varphi'_{\text{moy}})^2}{n-1}} \quad (\text{III.18})$$

$$\lambda_{\varphi'} = \sqrt{\frac{(34.26-33.25)^2 + (30.33-33.25)^2 + (33.98-33.25)^2 + (34.26-33.25)^2 + (33.44-33.25)^2}{5-1}} \rightarrow \lambda_{\varphi'} = 1.668$$

$$\text{COV} = \frac{\lambda_{\varphi'}}{\varphi'_{\text{moy}}} \quad (\text{III.19})$$

$$\text{COV} = \frac{1.668}{33.25} = 0.502 \% < 10\%$$

On prend la valeur moyenne  $\rightarrow \varphi' = 33.25^\circ$

**-Argile marneuse [ 46.1m – 52m ]**

❖ **Poids volumique sec  $\gamma_d$**

$$\gamma_{d\text{moy}} = \frac{\sum \gamma_d}{n} \quad (\text{III.20})$$

$$\gamma_{d\text{moy}} = \frac{15.7+16.4+17.7}{3} \rightarrow \gamma_{d\text{moy}} = 16.6 \text{ kN/m}^3$$

$$\lambda_{\gamma_d} = \sqrt{\frac{(\gamma_d - \gamma_{d\text{moy}})^2}{n-1}} \quad (\text{III.21})$$

$$\lambda_{\gamma_d} = \sqrt{\frac{(15.7-16.6)^2 + (16.4-16.6)^2 + (17.7-16.6)^2}{3-1}} \rightarrow \lambda_{\gamma_d} = 1.015$$

$$\text{COV} = \frac{\lambda_{\gamma_d}}{\gamma_d} \quad (\text{III.22})$$

$$\text{COV} = \frac{1.015}{16.6} = 6.12 \% < 10 \%$$

On prend la valeur moyenne  $\rightarrow \gamma_d = 16.6 \text{ kN/m}^3$

❖ **Teneur en eau w**

$$W_{\text{moyn}} = \frac{\sum w}{n} \quad (\text{III.23})$$

$$W_{\text{moyn}} = \frac{27.6+22.9+19.8}{3} \rightarrow W_{\text{moyn}} = 23.43 \%$$

$$\lambda_w = \sqrt{\frac{(W - W_{\text{moyn}})^2}{n-1}} \quad (\text{III.24})$$

$$\lambda_w = \sqrt{\frac{(27.6-23.43)^2 + (22.9-23.43)^2 + (19.8-23.43)^2}{3-1}} \rightarrow \lambda_w = 3.969$$

$$\text{COV} = \frac{\lambda_w}{w} \quad (\text{III.25})$$

$$\text{COV} = \frac{3.969}{23.43} = 16.94 \% > 10 \%$$

On prend la valeur minimale  $\rightarrow W = 19.8 \%$

❖ **Poids volumique humide  $\gamma_h$**

$$\gamma_h = \gamma_d (1 + w) \quad (\text{III.26})$$

$$\gamma_h = 16.6 \left( 1 + \frac{19.8}{100} \right) \rightarrow \gamma_h = 19.9 \text{ kN/m}^3$$

❖ **Poids volumique saturé  $\gamma_{\text{sat}}$**

$$\gamma_{\text{sat}} = \gamma_d \left( 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right) + 10 \quad (\text{III.27})$$

$$\gamma_{\text{smoy}} = 26.4 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{sat}} = 16.6 \left( 1 - \frac{10}{26.4} \right) + 10 \rightarrow \gamma_{\text{sat}} = 20.3 \text{ kN/m}^3$$

### III.4. Modèle de sol

Le modèle lithologique du sol a été élaboré en considérant les deux sondages carottés SC68 et SC69. Les paramètres géotechniques retenus sont présentés dans le tableau III-16.

**Tableau III-13 : Paramètres physiques et mécaniques du sol.**

Couche de sol	Remblai	Limon très plastique	Sable argileux	Argile marneuse
Profondeurs (m)	0.00 – 01.90	01.90 – 09.60	09.60 -46.10	46.10 – 52.00
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	16	14.5	18.75	16.6
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	19	21.7	20.3
$\phi'$ (°)	15	23	33.25	22
C' (kPa)	10	30	10	56

### III.5. Conclusion

Nous avons présenté à travers ce troisième chapitre les résultats de la reconnaissance géotechnique effectué dans le cadre de ce projet. l'exploitation et l'interprétation de ces données nous ont permis d'établir une coupe lithologique du sous sol du site du projet avec une caractérisation moyenne des paramètres physiques et mécaniques de chaque couche identifiée. En conclusion de cette analyse géotechnique, la lithologie représentative retenue est :

- [0.00m à 1.90m] : Remblai.
- [1.90m à 9.60m] : Limon très plastique.
- [9.60m à 46.10m] : Sable argileux.
- [46.10m à 52.00m] : Argile marneuse.

La nappe phréatique se situe à une profondeur de 20m.

# **CHAPITRE IV : MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU SOUTÈNEMENT DE LA STATION**

## **IV.1. Introduction**

Ce chapitre concerne la modélisation de la paroi de soutènement provisoire prévue pour la réalisation de la station de métro Smail Yefsah de Bab-Ezzouar, il s'agit d'une excavation de 30 m de profondeur, d'une assiette de 127 m de longueur et de 26 m de largeur.

Deux variantes de solutions sont étudiées : la paroi en pieux sécants et la paroi moulée. Le recours à l'emploi de système de butonnage est motivé par notre souci économique visant la limitation de la fiche de l'ouvrage.

Pour les calculs, le logiciel Plaxis a été utilisé, il s'agit d'un programme de calcul par méthode d'éléments finis en 2D, spécialement conçu pour effectuer des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechnique. Pour chaque solution, les déformations ont été calculées (les déplacements horizontaux, verticaux et totaux) suivi par la vérification de la stabilité globale vis-à-vis du glissement.

## **IV.2. Description du code Plaxis 8.6**

Plaxis est un logiciel d'éléments finis de références en géotechnique, c'est un outil puissant et simple conçu pour créer un modèle 2D et pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents ouvrages géotechniques. Ses applications sont nombreuses et couvrent les projets d'excavation, remblais et barrages, des fondations, des tunnels.

L'algorithme général du code Plaxis consiste à résoudre un système d'équation algébrique non linéaire selon un processus pour déterminer les valeurs de déplacements aux différents nœuds du maillage, le champ de contraintes et les états de rupture de sol. L'interface d'utilisation de Plaxis se compose de quatre sous-programmes qui sont :

### **IV.2.1. Programme d'entrée des données (Input)**

Ce programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales. La génération des conditions initiales est faite dans un menu spécifique du programme Input (mode conditions initiales). La description se concentre tout d'abord sur la création d'un modèle géométrique et d'un maillage d'éléments finis (mode de création géométrique).

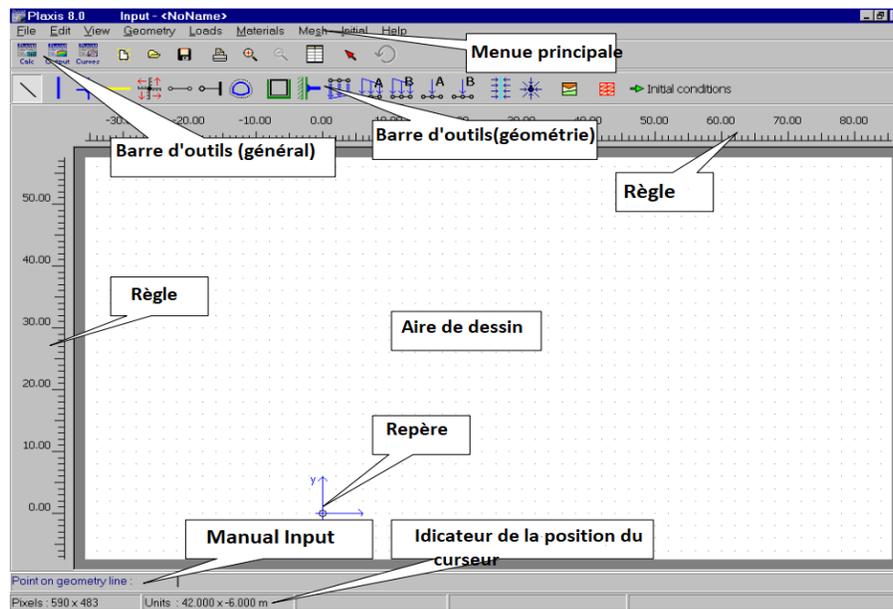


Figure IV.1: Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input).

#### IV.2.2. Programme de calcul (Calculation)

Celui-ci contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis. Au début du programme de calcul, l'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs vont être définis.

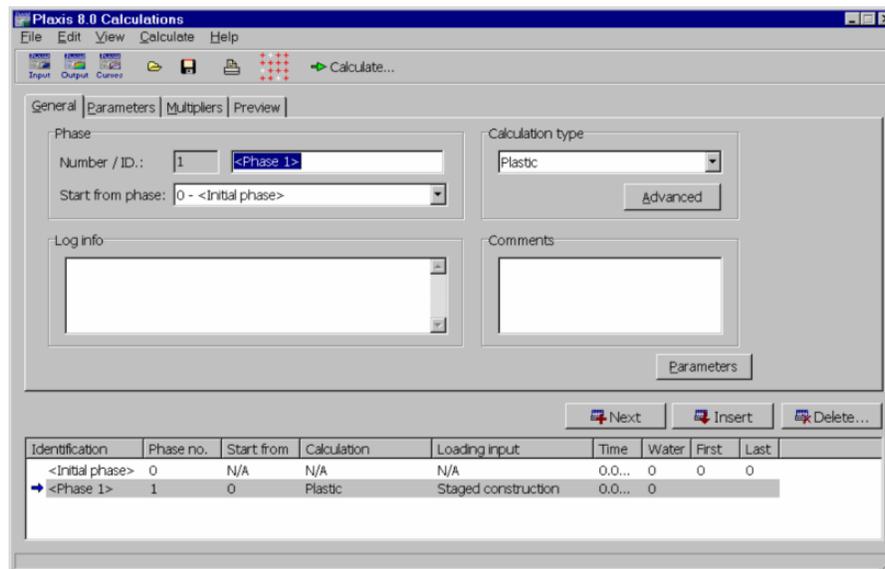


Figure IV.2: Fenêtre principale du programme de calcul.

### IV.2.3. Le programme de résultats (Output)

Celui-ci contient tous les éléments qui permettent de visualiser les résultats des calculs aux éléments finis. Au lancement du programme de résultats, l'utilisateur doit choisir le modèle et la phase de calcul approprié ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés. Après cette sélection, une première fenêtre de résultats est ouverte ; celle-ci affiche le maillage déformé.



Figure IV.3: Barre d'outils de la fenêtre principale du programme (Output).

### IV.2.4. Programme courbes (Curves)

Ce programme contient toutes les options nécessaires pour générer des courbes, charge-déplacement, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.



Figure IV.4: Barre d'outils de la fenêtre principale du programme (Curves).

## IV.3. Le modèle de comportement intégré dans Plaxis (MCM)

Le modèle de Mohr-Coulomb, ou modèle élasto-plastique est un modèle de sol qui inclut cinq paramètres caractéristiques du sol,

- Le module de Young  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$ .
- L'angle de frottement interne  $\phi$  et la cohésion  $C$ ,
- Paramètre de dilatance de sol  $\psi$ .

Le modèle de Mohr-Coulomb est considéré comme un modèle de première approximation du comportement du sol, il est recommandé pour les analyses primaires des problèmes géotechniques.

## IV.4. Caractéristiques géométriques et géotechniques

### IV.4.1. Coupe géotechnique du modèle

- La coupe géotechnique retenue pour le calcul est décrite comme suit :
  - [00.00m – 01.90m] : Remblai;
  - [01.90m – 09.60m] : Limon très plastique;
  - [09.60m – 46.10m] : Sable argileux ;
  - [46.10m – 52.00m] : Argile marneuse.

-La nappe phréatique se situe à une profondeur de 20m ;

-La surcharge (q) prise dans les calculs est de 55.6 kPa, elle correspond à la charge d'engins au cours de la réalisation du projet.

### IV.4.2. Caractéristiques physiques, mécaniques et élastiques des sols

Les caractéristiques physiques, mécaniques et élastiques des sols introduits dans le logiciel Plaxis2D sont présentées dans le tableau IV-1.

**Tableau IV-1** : Caractéristiques physiques, mécaniques et élastiques des sols.

Caractéristiques	Les couches de sols			
	Remblai	Limon très plastique	Sable argileux	Argile marneuse
Type	Drainé	Non-drainé	Drainé	Non-drainé
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	19	21,7	20,3
$\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16	18,62	18,75	19,9
C' (kN/m <sup>2</sup> )	10	30	10	56
$\phi$ (°)	15	23	33,25	22
$\Psi$ (°)	0	0	3,25	0
$\nu$	0,35	0,33	0,3	0,33
E <sub>ref</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	5.10 <sup>3</sup>	26.10 <sup>3</sup>	50.10 <sup>3</sup>	68.10 <sup>3</sup>
G <sub>ref</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	1,851.10 <sup>3</sup>	9,774.10 <sup>3</sup>	1,923.10 <sup>4</sup>	2,556.10 <sup>4</sup>
E <sub>oed</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	8,025.10 <sup>3</sup>	3,852.10 <sup>4</sup>	6,732.10 <sup>4</sup>	1,008.10 <sup>5</sup>

**IV.4.3. Caractéristiques des pieux**

Le rideau est modélisé dans le logiciel Plaxis2D comme élément type « plate », ces éléments structuraux présentent un comportement linéaire élastique. Le soutènement des parois de l'excavation est assuré par l'utilisation d'une paroi en pieux dont le diamètre est de 1.2m. Les caractéristiques des pieux sécants introduits dans le logiciel Plaxis2D sont présentées dans le tableau IV-2.

**Tableau 0IV-2 : Propriétés des pieux.**

<b>Paramètres</b>	<b>Nom</b>	<b>Valeur</b>
<b>Type de comportement</b>	Materials type	Élastique
<b>Rigidité normale (kN/m)</b>	EA	$3,617.10^7$
<b>Rigidité de flexion (kNm<sup>2</sup>/m)</b>	EI	$3,256.10^6$
<b>Épaisseur équivalente(m)</b>	déq	1,039
<b>Poids (kN/m/m)</b>	W	28,26
<b>Coefficient de Poisson</b>	v	0.20

**IV.4.4. Caractéristiques des parois moulées**

Le rideau est modélisé dans le logiciel Plaxis2D comme élément type « plate », ces éléments structuraux présentent un comportement linéaire élastique. Le soutènement des parois de l'excavation est assuré par l'utilisation d'une paroi moulée dont l'épaisseur est de 1.2m. Les caractéristiques des parois moulées introduits dans le logiciel Plaxis2D sont présentées dans le tableau IV-3.

**Tableau 0IV-3 : Propriétés de paroi moulée.**

<b>Paramètres</b>	<b>Nom</b>	<b>Valeur</b>
<b>Type de comportement</b>	Materials type	Élastique
<b>Rigidité normale (kN/m)</b>	EA	$38,4.10^6$
<b>Rigidité de flexion (kNm<sup>2</sup>/m)</b>	EI	$4,61.10^6$
<b>Épaisseur équivalente (m)</b>	déq	1,2
<b>Poids (kN/m/m)</b>	W	30
<b>Coefficient de Poisson</b>	$\nu$	0.20

#### **IV.4.5. Caractéristiques des butons**

Le tableau IV-4 donne les caractéristiques des butons introduits dans le logiciel Plaxis 2D :

**Tableau IV-4 : Propriétés des butons.**

<b>Paramètres</b>	<b>Nom</b>	<b>Valeur</b>
<b>Type de comportement</b>	Materials type	Élastique
<b>Rigidité normale (kN/m)</b>	EA	$10,7.10^6$
<b>Espacement (m)</b>	$L_{\text{espacement}}$	6

### **IV.5. Modélisation du soutènement de la station par le logiciel Plaxis2D**

#### **IV.5.1. Paroi en pieux sécants avec butons**

##### **IV.5.1.1. Modèle choisi**

Le modèle de la structure de la paroi en pieux avec butons sous le logiciel Plaxis est représenté dans la figure IV.5.

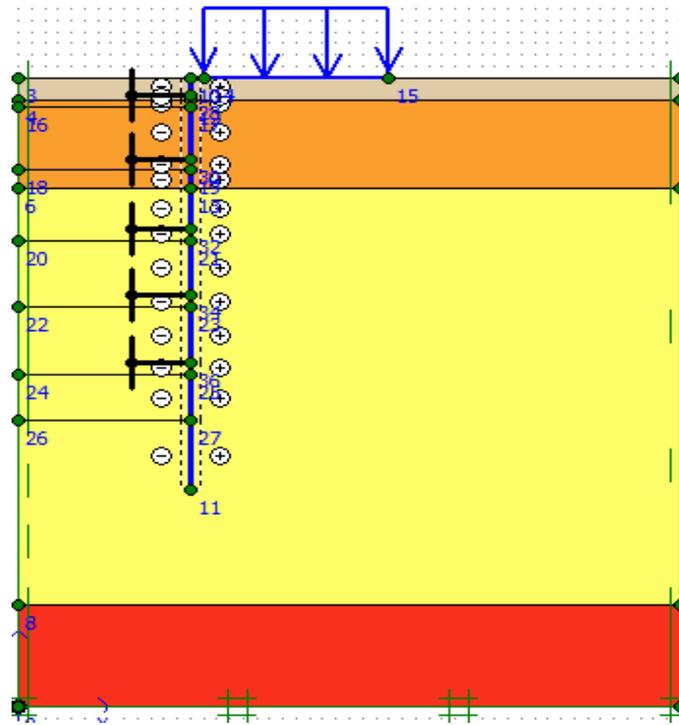


Figure IV.5: Géométrie du modèle de la paroi en pieux sécants avec butons.

❖ Génération du maillage

Le modèle se fait par des éléments à 6 nœuds. Le nombre d'éléments est de 1105 éléments et le nombre des nœuds est de 2696 nœuds, 3315 points de contraintes et la taille moyenne d'élément est égale à  $1.58 \times 10^0$  m. Le calcul s'effectue en déformation plane.

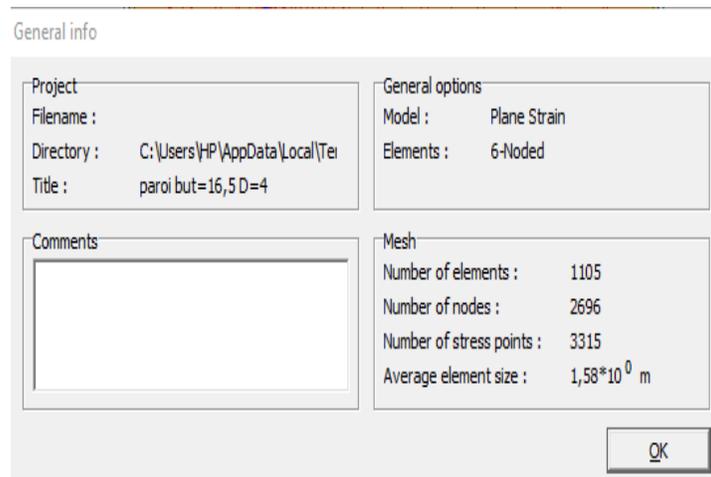
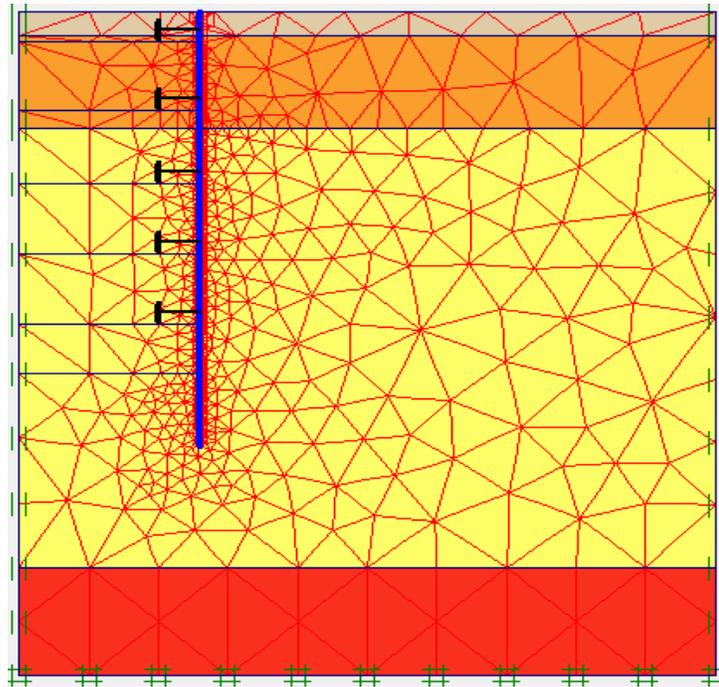


Figure IV.6: Nombres d'éléments et de nœuds.

On règle la finesse du maillage sur « Medium », le résultat est donné par la figure IV.7.



**Figure IV.7:** Maillage de la paroi en pieux avec butons sous Plaxis

❖ **Conditions initiales**

Les conditions initiales nécessitent la génération des pressions interstitielles initiales ainsi que les contraintes initiales.

**1. Conditions hydrauliques**

Le niveau de la nappe phréatique initial est à 20 m par rapport au terrain naturel. La position de la nappe phréatique est indiquée sur la figure IV.8.

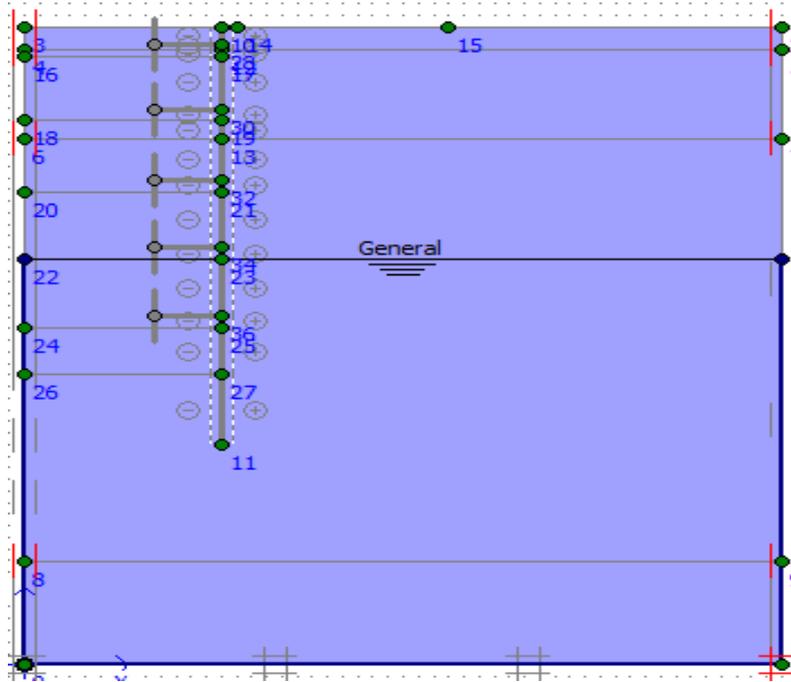


Figure IV.8: Conditions hydrauliques initiales.

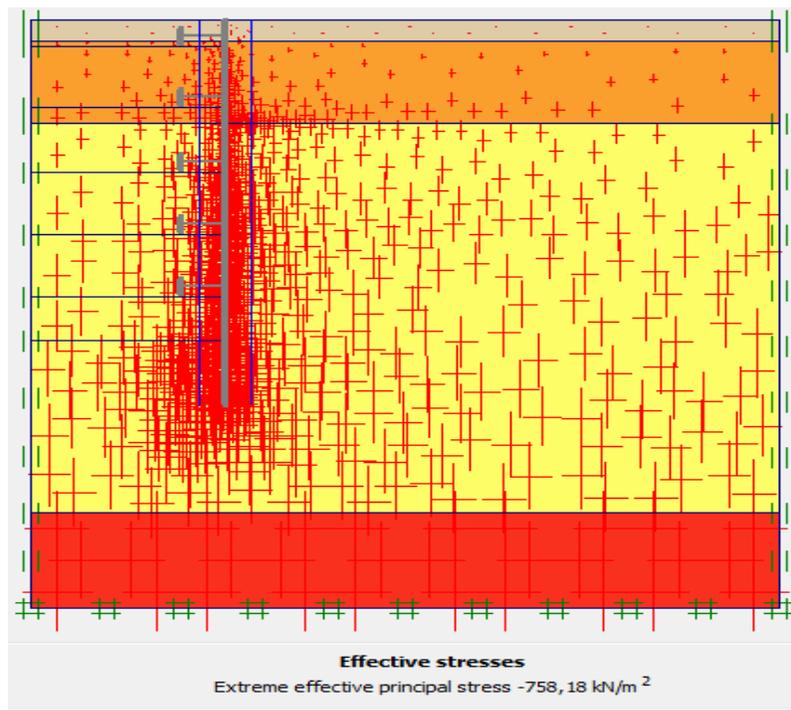
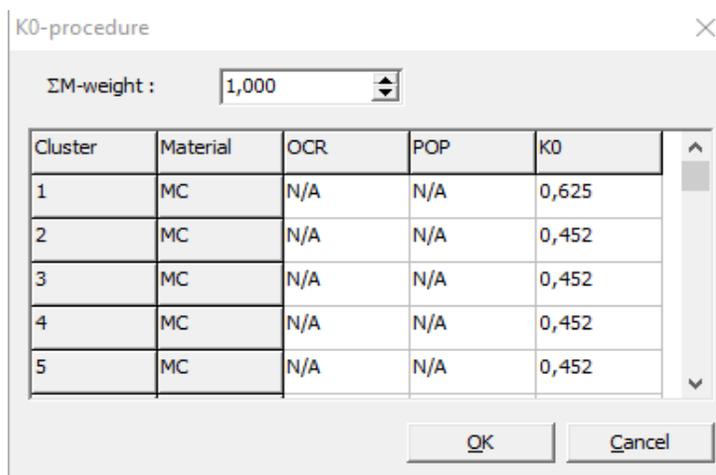


Figure IV.9: Pressions interstitielles.

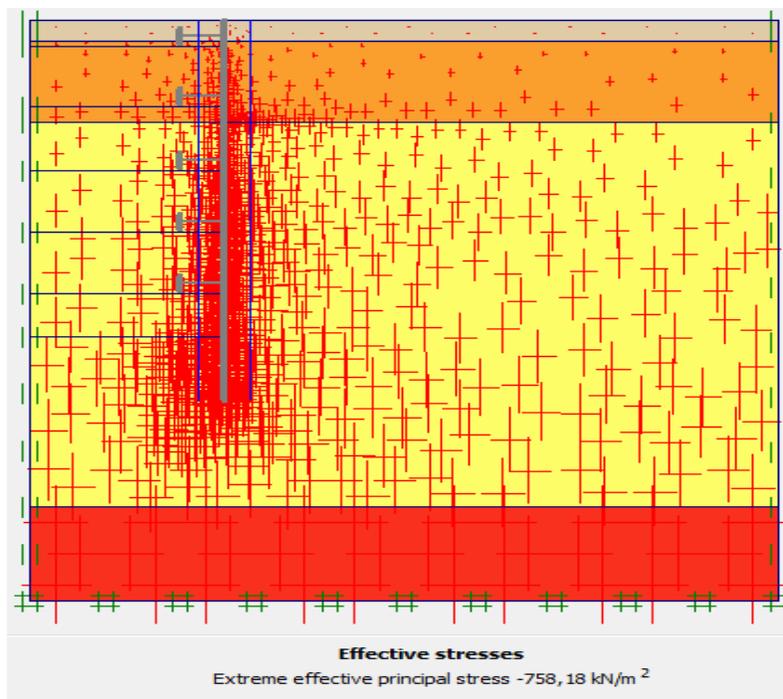
## 2. Contraintes initiales

Pour le calcul des contraintes initiales, il faut désactiver les éléments de sol créés par défaut. On génère alors les contraintes initiales en prenant les valeurs de  $K_0$  par défaut. La valeur de  $K_0$  est proposée automatiquement d'après la formule de Jaky,  $K_0=1$ , voir figure IV.10.



Cluster	Material	OCR	POP	K0
1	MC	N/A	N/A	0,625
2	MC	N/A	N/A	0,452
3	MC	N/A	N/A	0,452
4	MC	N/A	N/A	0,452
5	MC	N/A	N/A	0,452

**Figure IV.10:** Valeurs de  $K_0$ .



**Figure IV.11:** Contraintes effectives.

### **❖ Procédure de calcul**

Le calcul du modèle se fait en 07 phases dans l'ordre, passant par 06 phases d'excavations :

- **Phase 00** : Initiation des contraintes (procédure  $K_0$ ) ; on détermine les contraintes effectives initiales.
- **Phase 01** : Excavation de la 1<sup>ère</sup> partie jusqu'à la cote  $Y = - 02,50$  m avec la mise en place du 1<sup>er</sup> buton.
- **Phase 02** : Excavation de la 2<sup>ème</sup> partie jusqu'à la cote  $Y = - 08,10$  m avec la mise en place du 2<sup>ème</sup> buton.
- **Phase 03** : Excavation de la 3<sup>ème</sup> partie jusqu'à la cote  $Y = - 14,20$  m avec la mise en place du 3<sup>ème</sup> buton.
- **Phase 04** : Excavation de la 4<sup>ème</sup> partie jusqu'à la cote  $Y = - 20,02$  m avec la mise en place du 4<sup>ème</sup> buton.
- **Phase 05** : Excavation de la 5<sup>ème</sup> partie jusqu'à la cote  $Y = - 25,92$  m avec la mise en place du 5<sup>ème</sup> buton.
- **Phase 06** : Excavation de la 6<sup>ème</sup> partie jusqu'à la cote  $Y = - 30$  m.

#### **IV.5.1.2. Résultats de déplacements pour les différentes phases d'excavation**

- **Phase N° 01**

L'excavation s'effectue jusqu'à une profondeur égale à 2,50 m avec la mise en place du 1<sup>er</sup> buton. La modélisation est représentée par la figure IV.12.

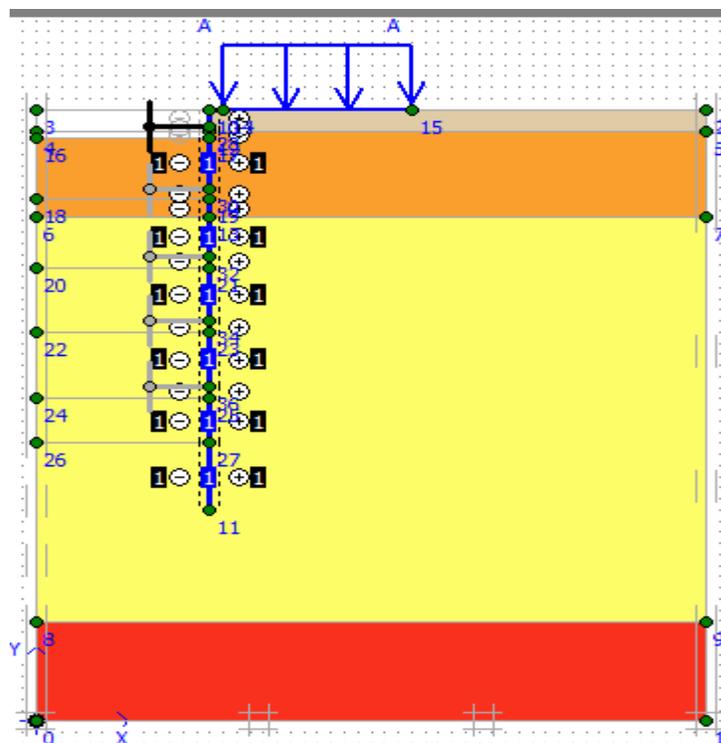


Figure IV.12: Modélisation de la 1<sup>ère</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.

#### ✓ Déplacements

La figure IV.13 représente le schéma de la déformée de la structure (pieux avec butons) donné par le logiciel Plaxis, les déplacements enregistrés sont comme suit :

- Les déplacements horizontaux  $12,8 \times 10^{-3}$  m.
- Les déplacements verticaux  $-36,53 \times 10^{-3}$  m.
- Le déplacement total égal à  $36,93 \times 10^{-3}$  m.

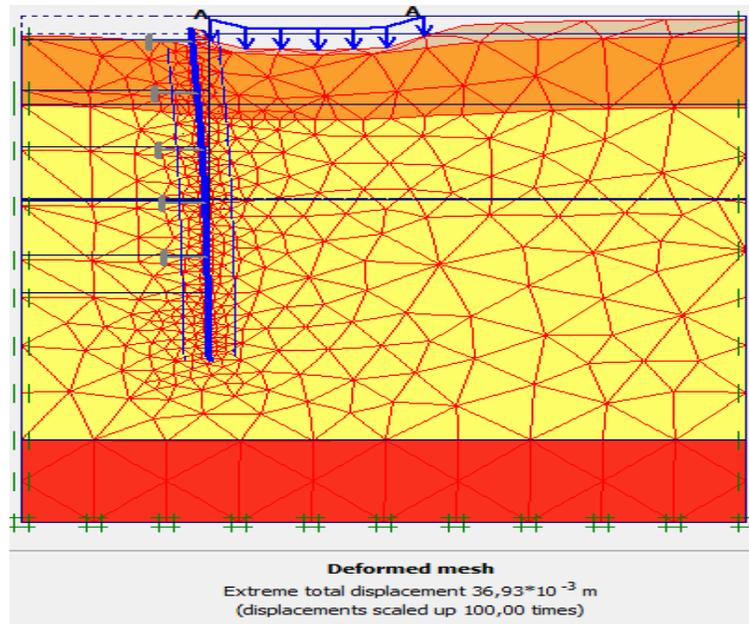


Figure IV.13: Modélisation de la 1<sup>ère</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.

✓ Déplacements horizontaux

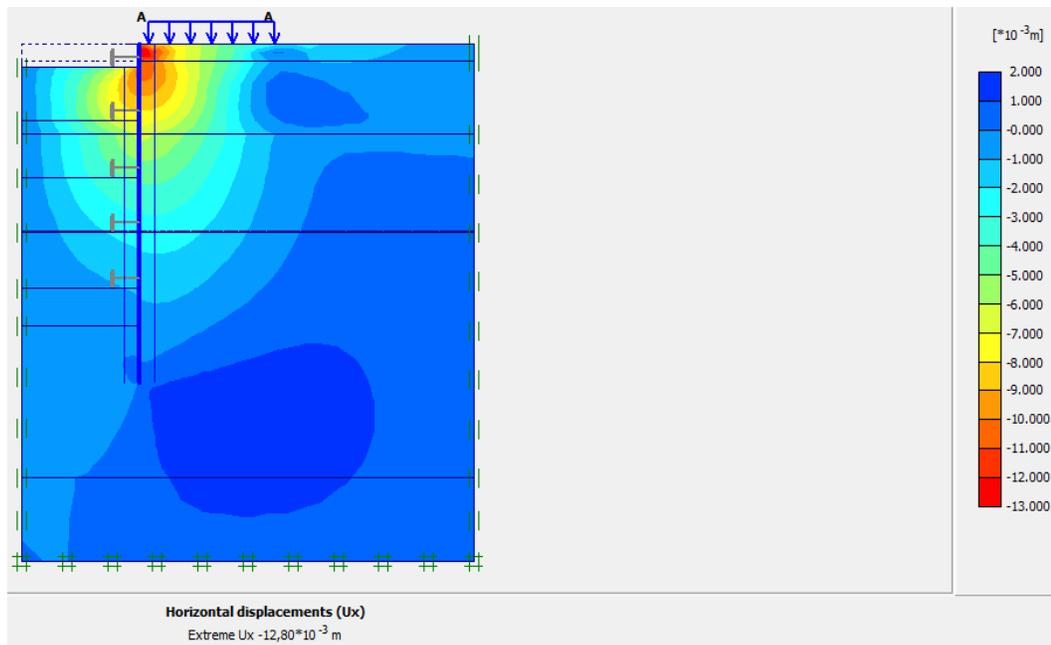


Figure IV.14: Déplacements horizontaux (phase 01).

✓ Déplacements verticaux

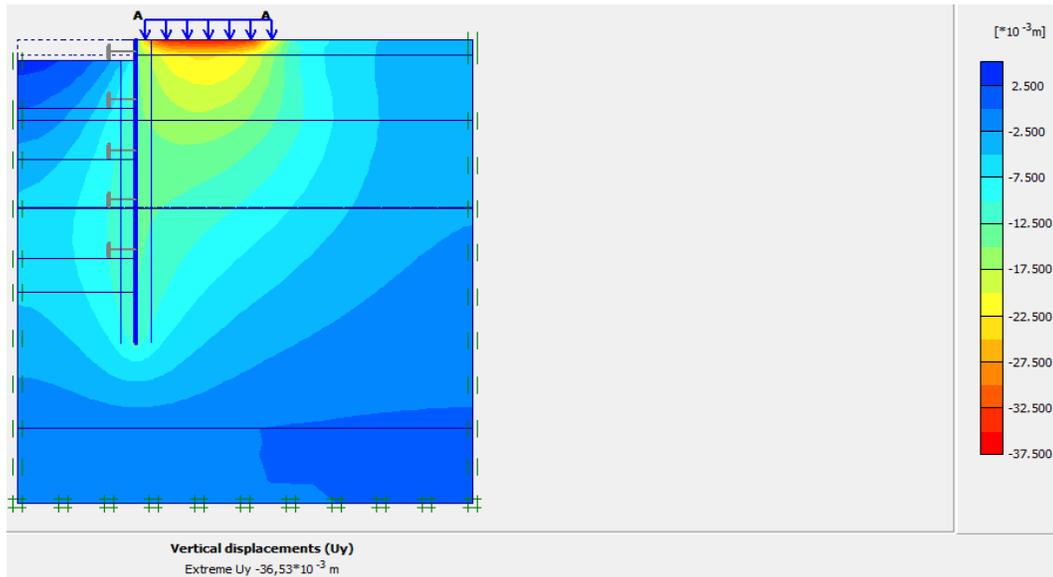


Figure IV.15: Déplacements verticaux (phase 01).

✓ Déplacement total

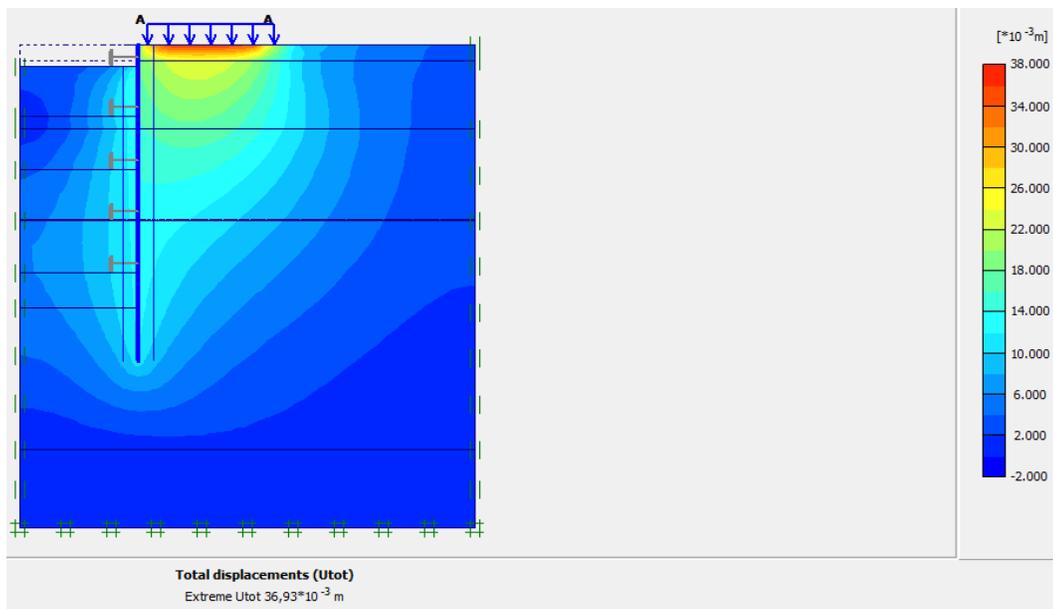
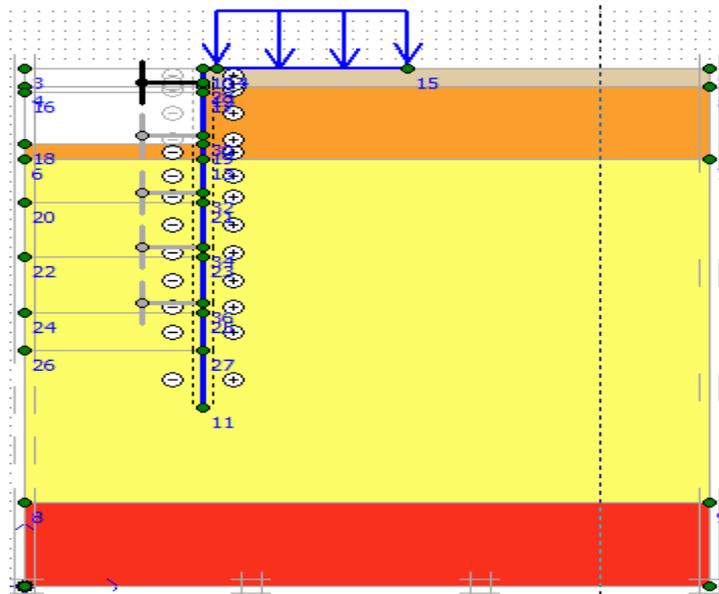


Figure IV.16: Déplacement total (phase 01).

- **Phase N° 02**

L'excavation s'effectue jusqu'à une profondeur égale à 8,10 m avec la mise en place du 2<sup>ème</sup> buton. La modélisation est représentée par la figure IV.17.



**Figure IV.17:** Modélisation de la 2<sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.

- ✓ **Déplacements**

La figure IV.18 représente le schéma de la déformée de la structure (pieux avec butons) donné par le logiciel Plaxis, les déplacements enregistrés sont comme suit :

- Les déplacements horizontaux  $13,87 \times 10^{-3}$  m.
- Les déplacements verticaux  $47,39 \times 10^{-3}$  m.
- Le déplacement total égal à  $47,39 \times 10^{-3}$  m.

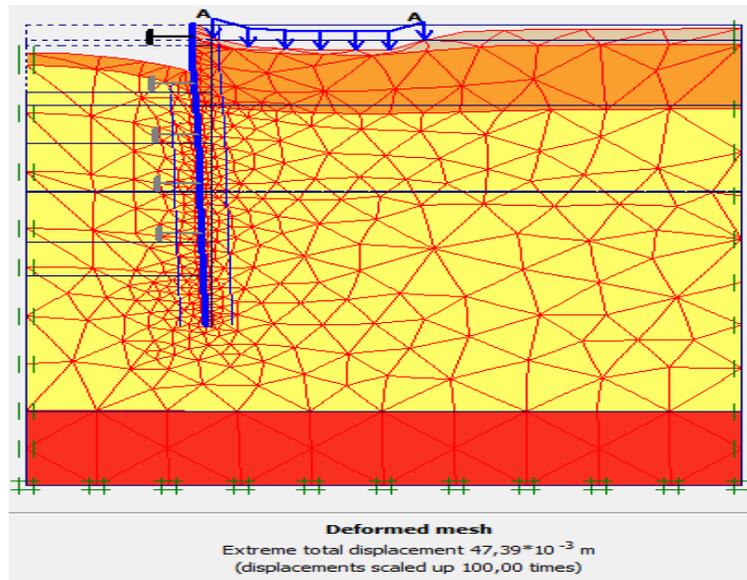


Figure IV.18: Résultats de déformations de la 2<sup>ème</sup> phase.

✓ Déplacements horizontaux

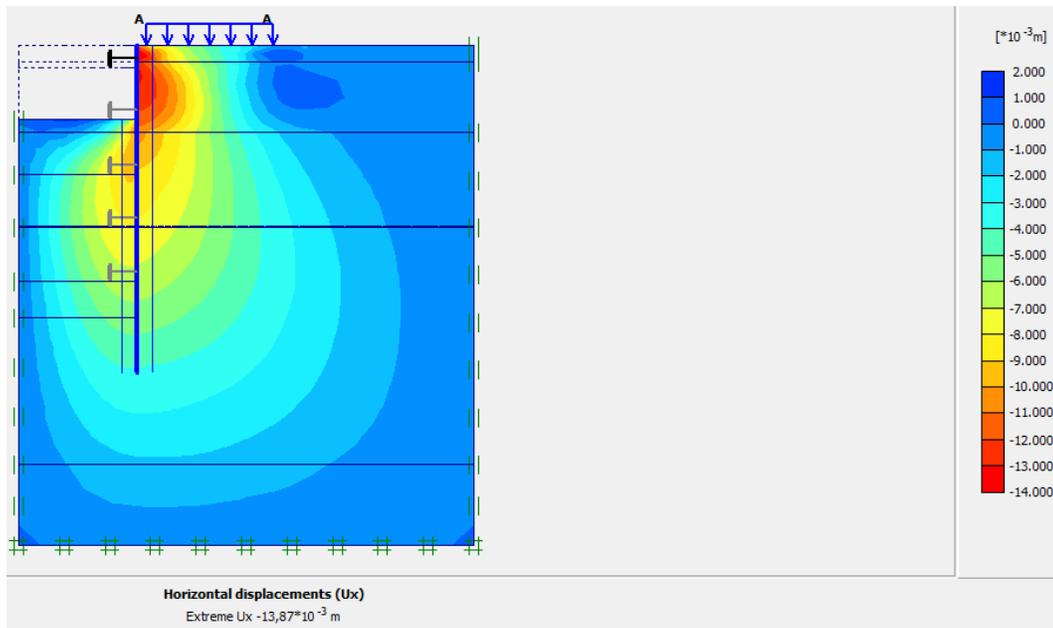


Figure IV.19: Déplacements horizontaux (phase 02).

✓ Déplacements verticaux

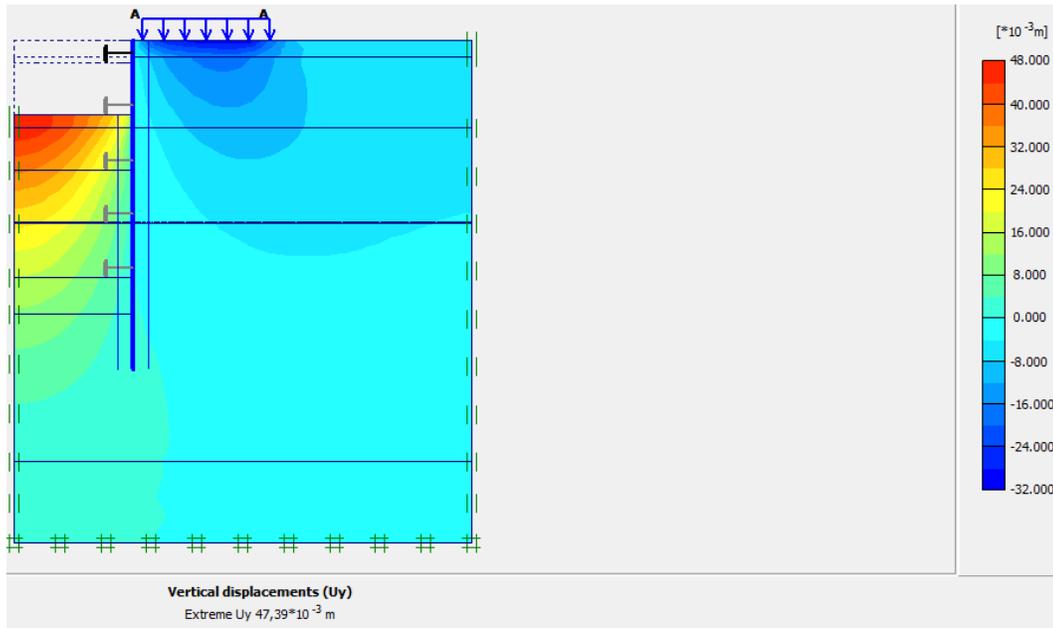


Figure IV.20: Déplacements verticaux (phase 02).

✓ Déplacement total

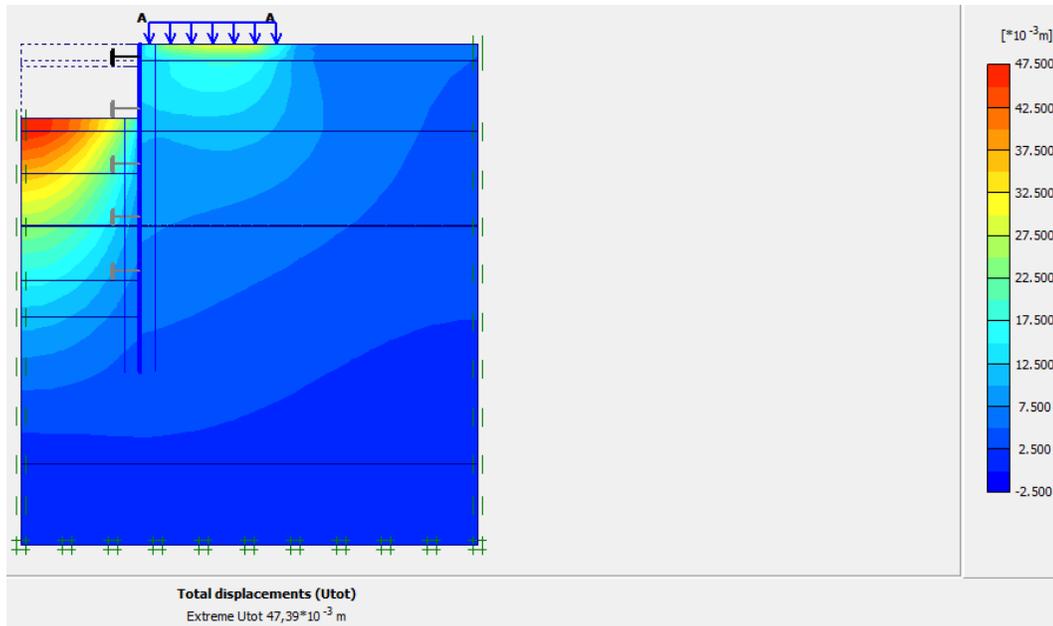


Figure IV.21: Déplacement total (phase 02).

- Phase N° 03

L'excavation s'effectue jusqu'à une profondeur égale à 14,20m avec la mise en place du 3<sup>ème</sup> buton. La modélisation est représentée par la figure IV.22.

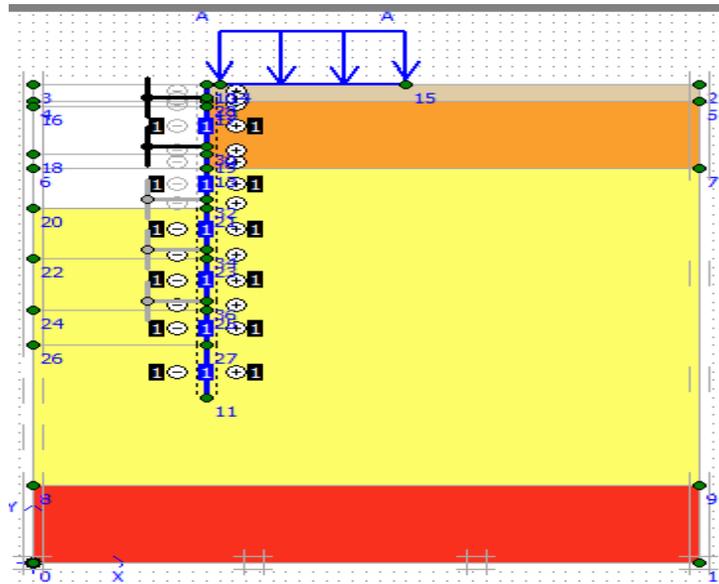


Figure IV.22: Modélisation de la 3ème phase à l'aide du logiciel Plaxis.

### ✓ Déplacements

La figure IV-23 représente le schéma de la déformée de la structure (pieux avec butons) donné par le logiciel Plaxis, les déplacements enregistrés sont comme suit :

- Les déplacements horizontaux  $16,18 \times 10^{-3}$  m.
- Les déplacements verticaux  $99,03 \times 10^{-3}$  m.
- Le déplacement total égal à  $99,03 \times 10^{-3}$  m.

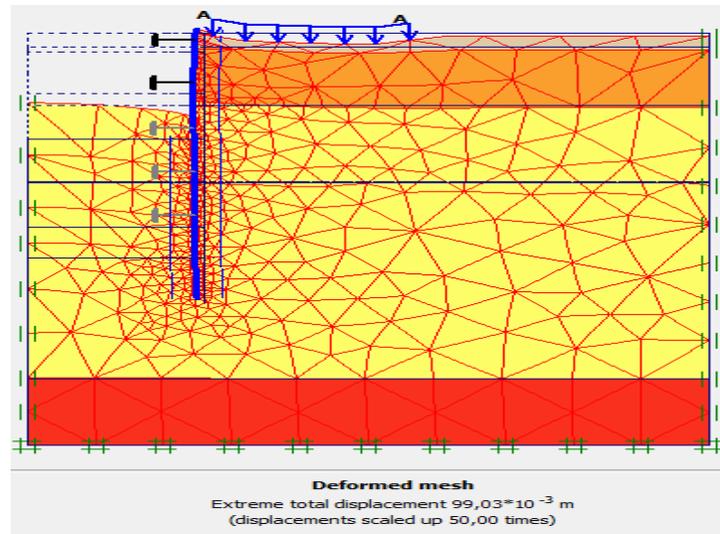


Figure IV.23: Résultats de déformations de la 3<sup>ème</sup> phase.

✓ Déplacements horizontaux

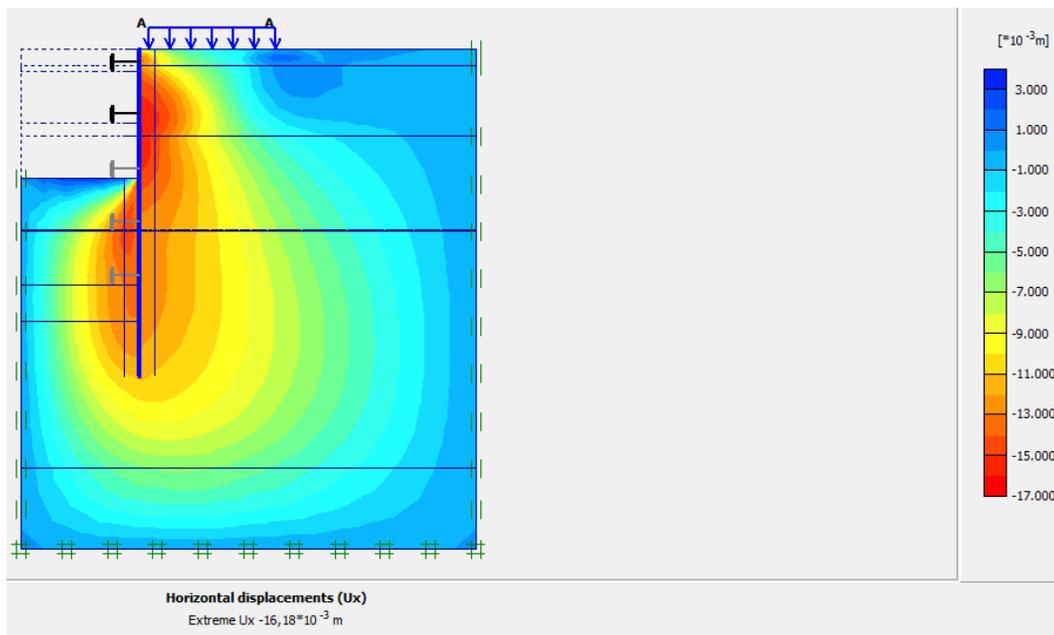


Figure IV.24: Déplacements horizontaux (phase 03).

✓ Déplacements verticaux

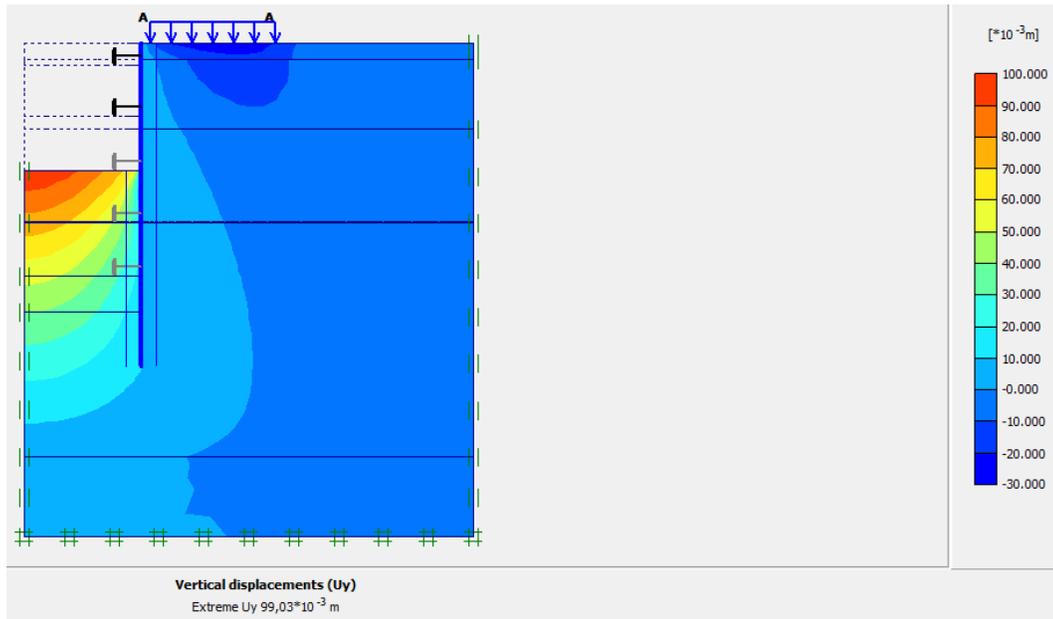


Figure IV.25: Déplacements verticaux (phase 03).

✓ Déplacement total

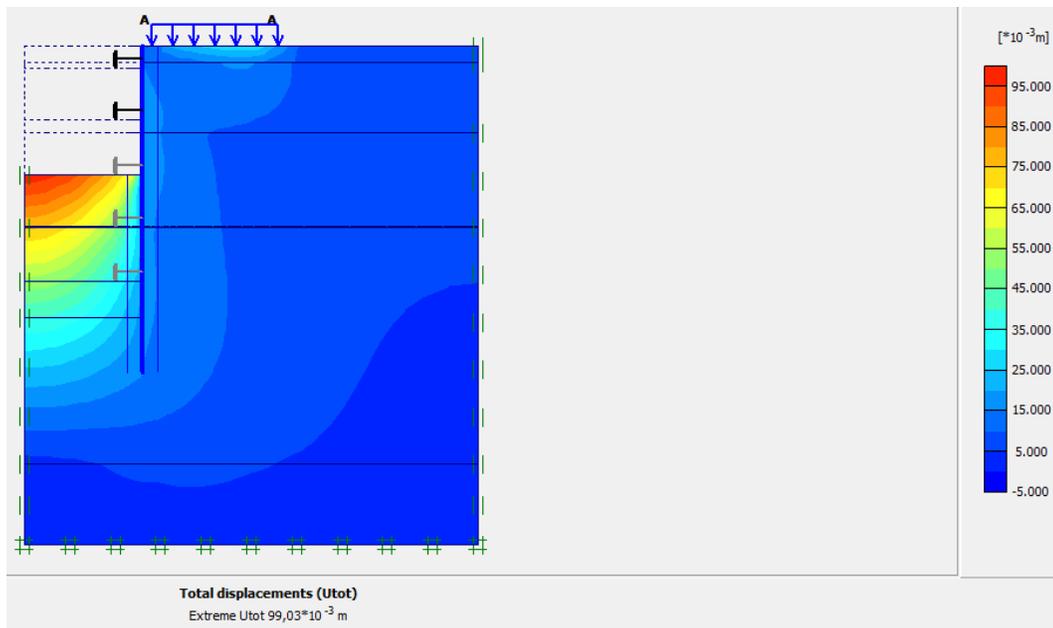
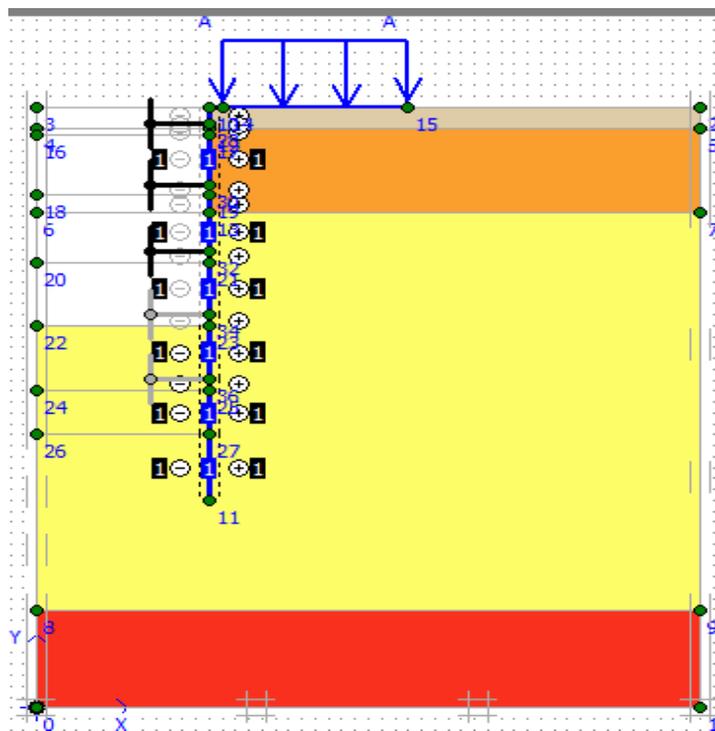


Figure IV.26: Déplacement total (phase 03).

• Phase N° 04

L'excavation s'effectue jusqu'à une profondeur égale à 20,02m avec la mise en place du 4<sup>ème</sup> buton. La modélisation est représentée par la figure IV.27.



**Figure IV.27:** Modélisation de la 4<sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.

### ✓ Déplacements

La figure IV-28 représente le schéma de la déformée de la structure (pieux avec butons) donné par le logiciel Plaxis, les déplacements enregistrés sont comme suit :

- Les déplacements horizontaux  $24,04 \times 10^{-3}$  m.
- Les déplacements verticaux  $137,02 \times 10^{-3}$  m.
- Le déplacement total égal à  $137,02 \times 10^{-3}$  m.
-

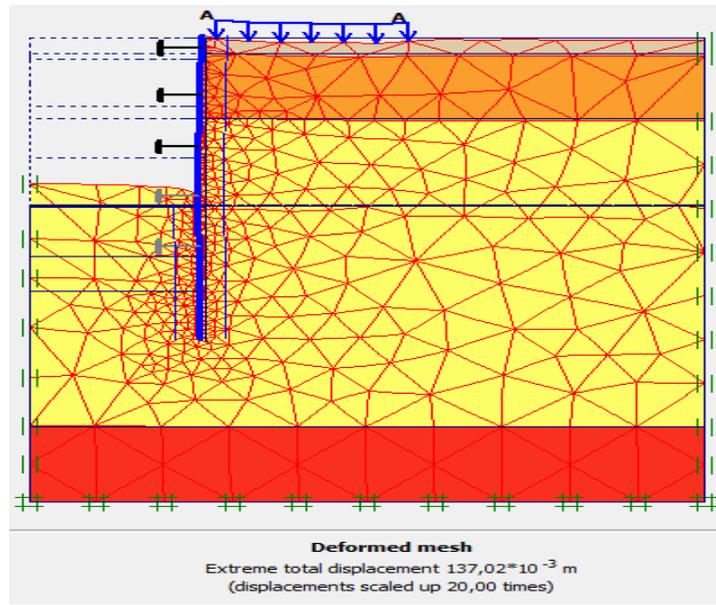


Figure IV.28: Résultats de déformations de la 4ème phase.

✓ Déplacements horizontaux

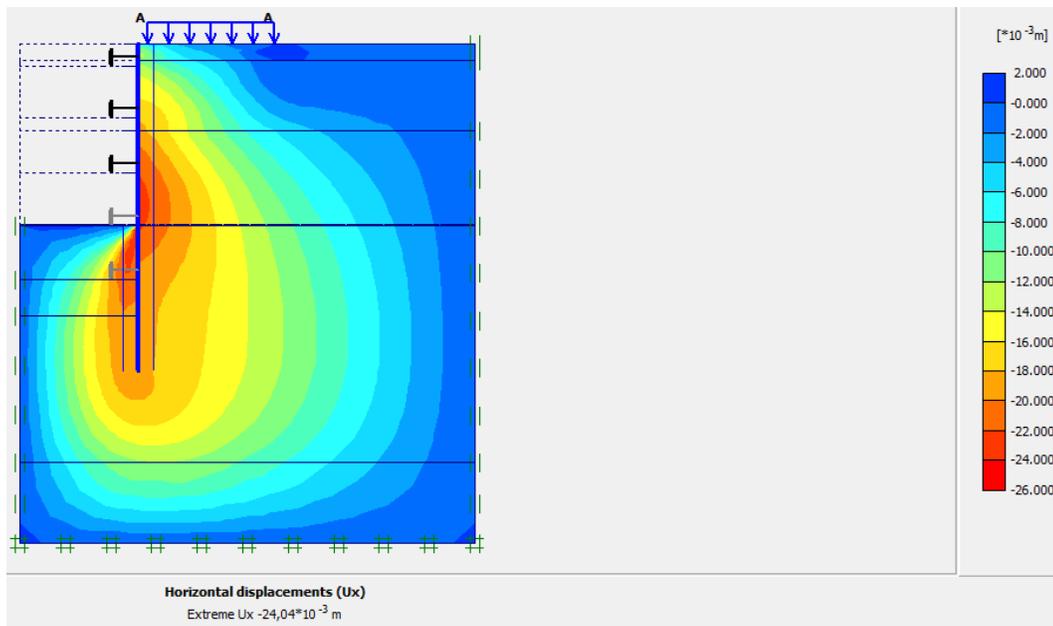


Figure IV.29: Déplacements horizontaux (phase 04).

✓ Déplacements verticaux

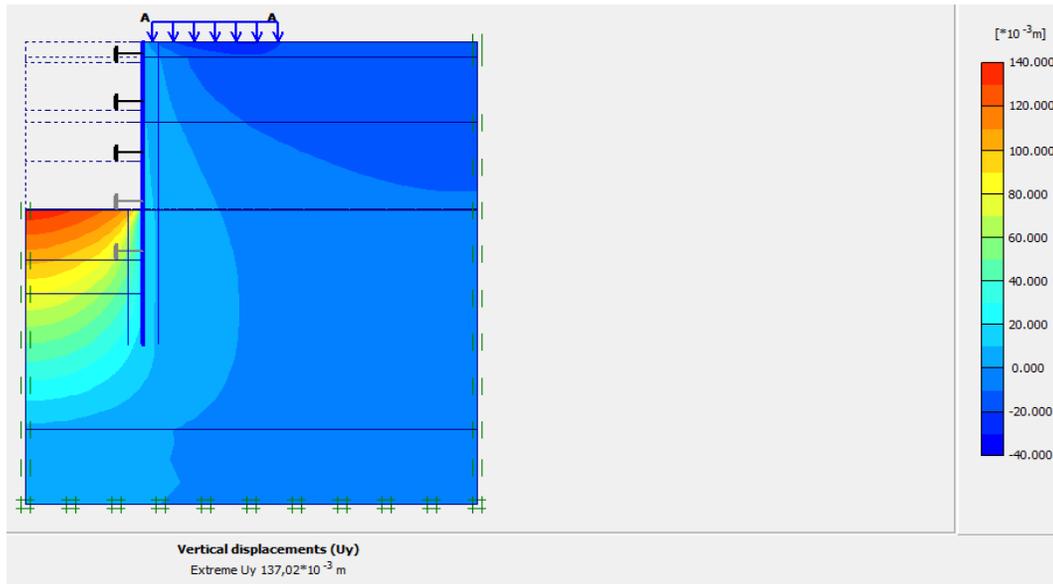


Figure IV.30: Déplacements verticaux (phase 04).

✓ Déplacement total

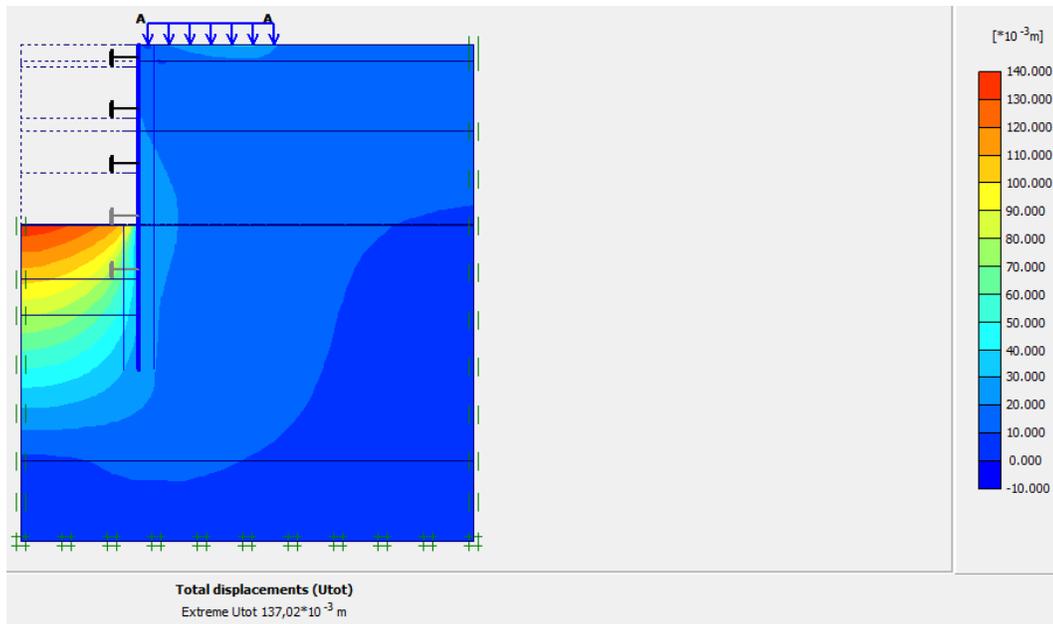
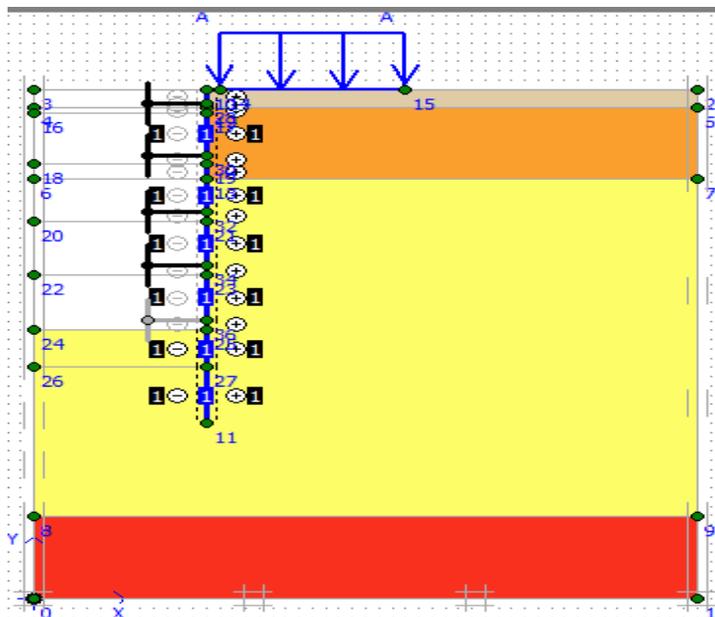


Figure IV.31: Déplacement total (phase 04).

• **Phase N° 05**

L'excavation s'effectue jusqu'à une profondeur égale à 25,92m avec la mise en place du 5<sup>ème</sup> bouton. La modélisation est représentée par la figure IV.32.



**Figure IV.32:** Modélisation de la 5ème phase à l'aide du logiciel Plaxis.

✓ **Déplacements**

La figure IV-33 représente le schéma de la déformée de la structure (pieux avec butons) donné par le logiciel Plaxis, les déplacements enregistrés sont comme suit :

- Les déplacements horizontaux  $35,51 \times 10^{-3}$  m.
- Les déplacements verticaux  $146,38 \times 10^{-3}$  m.
- Le déplacement total égal à  $146,38 \times 10^{-3}$  m.

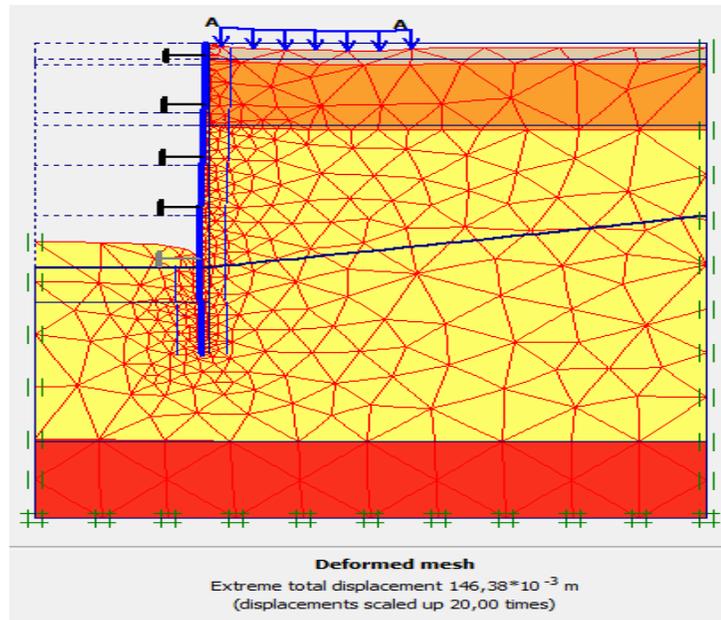


Figure IV.33: Résultats de déformations de la 5ème phase.

✓ Déplacements horizontaux

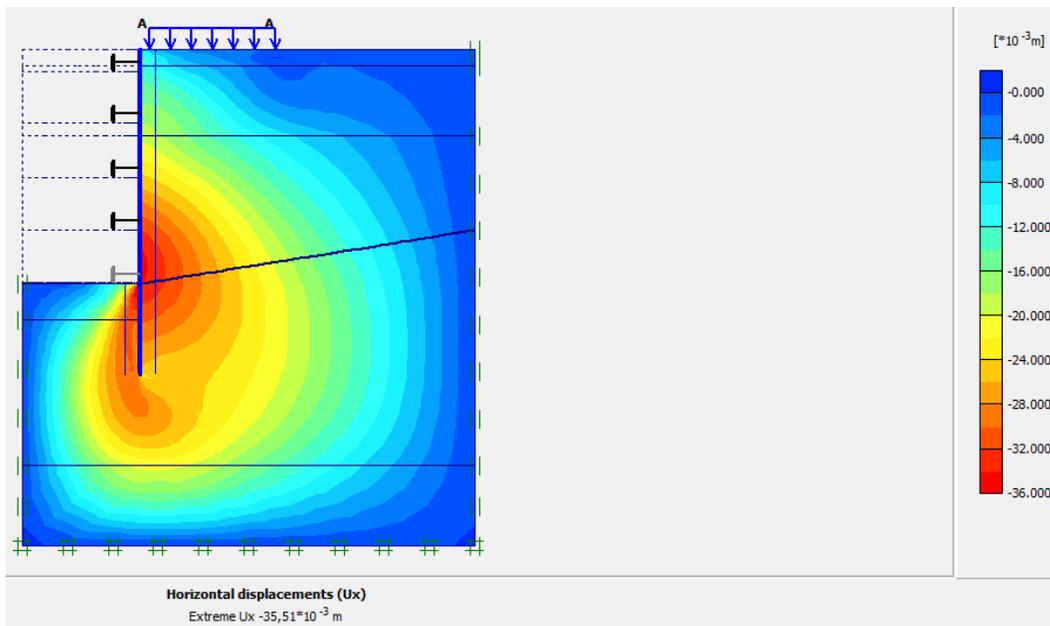


Figure IV.34 :Déplacements horizontaux (phase 05).

✓ Déplacements verticaux

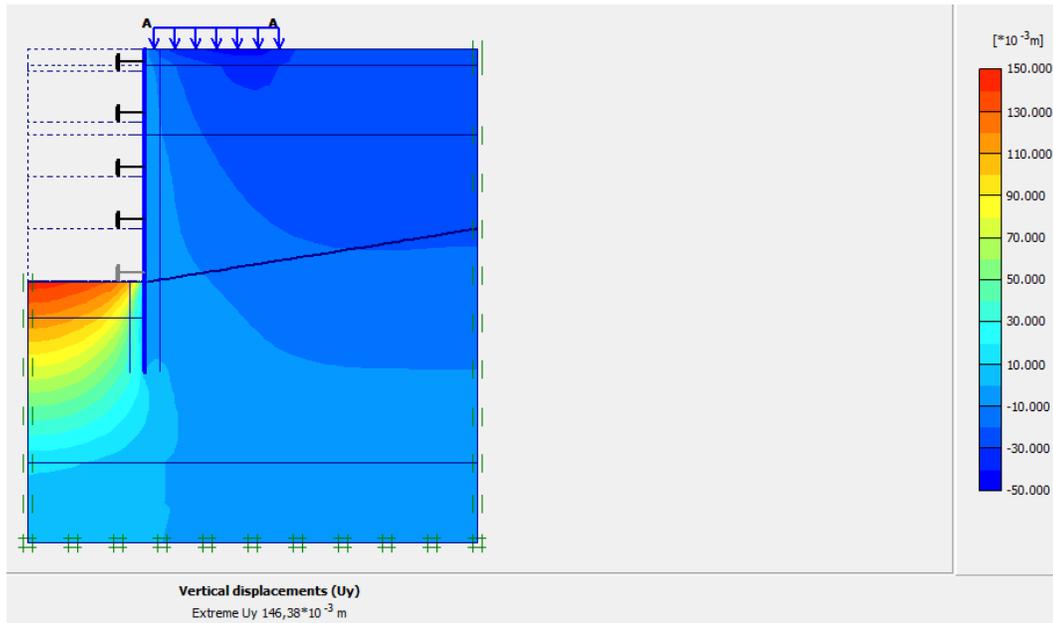


Figure IV.35 :Déplacements verticaux (phase 05).

✓ Déplacement total

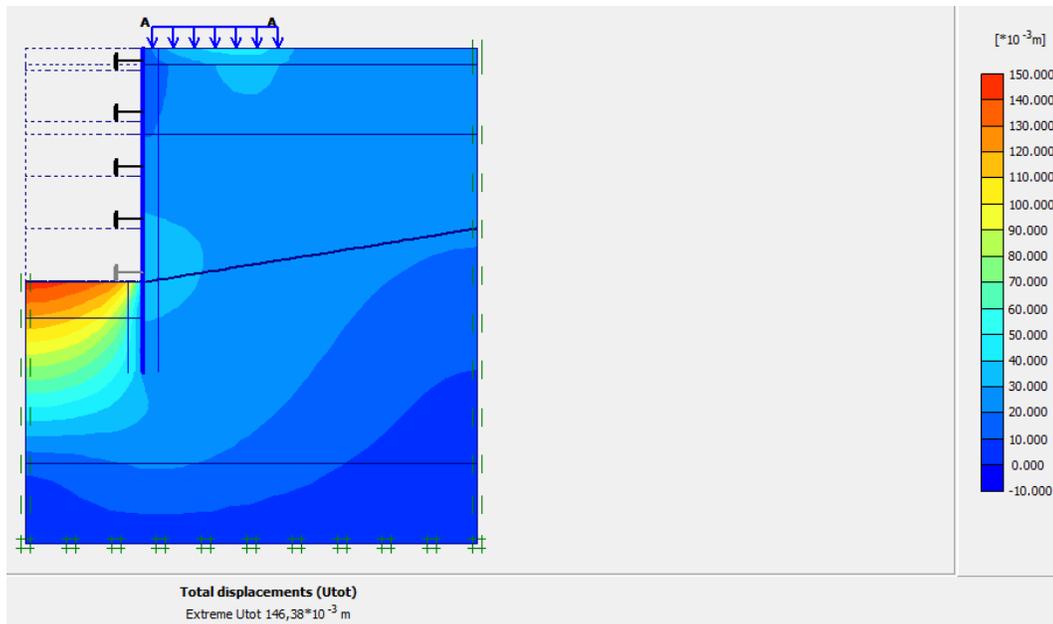
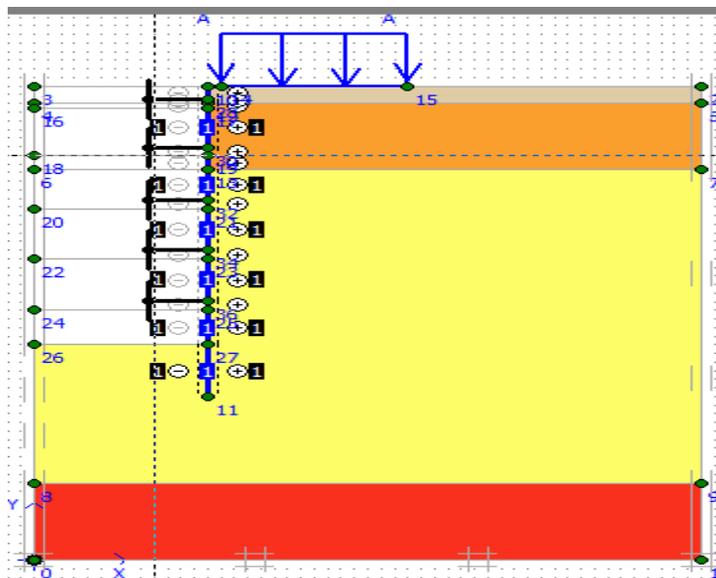


Figure IV.36 :Déplacement total (phase 05).

• **Phase N° 06**

L'excavation s'effectue jusqu'à une profondeur égale à 30m. La modélisation est représentée par la figure IV.37.



**Figure IV.37 :** Modélisation de la 6ème phase à l'aide du logiciel Plaxis.

✓ **Déplacements**

La figure IV.38 représente le schéma de la déformée de la structure (pieux avec butons) donné par le logiciel Plaxis, les déplacements enregistrés sont comme suit :

- Les déplacements horizontaux  $43,57 \times 10^{-3}$  m.
- Les déplacements verticaux  $144,86 \times 10^{-3}$  m.
- Le déplacement total égal à  $144,86 \times 10^{-3}$  m.

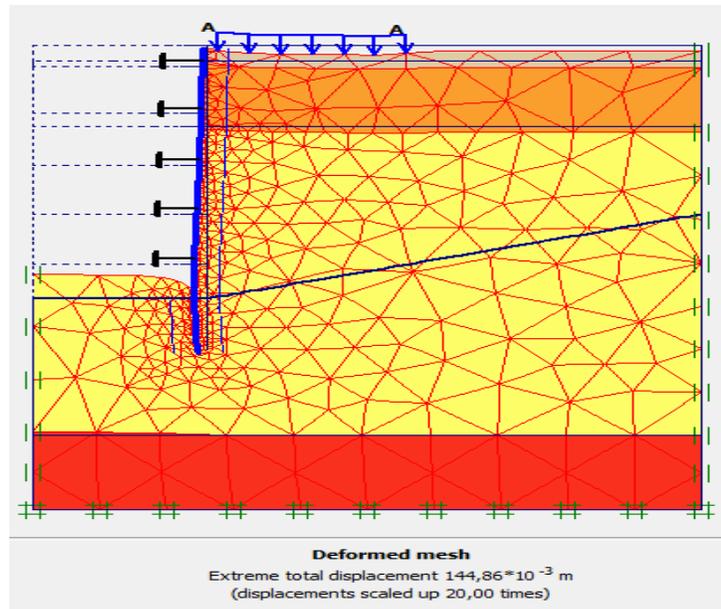


Figure IV.38 : Résultats de déformations de la 6ème phase.

✓ Déplacements horizontaux

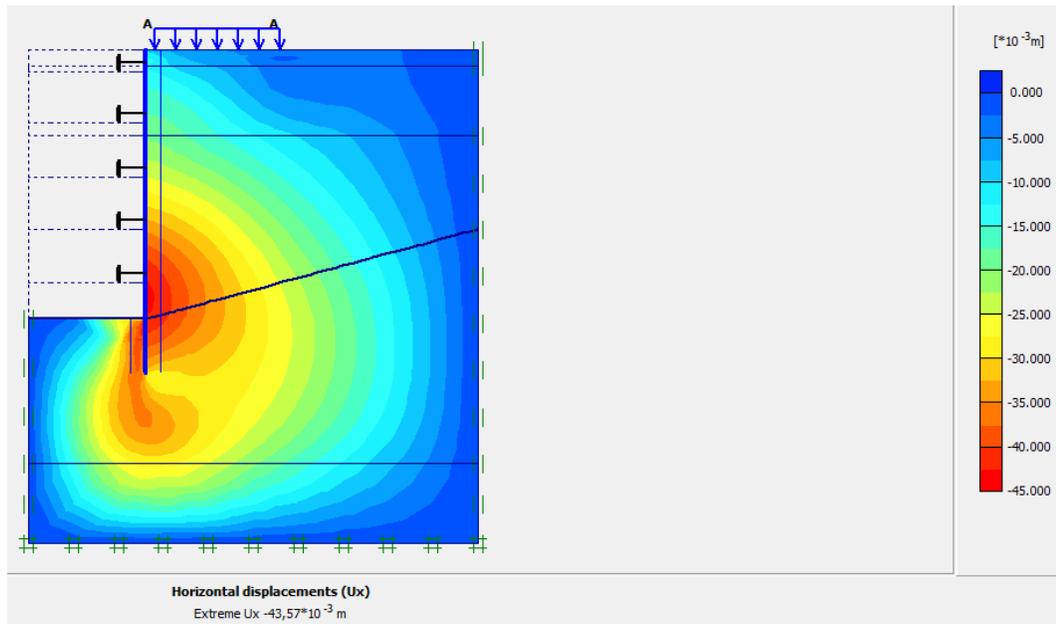


Figure IV.39 : Déplacements horizontaux (phase 06).

✓ Déplacements verticaux

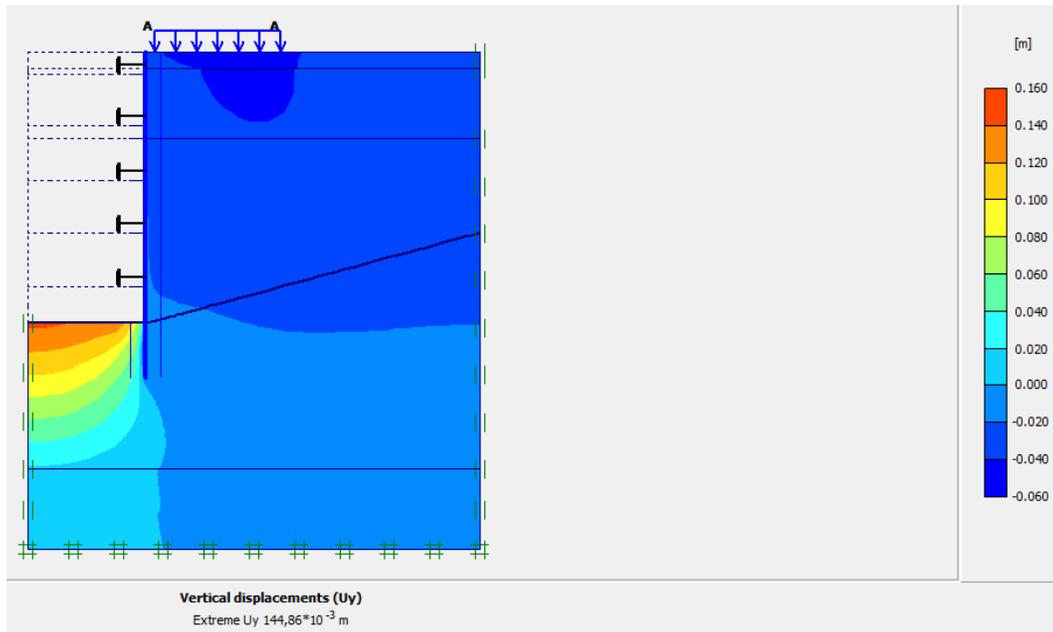


Figure IV.40 : Déplacements verticaux (phase 06).

✓ Déplacement total

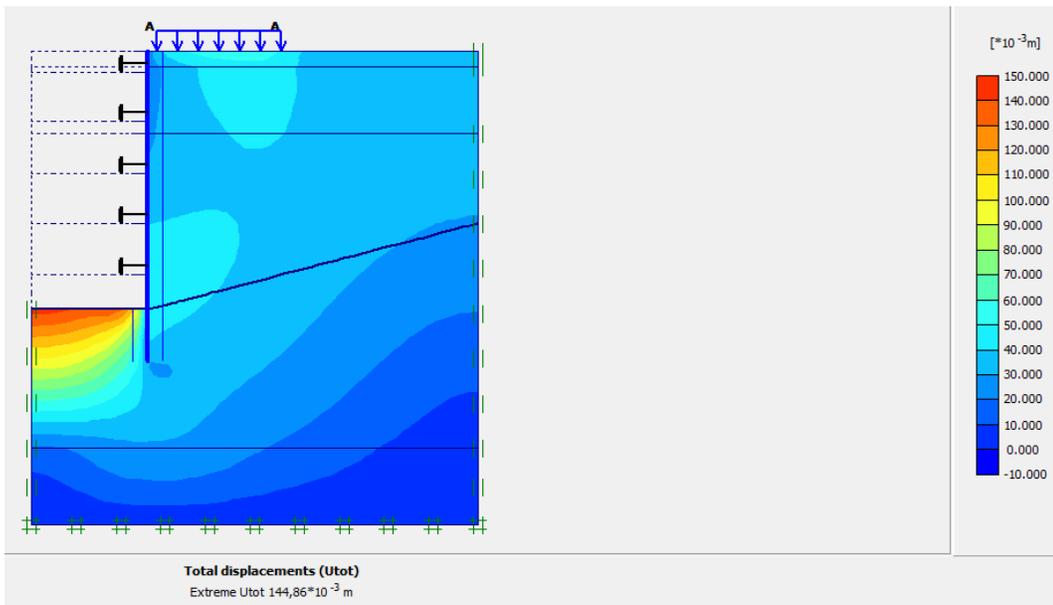


Figure IV.41 : Déplacement total (phase 06).

IV.5.1.2. Calcul du facteur de sécurité

Les coefficients de sécurité calculés par le logiciel Plaxis2D pour les différentes excavations sont données par les figures suivantes :

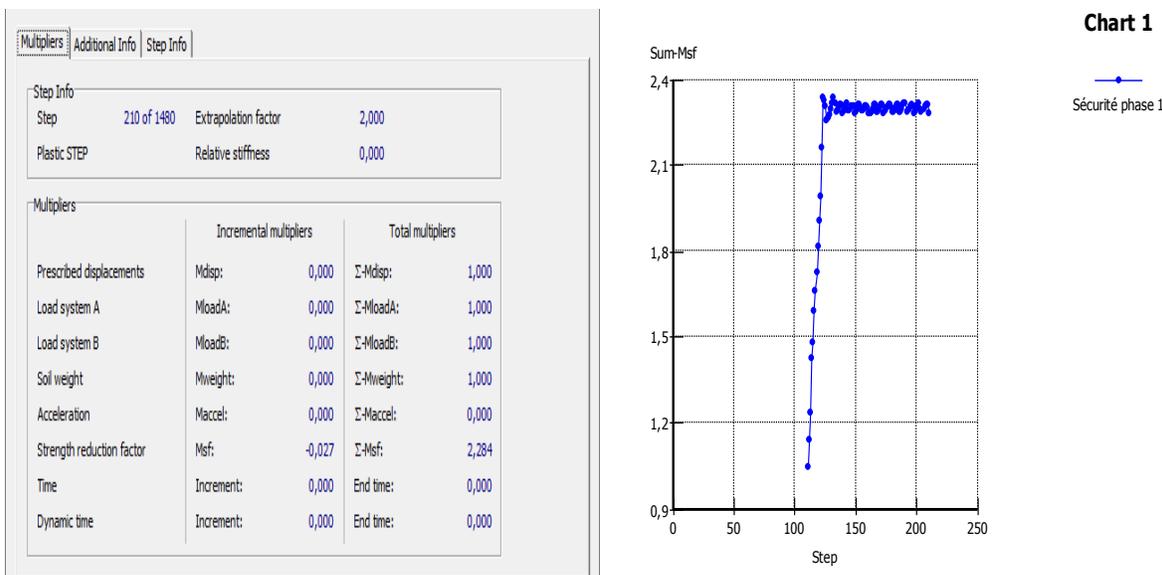


Figure IV.42 : Coefficient de sécurité de la 1<sup>ère</sup> excavation (Pieux sécants avec butons).

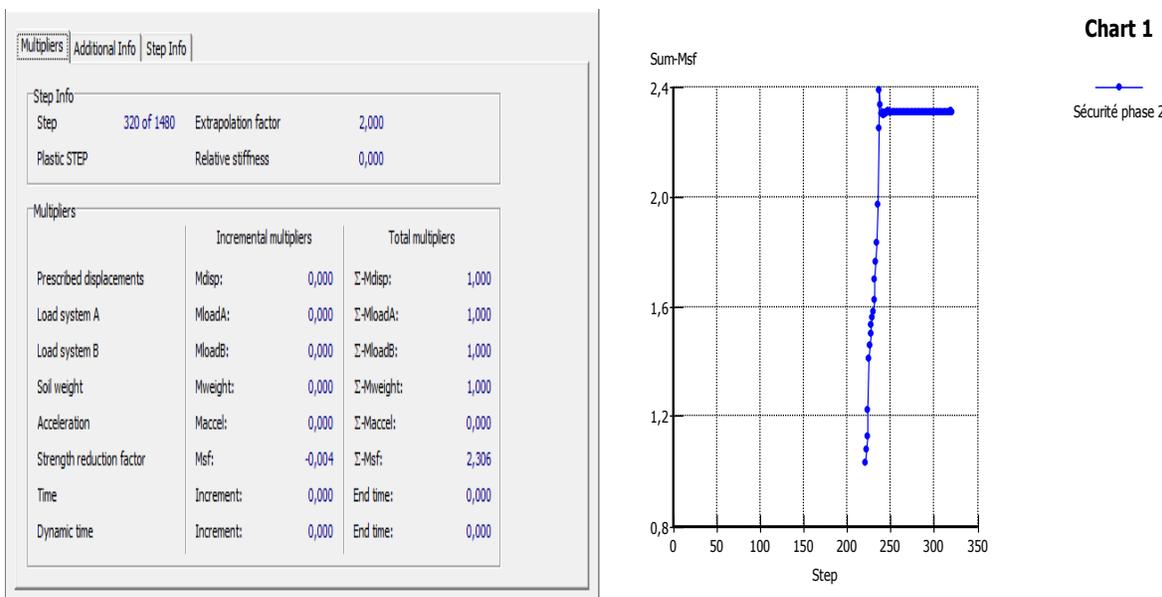


Figure IV.43 : Coefficient de sécurité de 2<sup>ème</sup> excavation (Pieux sécants avec butons).

Multipliers			
Additional Info			
Step Info			
Step	435 of 1480	Extrapolation factor	1,000
Plastic STEP		Relative stiffness	0,000
Multipliers			
	Incremental multipliers		Total multipliers
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ-Mdisp: 1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ-MloadA: 1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ-MloadB: 1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ-Mweight: 1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ-Maccel: 0,000
Strength reduction factor	Msf:	0,000	Σ-Msf: 2,300
Time	Increment:	0,000	End time: 0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time: 0,000

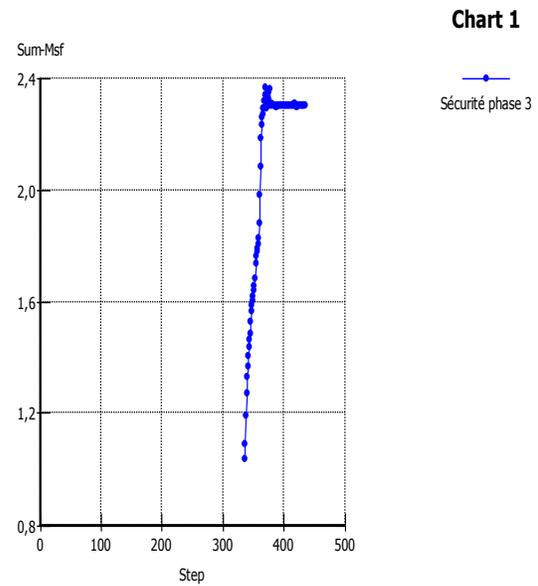


Figure IV.44 : Coefficient de sécurité de 3<sup>ème</sup> excavation (Pieux sécants avec butons)

Multipliers			
Additional Info			
Step Info			
Step	1252 of 1480	Extrapolation factor	2,000
Plastic STEP		Relative stiffness	0,000
Multipliers			
	Incremental multipliers		Total multipliers
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ-Mdisp: 1,000
Load system A	MloadA:	0,000	Σ-MloadA: 1,000
Load system B	MloadB:	0,000	Σ-MloadB: 1,000
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ-Mweight: 1,000
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ-Maccel: 0,000
Strength reduction factor	Msf:	0,000	Σ-Msf: 2,302
Time	Increment:	0,000	End time: 0,000
Dynamic time	Increment:	0,000	End time: 0,000

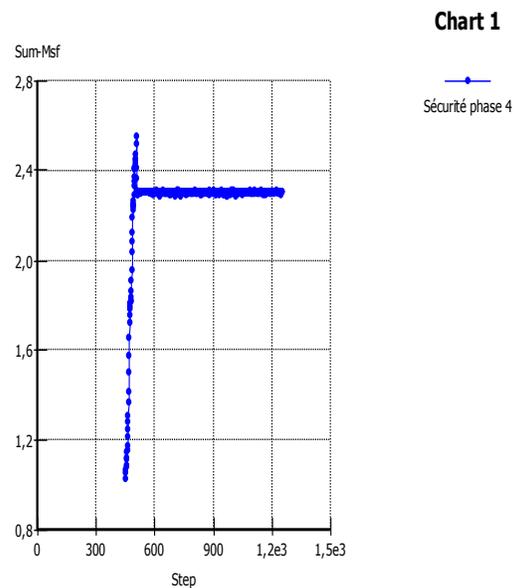


Figure IV.45 : Coefficient de sécurité de 4<sup>ème</sup> excavation (Pieux sécants avec butons)

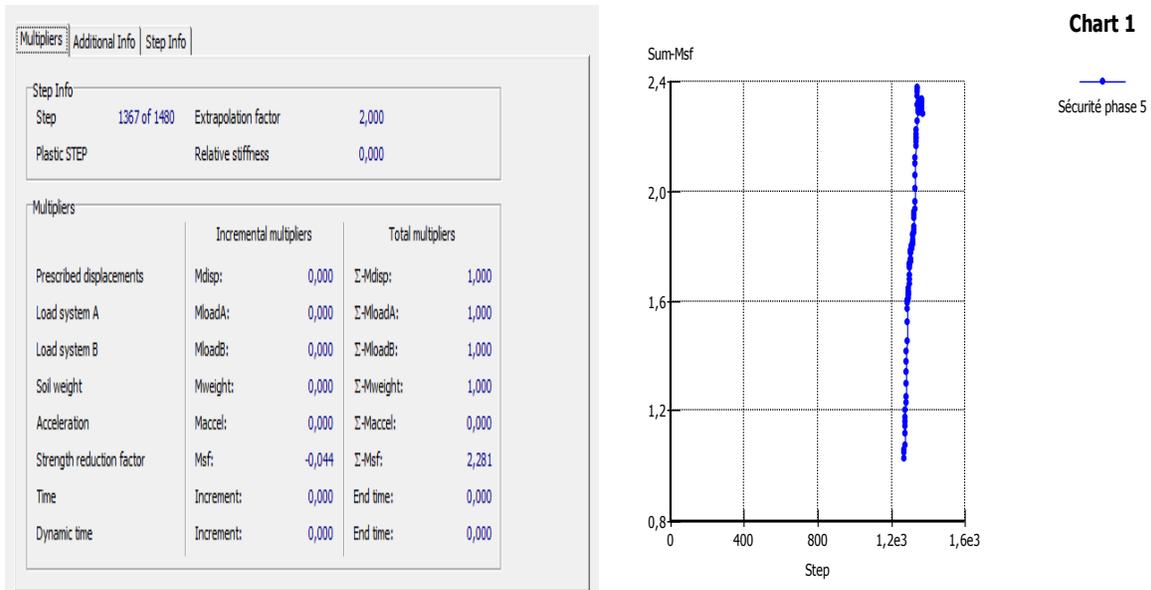


Figure IV.46 : Coefficient de sécurité de 5<sup>ème</sup> excavation (Pieux sécants avec butons)

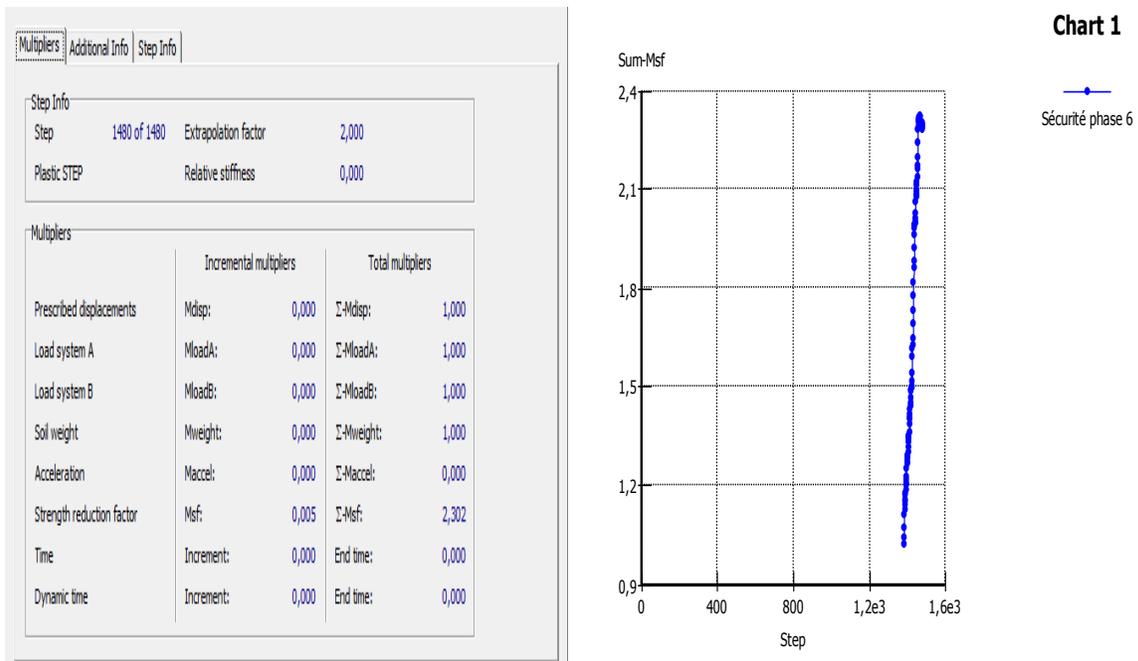


Figure IV.47 : Coefficient de sécurité de 6<sup>ème</sup> excavation (Pieux sécants avec butons)

### *Interprétation des résultats*

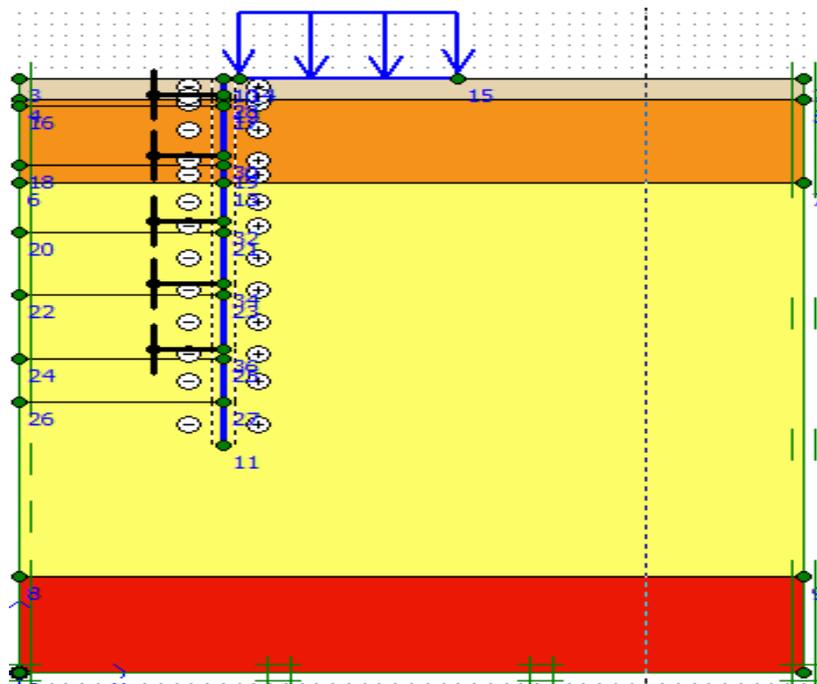
Les résultats des coefficients de sécurité montrent que la paroi en pieux est stable car le Msf est supérieur à 1.5.

### IV.5.2. Paroi moulée avec butons

#### IV.5.2.1. Modèle choisi

Concernant la 2<sup>ème</sup> variante : paroi moulée avec butons, on garde les mêmes paramètres du sol et les mêmes paramètres des butons, seules les caractéristiques du soutènement qui changent. On introduit la paroi moulée dans le logiciel Plaxis sous forme « plate » puis on insère les caractéristiques nécessaires. La paroi moulée est de 1,2 m d'épaisseur.

Le schéma de la modélisation de la structure sous le logiciel Plaxis2D est donné par la figure IV.48.

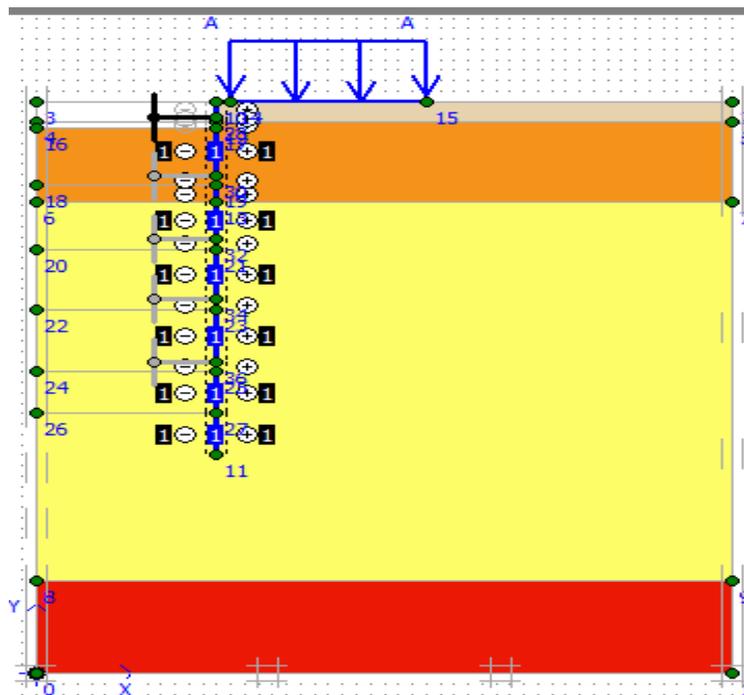


**Figure IV.48 :** Géométrie du modèle de la paroi moulée avec butons.

**IV.5.2.2. Résultats de déplacements pour les différentes phases d'excavation**

• **Phase N° 01**

L'excavation s'effectue jusqu'à une profondeur égale à 2,5m avec la mise en place du 1<sup>er</sup> buton. La modélisation est représentée par la figure IV.49.



**Figure IV.49 :** Modélisation de la 1<sup>ère</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.

✓ **Déplacements**

La figure IV.50 représente le schéma de la déformée de la structure (paroi moulée avec butons) donné par le logiciel Plaxis, les déplacements enregistrés sont comme suit :

- Les déplacements horizontaux  $13,10 \times 10^{-3}$  m.
- Les déplacements verticaux  $-37,19 \times 10^{-3}$  m.
- Le déplacement total égal à  $37,63 \times 10^{-3}$  m.

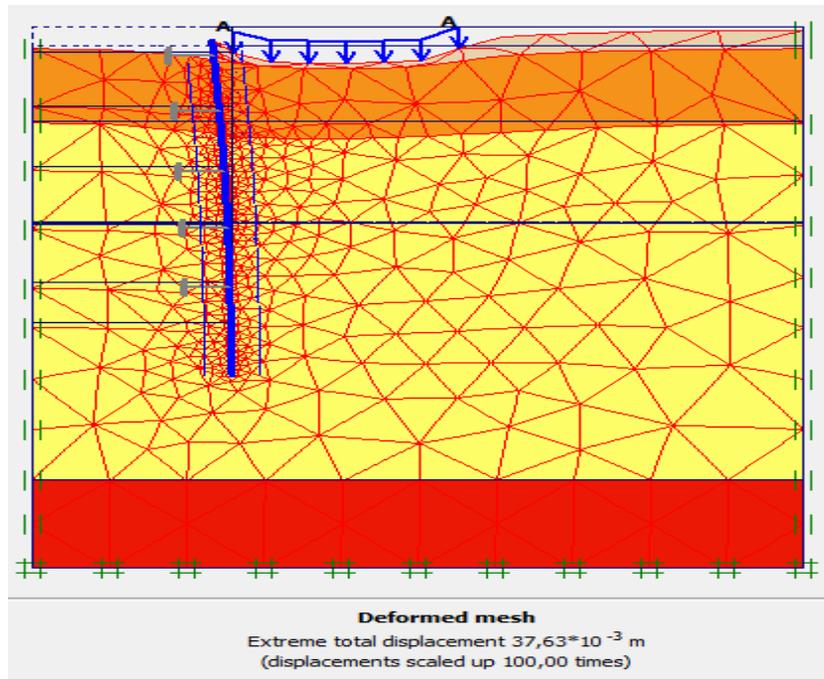


Figure IV.50 : Résultats de déformations de la 1<sup>ère</sup> phase.

✓ Déplacements horizontaux

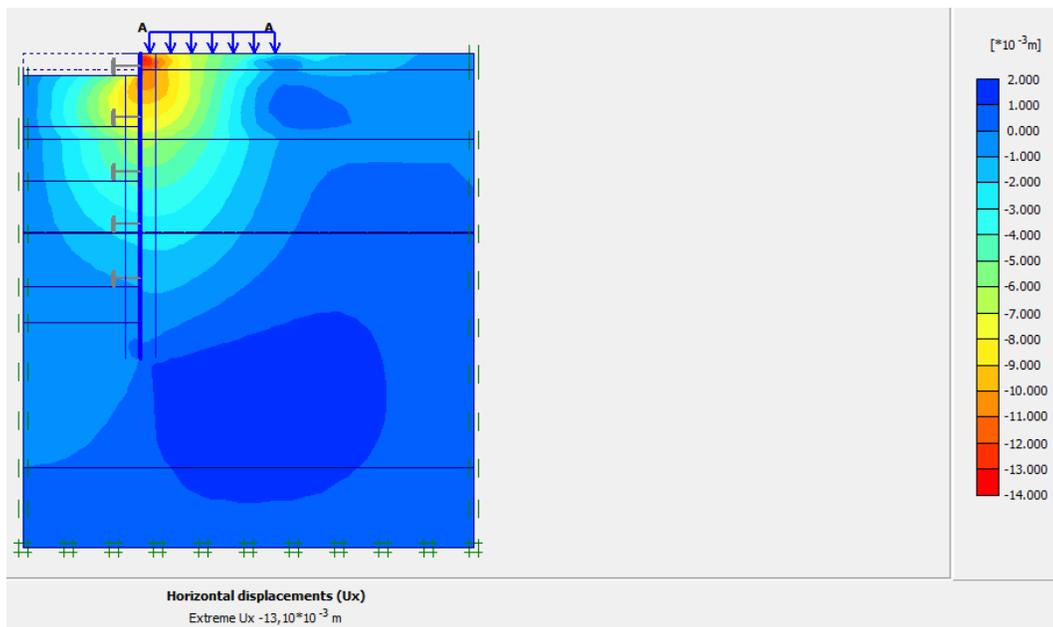


Figure IV.51 : Déplacements horizontaux (phase 01).

✓ Déplacements verticaux

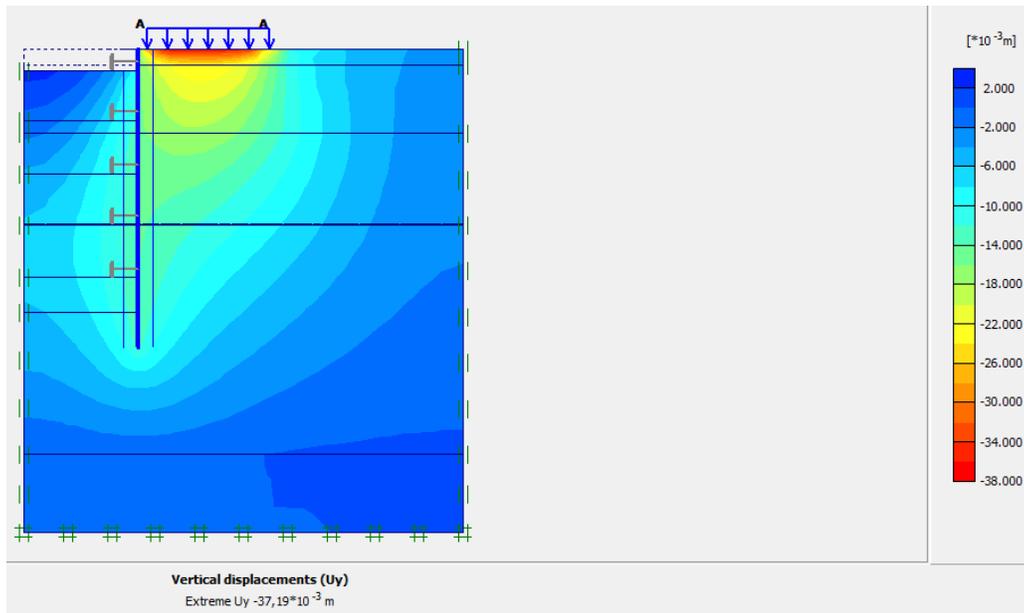


Figure IV.52 : Déplacements verticaux (phase 01).

• Phase N° 02

L'excavation s'effectue jusqu'à une profondeur égale à 8,10 m avec la mise en place du 2<sup>ème</sup> buton La modélisation est représentée par les figure IV.53.

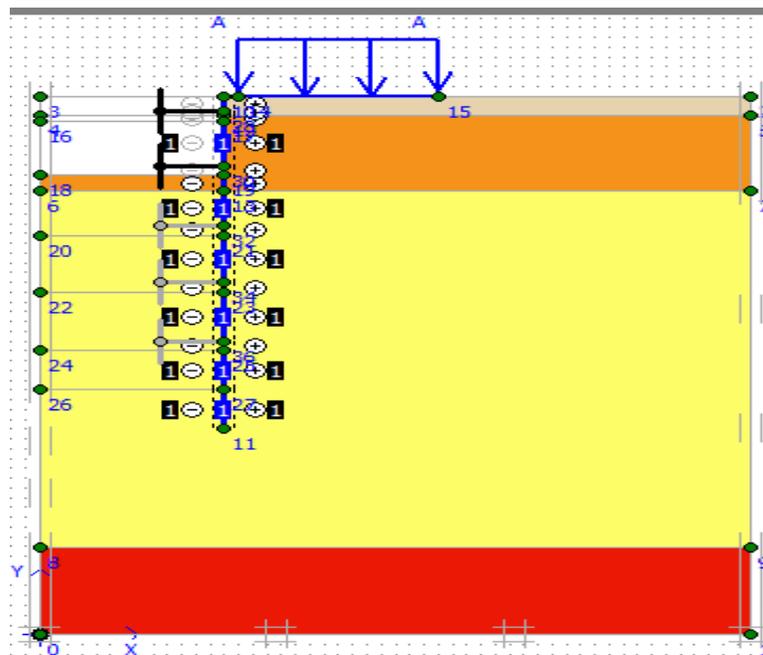
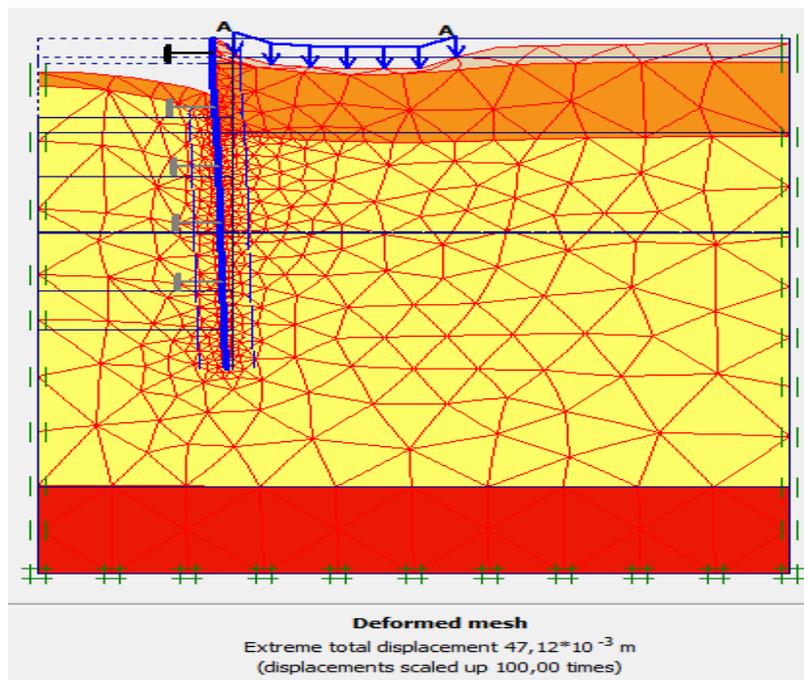


Figure IV.53 : Modélisation de la 2<sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.

✓ **Déplacements**

La figure IV.54 représente le schéma de la déformée de la structure (paroi moulée avec butons) donné par le logiciel Plaxis, les déplacements enregistrés sont comme suit :

- Les déplacements horizontaux  $13,86 \times 10^{-3}$  m.
- Les déplacements verticaux  $47,12 \times 10^{-3}$  m.
- Le déplacement total égal à  $47,12 \times 10^{-3}$  m.



**Figure IV.54 :** Résultats de déformations de la 2<sup>ème</sup> phase.

✓ Déplacements horizontaux

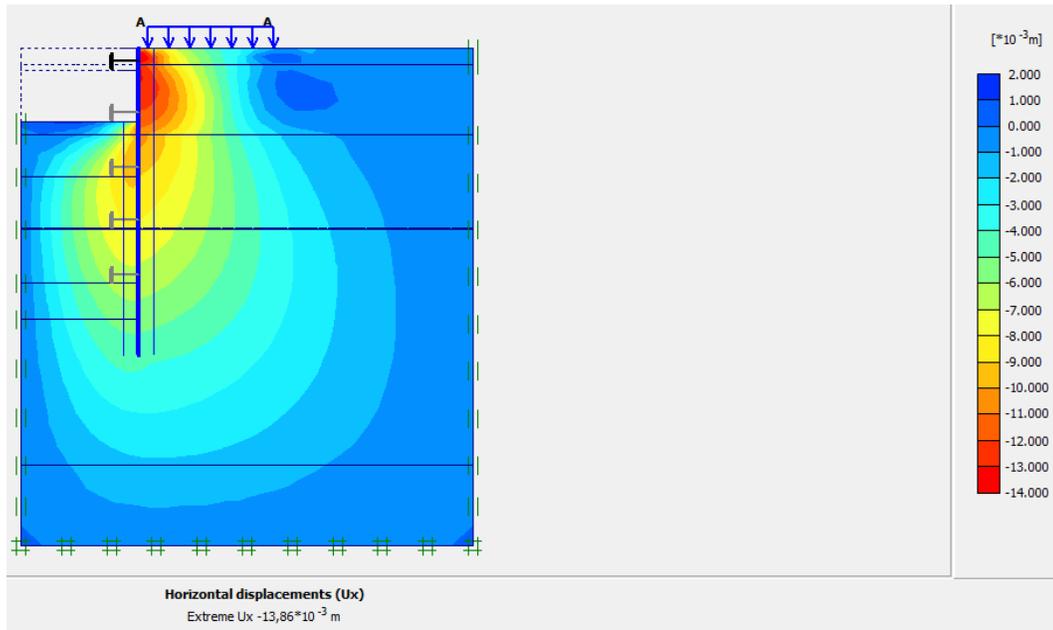


Figure IV.55 : Déplacements horizontaux (phase 02).

✓ Déplacements verticaux

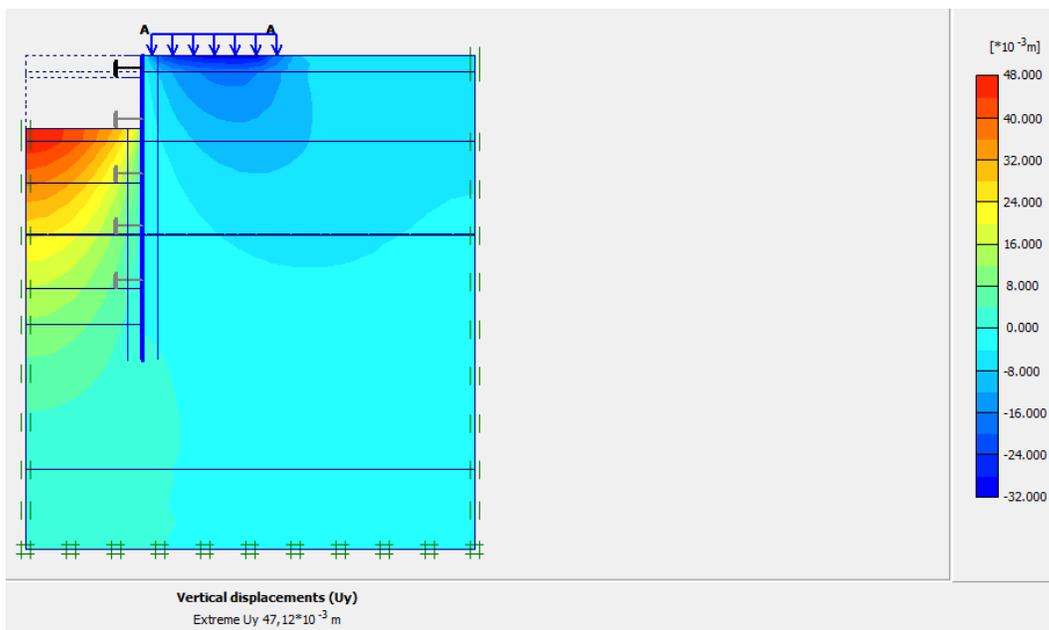


Figure IV.56 : Déplacements verticaux (phase 02).

### • Phase N° 03

L'excavation s'effectue jusqu'à une profondeur égale à 14,20m avec la mise en place du 3<sup>ème</sup> buton. La modélisation est représentée par la figure IV.57.

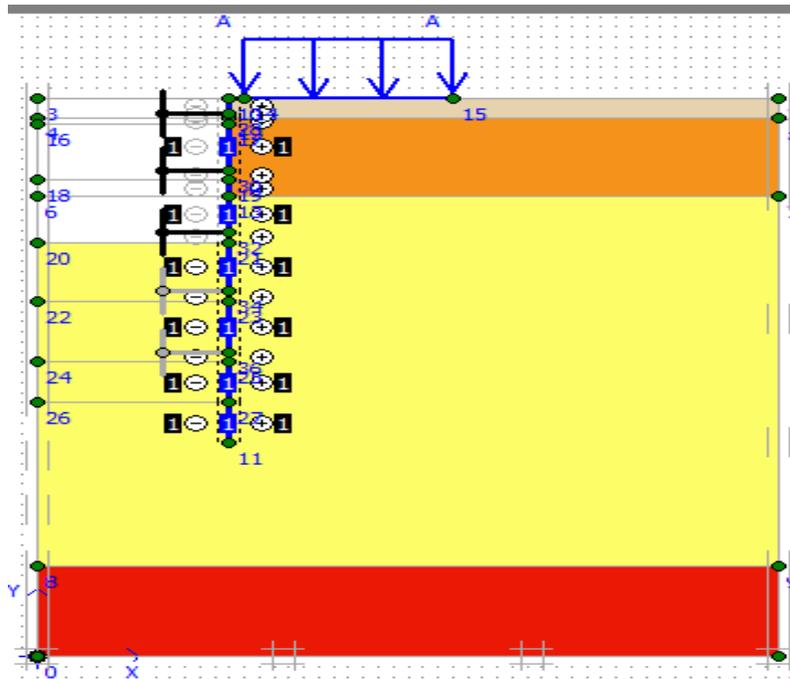


Figure IV.57 : Modélisation de la 3<sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.

### ✓ Déplacements

La figure IV.58 représente le schéma de la déformée de la structure (paroi moulée avec butons) donné par le logiciel Plaxis, les déplacements enregistrés sont comme suit :

- Les déplacements horizontaux  $15,88 \times 10^{-3}$  m.
- Les déplacements verticaux  $99,02 \times 10^{-3}$  m.
- Le déplacement total égal à  $99,02 \times 10^{-3}$  m.

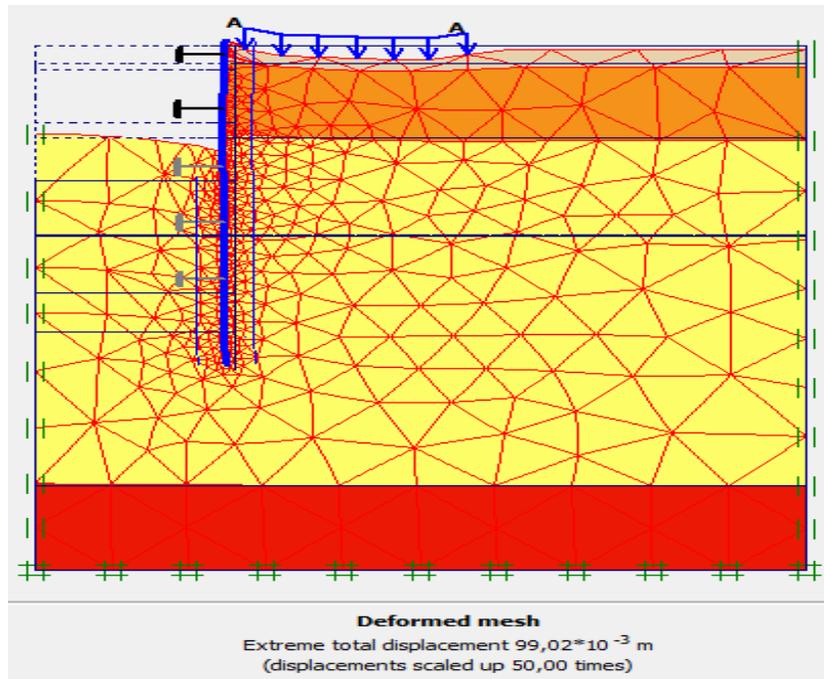


Figure IV.58 : Résultats de déformations de la 3<sup>ème</sup> phase.

✓ Déplacements horizontaux

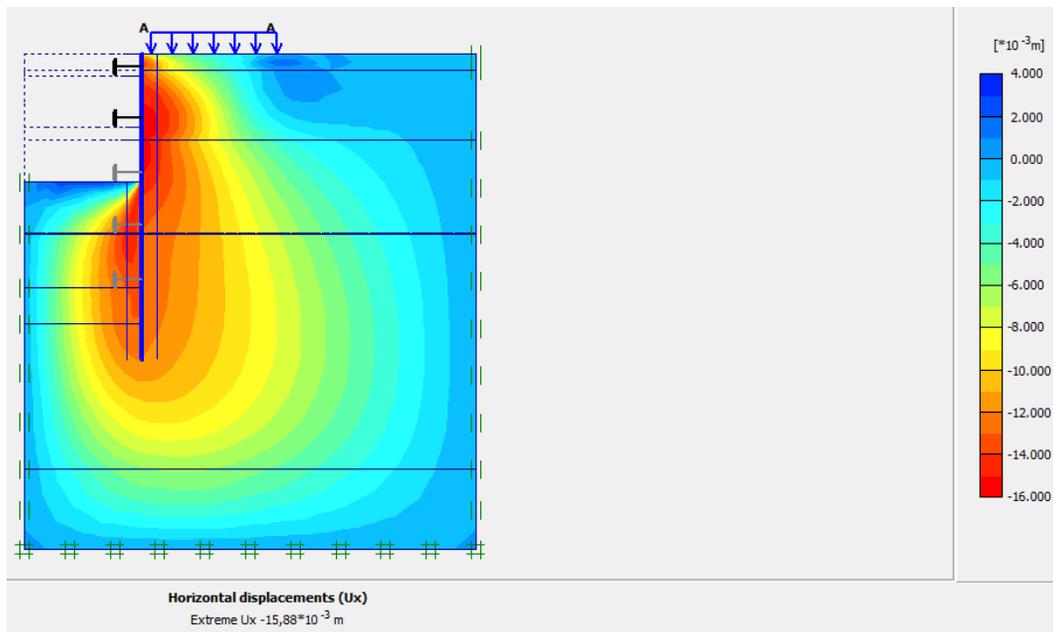


Figure IV.59 : Déplacements horizontaux (phase 03).

✓ Déplacements verticaux

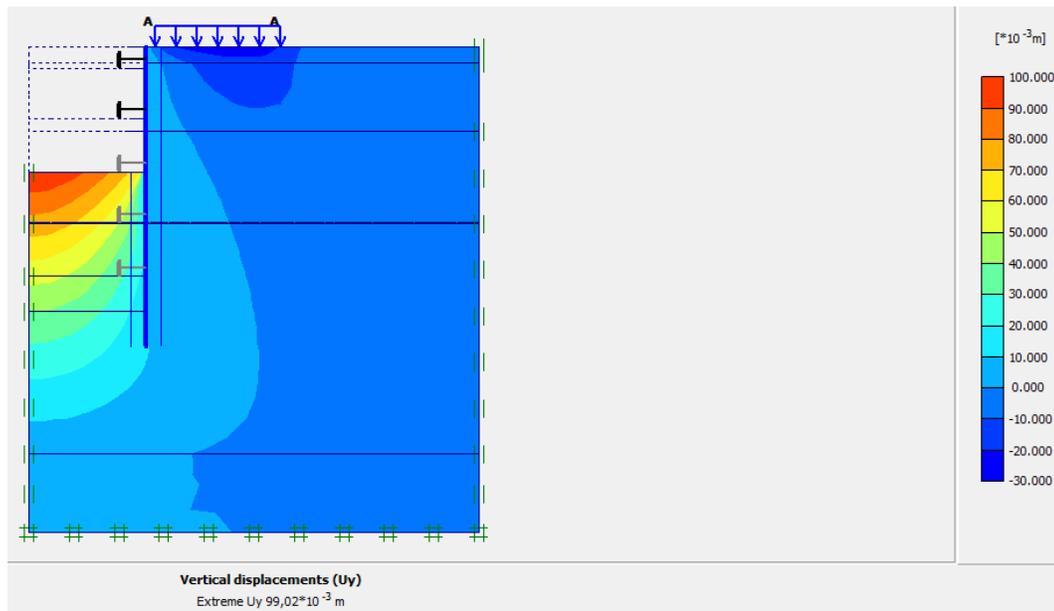


Figure IV.60 : Déplacements verticaux (phase 03).

• Phase N° 04

L'excavation s'effectue jusqu'à une profondeur égale à 20,02m avec la mise en place du 4<sup>ème</sup> buton. La modélisation est représentée par la figure IV.61.

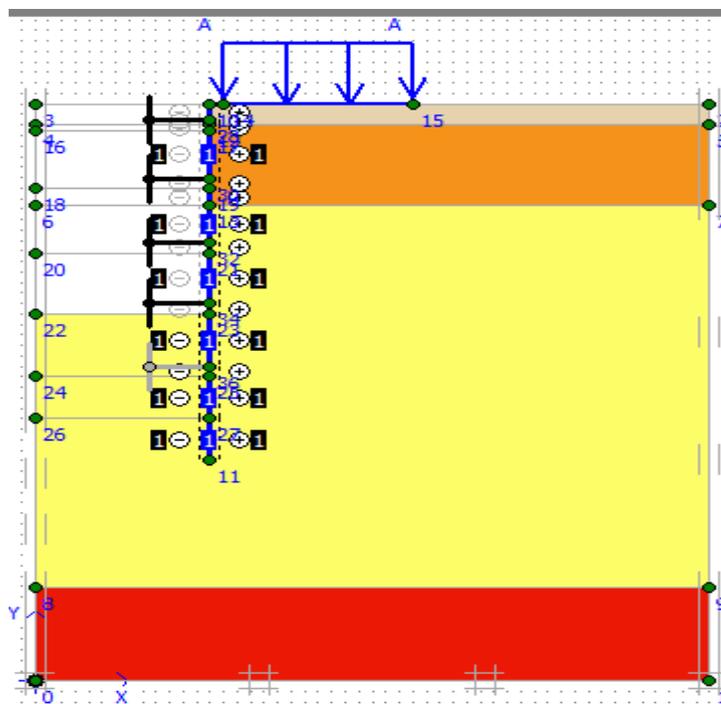


Figure IV.61 : Modélisation de la 4<sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.

✓ Déplacements

La figure IV.62 représente le schéma de la déformée de la structure (paroi moulée avec butons) donné par le logiciel Plaxis, les déplacements enregistrés sont comme suit :

- Les déplacements horizontaux  $23,26 \times 10^{-3}$  m.
- Les déplacements verticaux  $137,09 \times 10^{-3}$  m.
- Le déplacement total égal à  $137,09 \times 10^{-3}$  m.

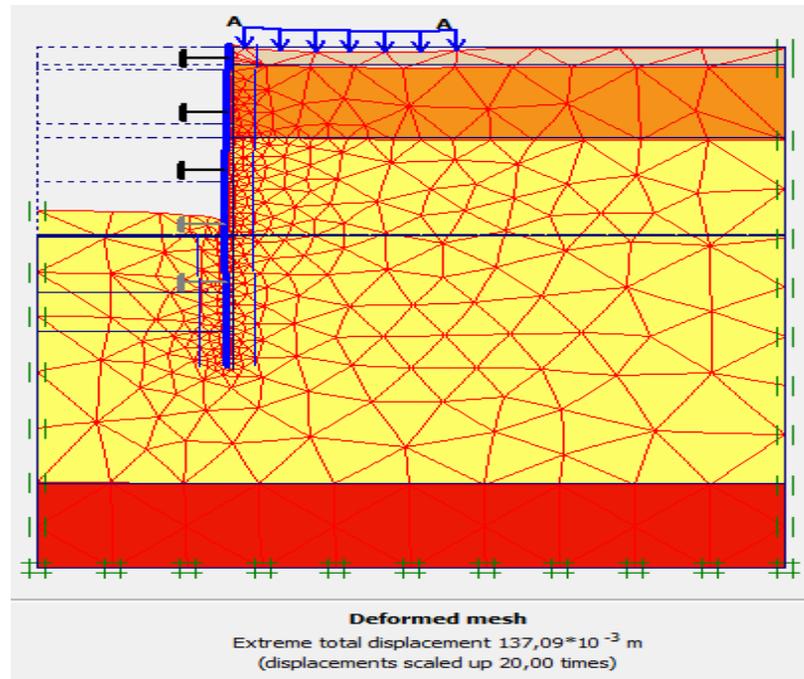


Figure IV.62 : Résultats de déformations de la 4<sup>ème</sup> phase.

✓ Déplacements horizontaux

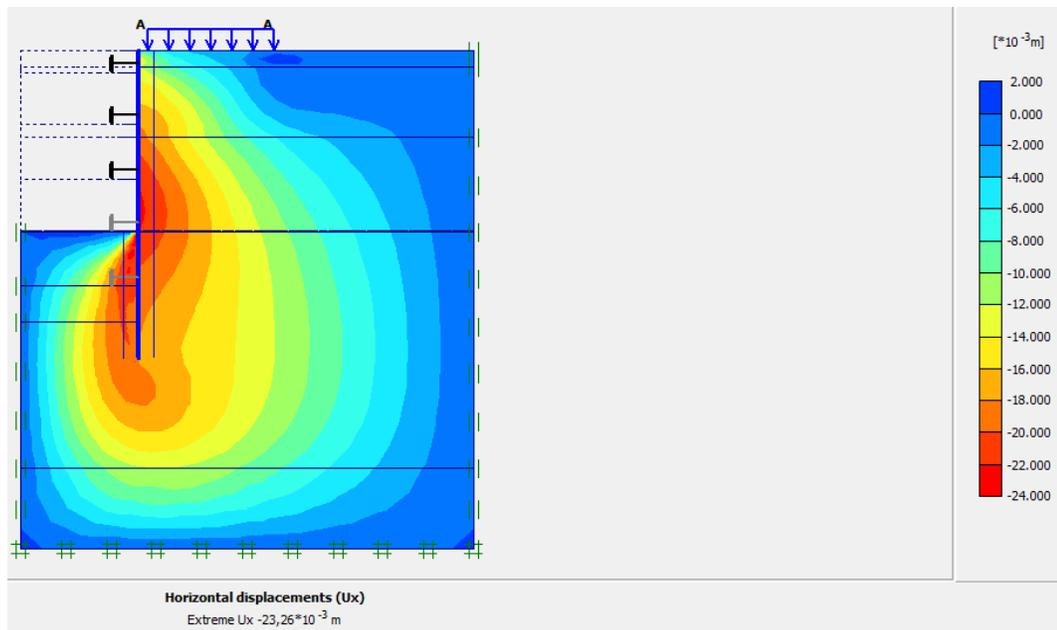


Figure IV.63 : Déplacements horizontaux (phase 04).

✓ Déplacements verticaux

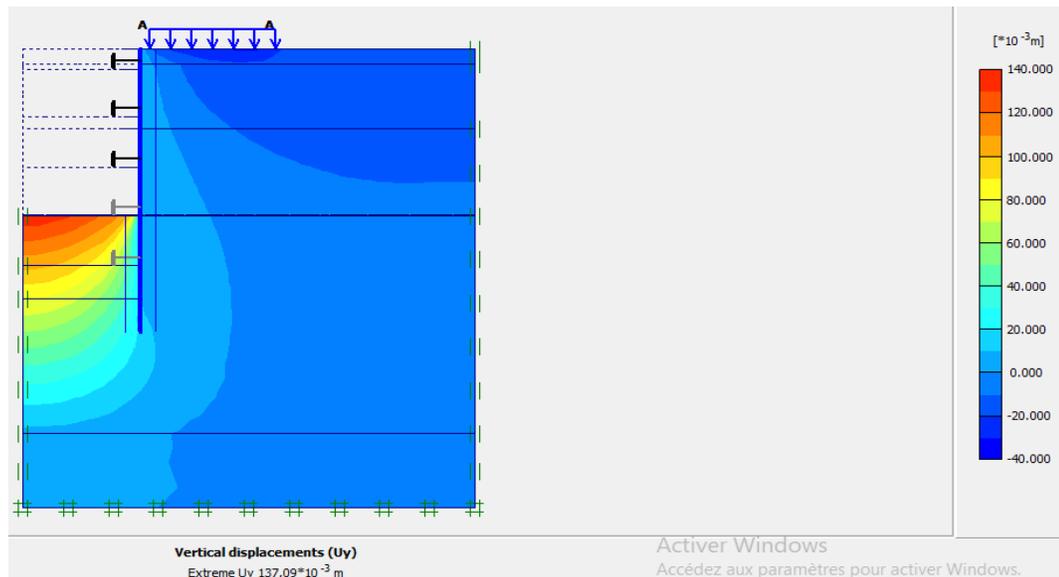


Figure IV.64 : Déplacements verticaux (phase 04).

- Phase N° 05

L'excavation s'effectue jusqu'à une profondeur égale à 25,92m avec la mise en place du 5<sup>ème</sup> buton. La modélisation est représentée par la figure IV.65

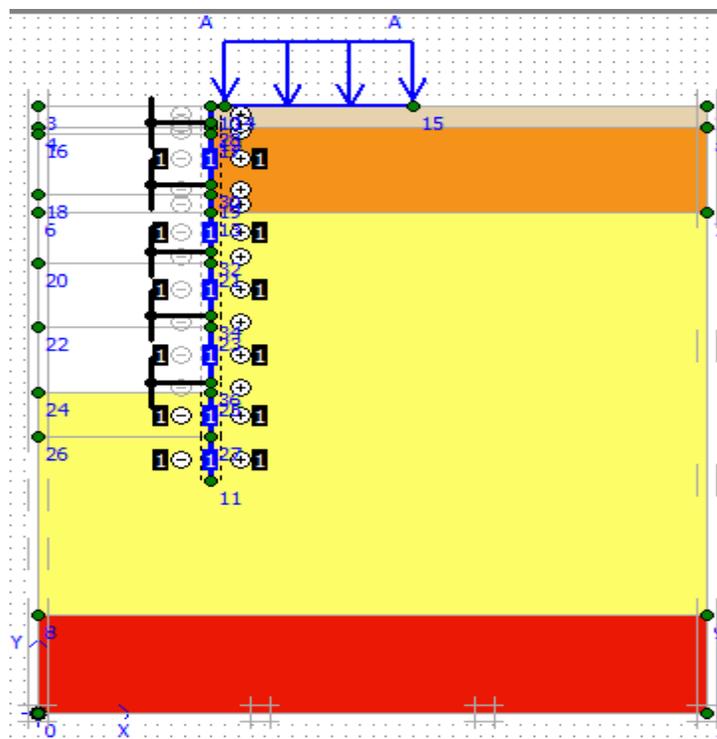


Figure IV.65 : Modélisation de la 5<sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.

#### ✓ Déplacements

La figure IV.66 représente le schéma de la déformée de la structure (paroi moulée avec butons) donné par le logiciel Plaxis, les déplacements enregistrés sont comme suit :

- Les déplacements horizontaux  $34,43 \times 10^{-3}$  m.
- Les déplacements verticaux  $146,75 \times 10^{-3}$  m.
- Le déplacement total égal à  $146,75 \times 10^{-3}$  m.

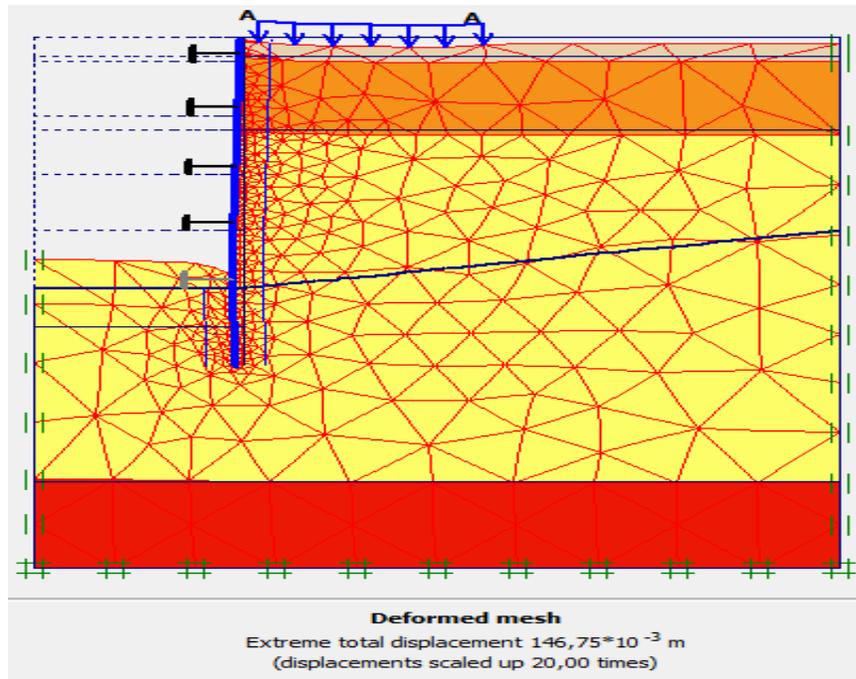


Figure IV.66 : Résultats de déformations de la 5<sup>ème</sup> phase.

✓ Déplacements horizontaux

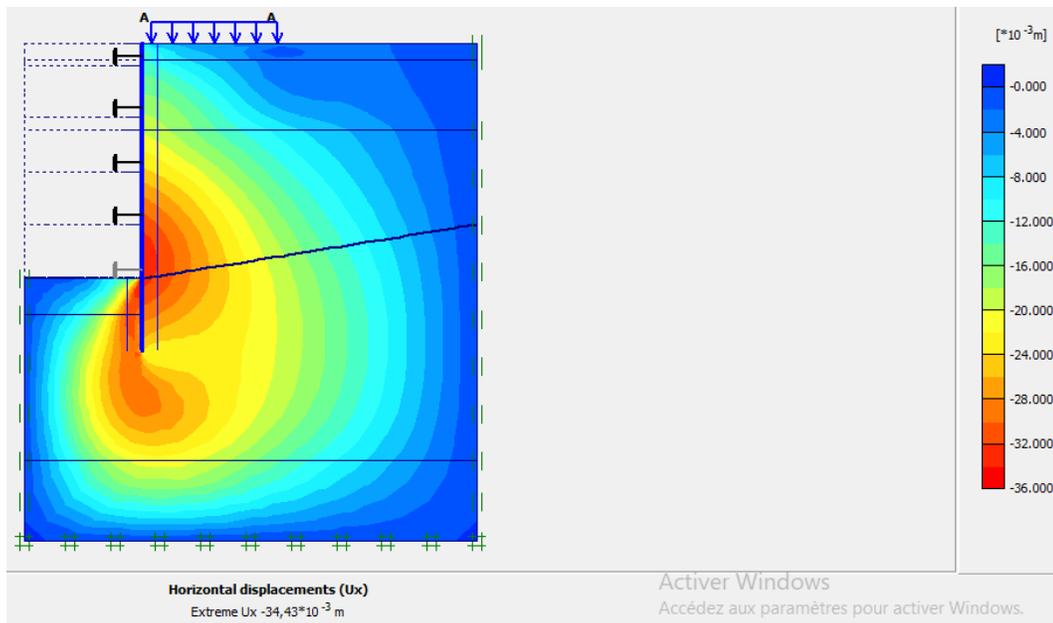


Figure IV.67 : Déplacements horizontaux (phase 05).

✓ Déplacements verticaux

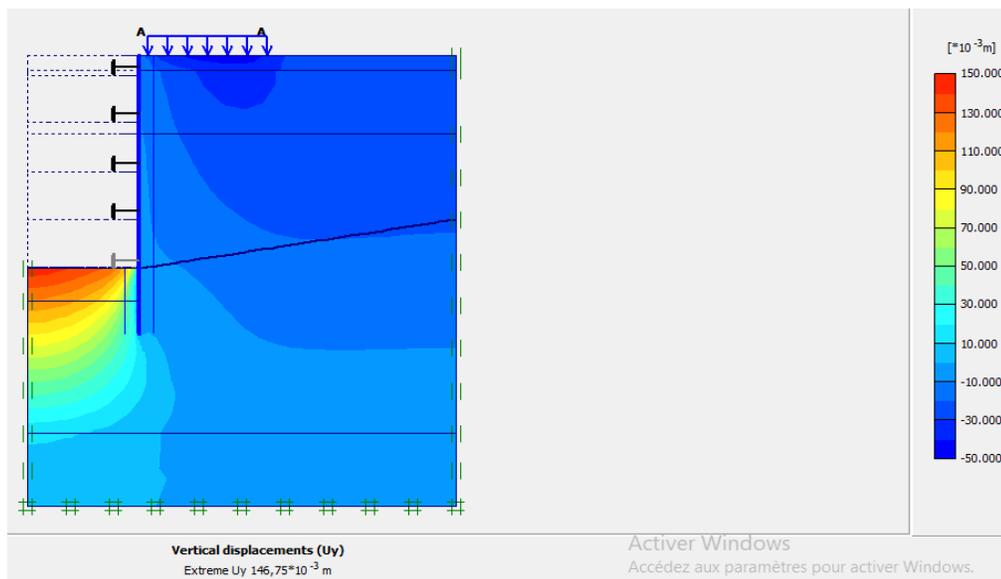


Figure IV.68 : Déplacements verticaux (phase 05).

• Phase N° 06

L'excavation s'effectue jusqu'à une profondeur égale à 30m. La modélisation est représentée par la figure IV.69.

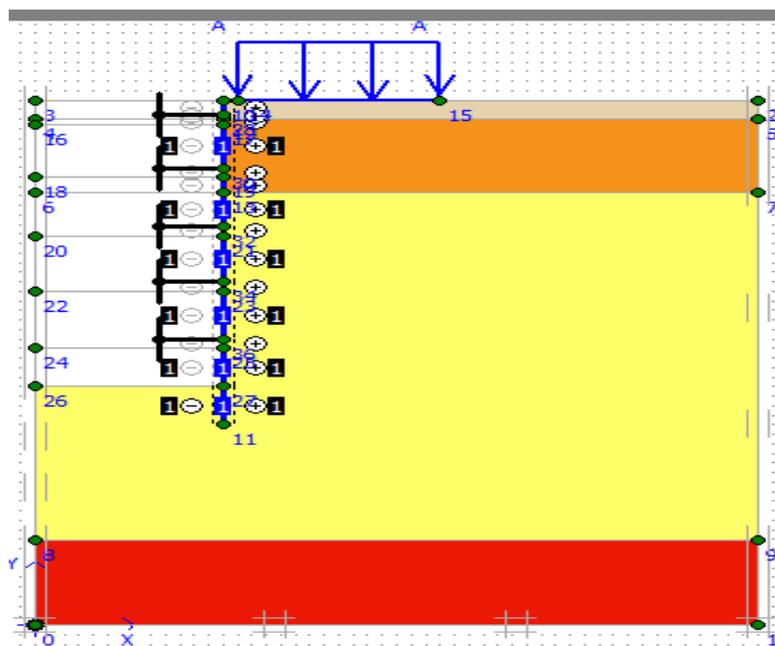
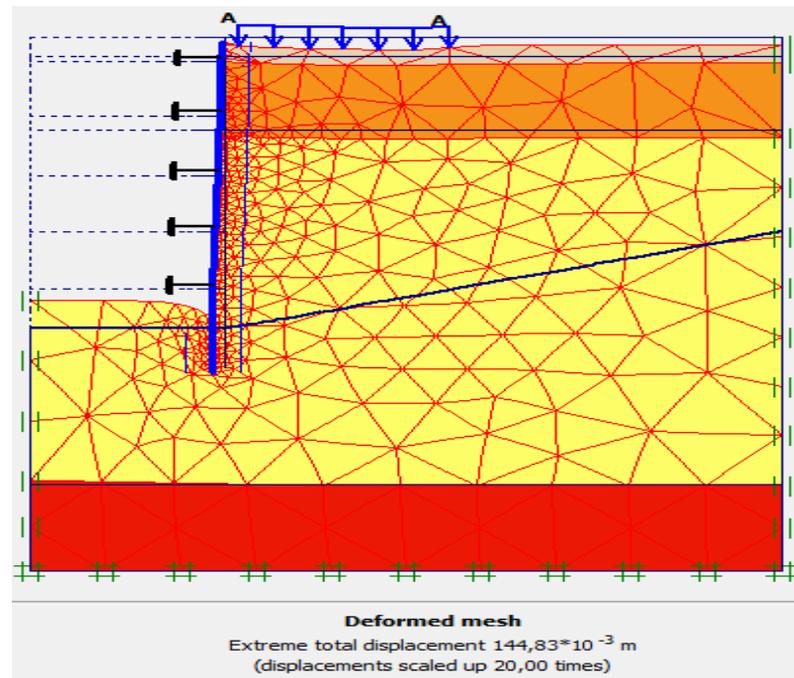


Figure IV.69 : Modélisation de la 6<sup>ème</sup> phase à l'aide du logiciel Plaxis.

✓ **Déplacements**

La figure IV.70 représente le schéma de la déformée de la structure (paroi moulée avec butons) donné par le logiciel Plaxis, les déplacements enregistrés sont comme suit :

- Les déplacements horizontaux  $45,44 \times 10^{-3}$  m.
- Les déplacements verticaux  $144,75 \times 10^{-3}$  m.
- Le déplacement total égal à  $144,83 \times 10^{-3}$  m.



**Figure IV.70** : Résultats de déformations de la 6<sup>ème</sup> phase.

✓ Déplacements horizontaux

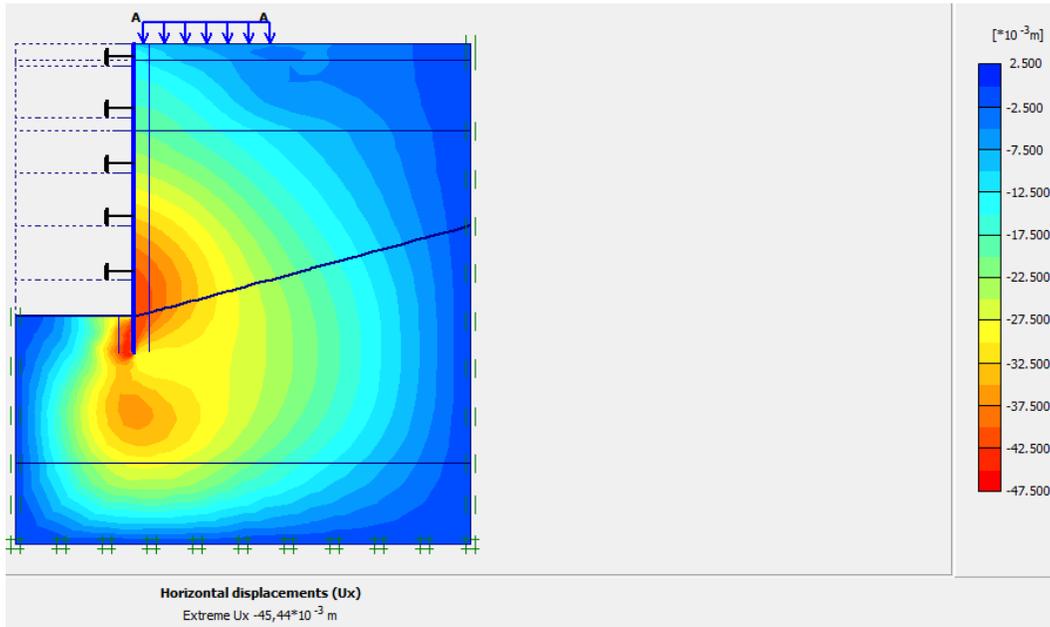


Figure IV.71 : Déplacements horizontaux (phase 06).

✓ Déplacements verticaux

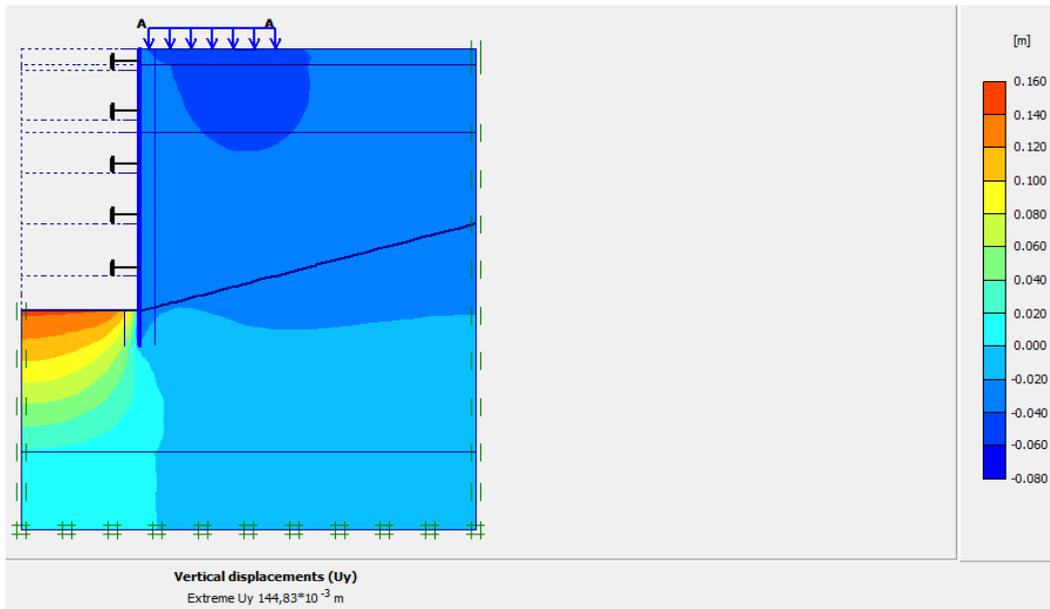
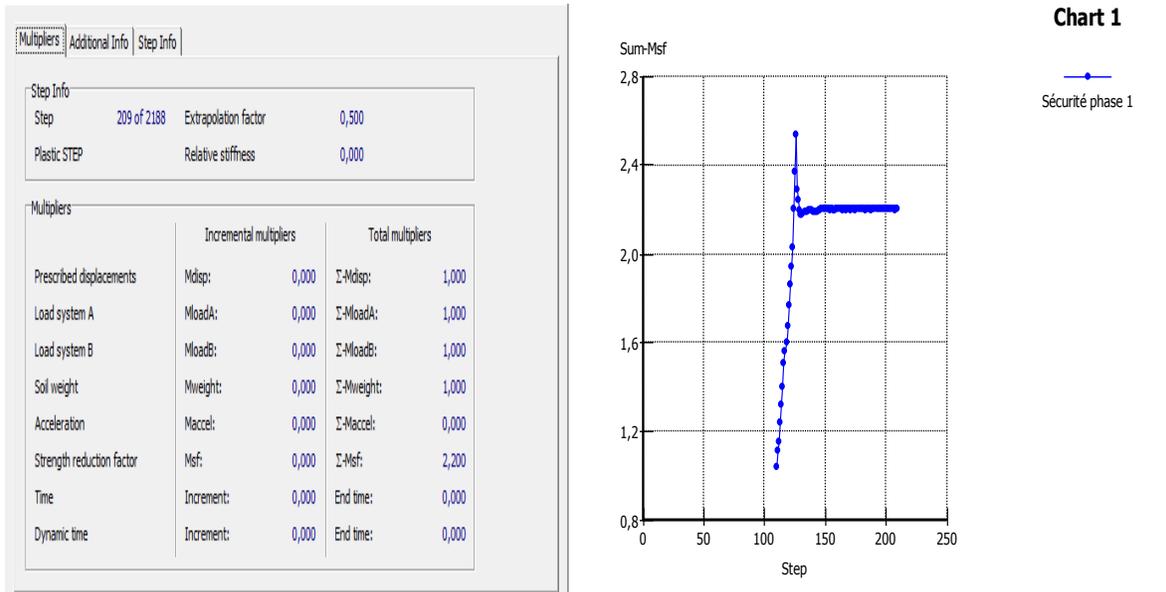


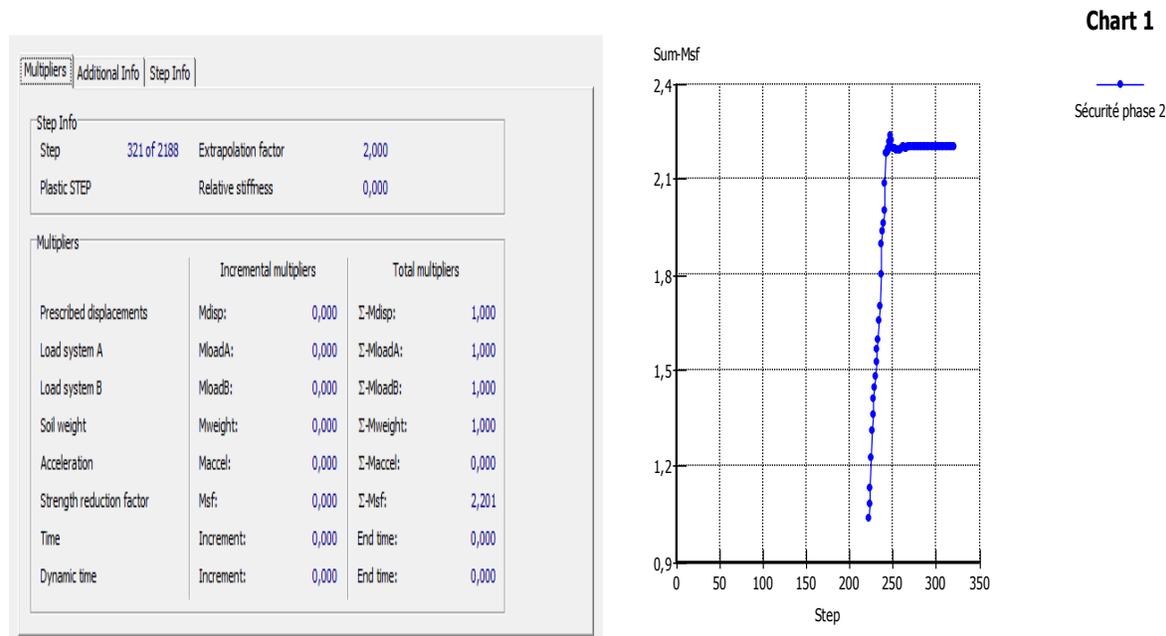
Figure IV.72 : Déplacements verticaux (phase 06).

**IV.5.2.3. Calcul du coefficient de sécurité**

Les coefficients de sécurité calculés par le logiciel Plaxis2D pour les différentes excavations sont données par les figures suivantes :



**Figure IV.73 :** Coefficient de sécurité de la 1<sup>ère</sup> excavation (Paroi moulée avec butons).



**Figure IV.74 :** Coefficient de sécurité de la 2<sup>ème</sup> excavation (Paroi moulée avec butons).

Multipliers		Additional Info		Step Info	
Step Info					
Step	436 of 2188	Extrapolation factor	2,000		
Plastic STEP		Relative stiffness	0,000		
Multipliers					
	Incremental multipliers		Total multipliers		
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ-Mdisp:	1,000	
Load system A	MloadA:	0,000	Σ-MloadA:	1,000	
Load system B	MloadB:	0,000	Σ-MloadB:	1,000	
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ-Mweight:	1,000	
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ-Maccel:	0,000	
Strength reduction factor	Msf:	0,000	Σ-Msf:	2,200	
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000	
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000	

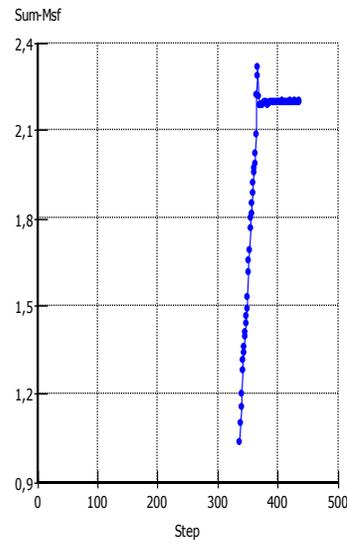


Figure IV.75 : Coefficient de sécurité de la 3<sup>ème</sup> excavation (Paroi moulée avec butons).

Multipliers		Additional Info		Step Info	
Step Info					
Step	994 of 2188	Extrapolation factor	0,500		
Plastic STEP		Relative stiffness	0,000		
Multipliers					
	Incremental multipliers		Total multipliers		
Prescribed displacements	Mdisp:	0,000	Σ-Mdisp:	1,000	
Load system A	MloadA:	0,000	Σ-MloadA:	1,000	
Load system B	MloadB:	0,000	Σ-MloadB:	1,000	
Soil weight	Mweight:	0,000	Σ-Mweight:	1,000	
Acceleration	Maccel:	0,000	Σ-Maccel:	0,000	
Strength reduction factor	Msf:	-0,005	Σ-Msf:	2,197	
Time	Increment:	0,000	End time:	0,000	
Dynamic time	Increment:	0,000	End time:	0,000	

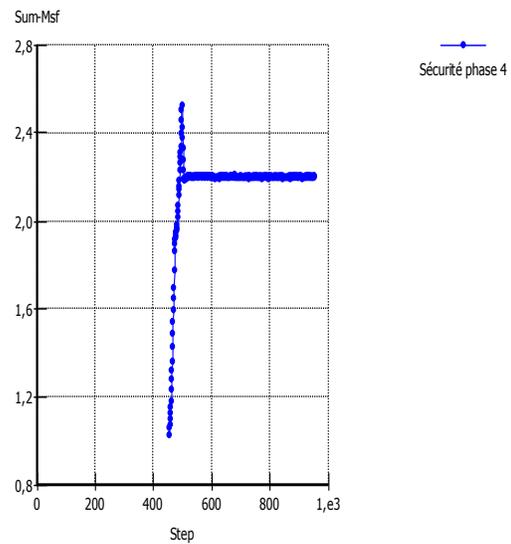


Figure IV.76 : Coefficient de sécurité de la 4<sup>ème</sup> excavation (Paroi moulée avec butons).

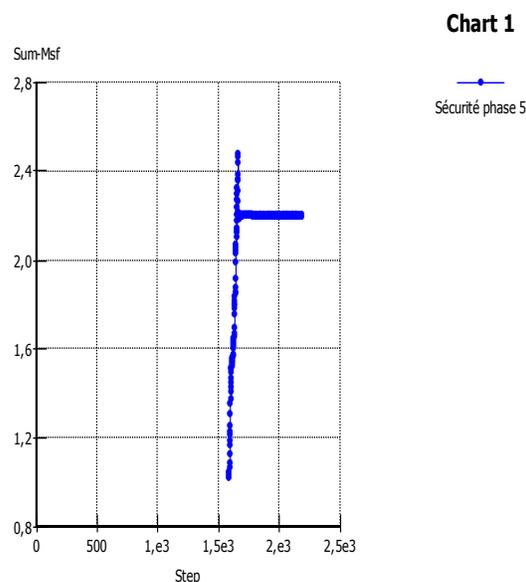
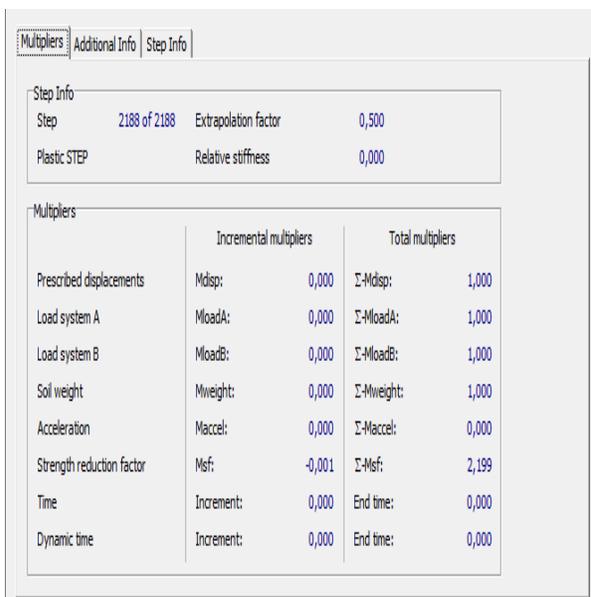


Figure IV.77 : Coefficient de sécurité de la 5<sup>ème</sup> excavation (Paroi moulée avec butons).

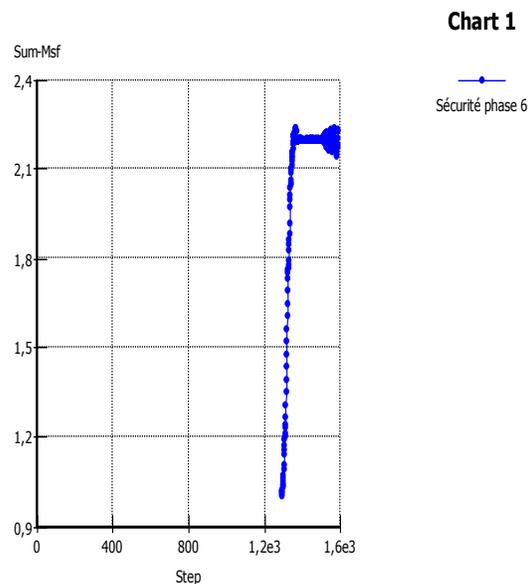
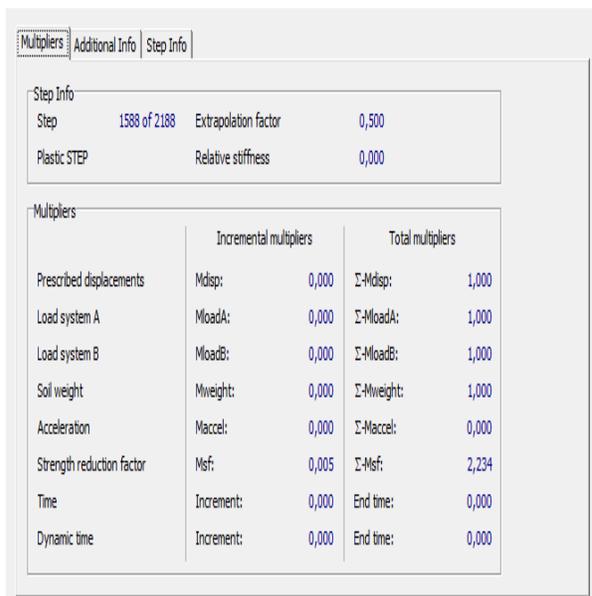


Figure IV.78 : Coefficient de sécurité de la 6<sup>ème</sup> excavation (Paroi moulée avec butons).

### Interprétation des résultats

Les résultats des coefficients de sécurité montrent que la paroi moulée est stable car le Msf est supérieur à 1.5.

Les résultats de la modélisation (Déplacent tota) sont insérés en annexe.

## **IV.6. Estimation du coût des solutions**

Dans cette partie, on estime les coûts des différents types de soutènements (paroi en pieux sécants avec butons et paroi moulée avec butons).

Les prix des matériaux pris dans le calcul sont donnés par :

- **Cosider Géotechnique.**
- **Cosider Construction.**

### **IV.6.1 Coût des pieux sécants**

La section générale correspond à une paroi en pieux de 1.2m de diamètre et 36m de longueur.

- Le prix d'un pieu de 1,2m de diamètre est de 45 000 DA /ml.
- Le coût des pieux = Nombre de pieux× longueur du pieu ×le prix de 1 ml.
- Le coût des pieux = (255× 36 × 45 00)
- **Le coût des pieux = 41 310 000 DA.**

### **IV.6.2 Coût des parois moulées**

La section générale correspond à une paroi moulée de 1.2m d'épaisseur et de 34m de longueur.

- Le prix de la paroi moulée est de 60 000 pour 1m<sup>3</sup> de paroi moulée.
- Le coût des parois moulées = (Volume de la paroi)× le prix de 1m<sup>3</sup>.
- Le coût de la paroi moulée = (306 × 1,2 × 34 × 60 000).
- **Le coût des parois moulée = 749 088 000 DA.**

### **IV.6.3 Coût des poutres de couronnements**

Réalisation de la poutre de couronnement : 1.2m x1m, Fc28=25MPa.

- Le prix de la poutre de couronnement est de 45 000DA/m<sup>3</sup>
- Le coût des poutres de couronnement=( Volume de la poutre)× le prix de 1m<sup>3</sup>.
- Le coût des poutres de couronnement=( 1.2 × 1× 306× 45 000)= 16 524 000 DA
- **Le coût des poutres de couronnement= 16 524 000 DA.**

### **IV.6.4 Coût des butons**

Dans notre cas d'étude, on réalise cinq lignes de butons :

- Le prix d'un buton est de 35 000DA /ml.
  - Le coût des butons = Nombre de butons × longueur de buton × (prix d'un mètre linéaire de buton).
  - Le coût des butons =  $105 \times 20,8 \times 35000$ 
    - **Le coût des butons = 76 440 000 DA.**
- 
- ✓ Le coût de la paroi en pieux avec butons est de : **117 750 000 DA**
  - ✓ Le coût de la paroi moulée avec butons est de : **825 528 000 DA**

### **IV.7. Conclusion**

Sur la base de la modélisation effectuée et des résultats des calculs de la stabilité des deux variantes de solution de soutènement étudié (Paroi en pieux sécants avec butons ; Paroi moulée avec butons), nous retenons ce qui suit :

Pour chacune des deux solutions, un pré-dimensionnement géométrique a été défini suivi par les vérifications des déplacements et de la stabilité vis-à-vis du glissement.

En termes de résultats, les déplacements obtenus sont acceptables. Les déplacements horizontaux, à l'achèvement de l'excavation sont respectivement de 4,35 cm pour la paroi en pieux sécants avec butons et 4,54 cm pour la paroi moulée avec butons. La stabilité vis-à-vis du glissement est vérifiée pour les deux solutions.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié le soutènement provisoire nécessaire à la construction de la station de métro d'Alger Smail Yefsah prévu au niveau de Bab Ezzouar. Sa géométrie nécessite la réalisation d'une fouille de 30 m de profondeur et de section de 127m de longueur et 26m de largeur.

L'objectif est de proposer un soutènement optimal sur le plan technico-économique pour soutenir l'excavation nécessaire à la réalisation de ce projet. L'étude a porté sur deux types d'écrans de soutènement à savoir les pieux sécants et les parois moulées avec introduction d'un système d'appuis horizontaux (les butons).

La première partie du mémoire d'ordre théorique a été dédiée à la présentation d'une revue de lecture et définition des principaux concepts et notions en relation avec le thème étudié.

A l'issue de l'étude géotechnique basée sur l'exploitation des résultats d'essais de laboratoire et in situ, un modèle de sol représentatif a été établi et retenu, dont ses composantes lithologiques sont :

- [0.00m à 1.90m] : Remblai.
- [1.90m à 9.60m] : Limon très plastique.
- [9.60m à 46.10m] : Sable argileux.
- [46.10m à 52.00m] : Argile marneuse.

Sur la base des données hydrogéologiques du site, nous avons constaté que la nappe phréatique est située à 20 m de profondeur.

L'étude des deux solutions proposées ainsi que les calculs ont été effectués par le logiciel Plaxis 2D. Après plusieurs tentatives de pré-dimensionnement et de calculs, la géométrie retenue des deux solutions qui vérifient le seuil de déformation admissible est :

❖ Paroi en pieux sécants avec butons :

- Diamètre du pieu = 1,2 m ;
- Longueur du pieu = 36 m (La fiche d'ancrage = 6 m).

❖ Paroi moulée avec butons :

- Épaisseur = 1,2 m ;
- Profondeur = 34 m (La fiche d'ancrage = 4 m).

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

En termes de résultats, les déplacements obtenus sont acceptables. Les déplacements horizontaux maximaux, à l'achèvement de l'excavation et préalablement à la mise en place du dernier butons sont respectivement de 4,54cm pour la paroi en pieux sécants avec butons et 4,35 cm pour la paroi moulée avec butons.

L'estimation sommaire des coûts des deux solutions nous a orienté à recommander la solution 'Paroi en pieux sécants avec butons'.

La figure IV.79 ésente la coupe lithologique du sol. La nappe phréatique se situe à une profondeur de 20m.

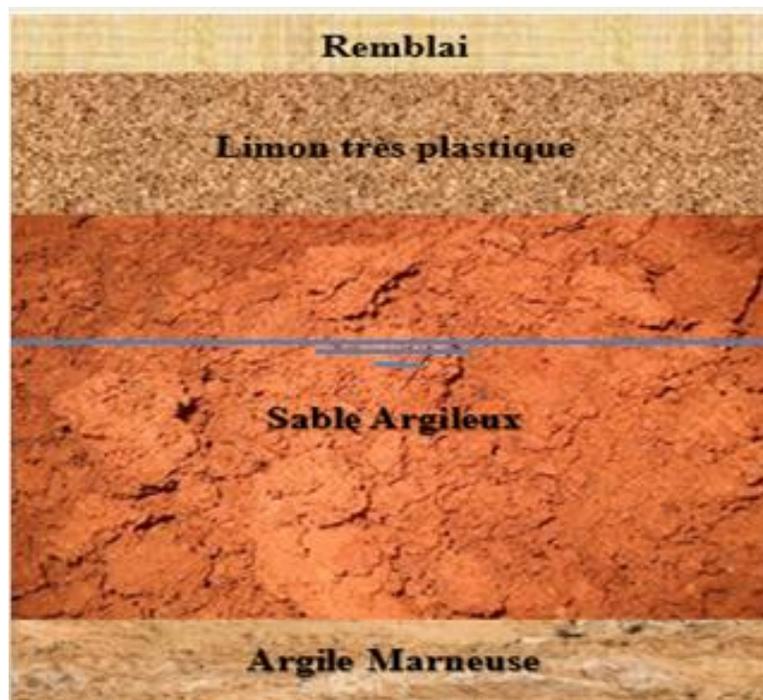


Figure IV.79 : Coupe lithologique



## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## *Références bibliographiques*

- [1] **Chang-Yu, O.** (2006) "Deep Excavation Theory and Practice", Taylor and Francis Group, London, UK.
- [2] **Schlosser F.** (1970) "Murs de soutènements", Technique de l'ingénieur, Traité construction volume. C244. Paris
- [3] **Canadian Geotechnical Society.** (2006) "Canadian Foundation Engineering Manual", 4th edition
- [4] **SaadI, Riadh.** (2018) " Modélisation d'une paroi de soutènement en décrivant la stabilité des tranchées planes et l'effet de la charge sismique sur la paroi". Doctorat.
- [5] **Utter.** (2003) "Techniques d'exécution des parois moulées, parois préfabriquées et tirants d'ancrage". Rueil-Malmaison ; France : Soletanche Bachy. Nut. de Batna 2.
- [6] **Gullati H, Ouazit Y.** (2018) "Étude du puits de ventilation et du Rameau du PV4 Metro OUED SMAR-AEROPORT". Thèse de magister, Université Houari Boumediene.
- [7] **Guide de prévention.** (2021) "Instabilité des terres risques d'éboulement de talus et des ruines d'ouvrages », publication secteur BTP-carrière, n°3.
- [8] **Guide technique.** (2003) " Ouvrages de soutènement recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des parois moulées et préfabriquées", IFSTTAR. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- [9] **Bouafia Ali.** (2003) "Conception et Calcul des Ouvrages Géotechniques", Université Saad Dahlab de Blida.
- [10] **Kramer.S.L.** (1996), "Geotechnical earthquake engineering", Prentice-Hall, New Jersey, pp 466-505.
- [11] **SETRA.** (1983) "Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes". Ouvrage de soutènement MUR 73.
- [12] **Joe M. Turner.** (2009) "Santa Rosa, California. Excavation System Planning, Design and Safety", PE.s.l. : The McGraw-Hill Companies.
- [13] **Balay J. Frank R., Harfouche.** (1982), "Programme DENEbola pour le calcul des soutènements par la méthode des modules de réaction", Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées", pp. 3-12.
- [14] **RPOA.** (2008). "Règles Parasismiques applicables au Domaine des Ouvrages d'Art" Ministère des travaux publics.

## **ANNEXES**

- Annexe A : Logs de sondages carottés
- Annexe B : Résultats des essais pressiométriques
- Annexe C : Granulométrie et classification des sols
- Annexe D : Résultats des essais de cisaillement
- Annexe E : Résultats de la modélisation
- Annexe F : Normes

## Annexe A : Logs de sondages carottés

### Sandage carotté S 33

<b>INGEO International</b> <small>Etudes - Réalisation - Laboratoire géotechnique</small>	<b>RAPPORT DE SONDAGE</b>	déc-13
		N° Sondage : S 33-1
		Feuille 1/3

<b>Projet:</b>	Extension du Metro d'Alger EL HARRACH - AEROPORT International Houari Boumediene (LOT 1)	<b>Profondeur totale</b>	46
<b>Client :</b>	DOHWA	<b>Niveau d'eau</b>	Non trouvé
<b>Lieu</b>	ALGER	<b>Fluide de forage</b>	Eau claire
		<b>Type de machine</b>	Sondeuse hydraulique
		<b>Type de forage</b>	Carottage en rotatif
		<b>Coordonnées</b>	X = 517121.7300 Y = 4063650.8800

<b>Etat des échantillons</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Intact	<input type="checkbox"/> Remanié	<input type="checkbox"/> Paraffiné	<input type="checkbox"/> Roche
------------------------------	--	----------------------------------	------------------------------------	--------------------------------

Profondeur (m)	Niveau p eau	Récupération (%)	RQD (%)	Ø Tubage (m)	Ø Forage (mm)	Echantillons SPT (N1+N2)	Symboles	Description	Caisnes à carottes
1.00				↕ 113 mm	↕ 101 mm	1.6 2.0	█		1
2.00		100 %				33			
3.00						29			
4.00						35			
5.00						R			
6.00									
7.00									
8.00		70 %							2
9.00									
10.00						38			
11.00						43			
12.00									
13.00									
14.00									
15.00									
16.00		65 %				R			3
17.00									
18.00									
19.00									
20.00									
							20,5		

<b>Observations</b>
---------------------



Projet:	Extension du Metro d'Alger EL HARRACH - AEROPORT International Houari Boumediene (LOT 1)
Client :	DOHWA
Lieu	ALGER

Profondeur totale	46
Niveau d'eau	Non trouvé
Fluide de forage	Eau claire
Type de machine	Sondeuse hydraulique
Type de forage	Carottage en rotatif
Coordonnées	

Etat des échantillons	<input checked="" type="checkbox"/> Intact	<input checked="" type="checkbox"/> Remanié	<input type="checkbox"/> Paraffiné	<input type="checkbox"/> Roche
-----------------------	--	---	------------------------------------	--------------------------------

Profondeur (m)	Niveau d'eau	Récupération (%)	RQD (%)	Ø Tubage (m)	Ø Forage (mm)	SPT	Echantillons	Symboles	Description	Caisnes à carottes
21.0		65 %			101 mm	32			Argile carbonatée, de couleur brun jaunâtre, avec passage légèrement graveleux, présence de concrétions carbonatées entre 12,0m et 14,0m de profondeur.	3
22.0				22.2 22.7						
23.0				R						
24.0										
25.0										
26.0		40 %							Grès jaunâtre à blanchâtre, alvéolaire par endroits, avec alternance de passages durs et friables.	4
27.0										
28.0										
29.0										
30.0										
31.0									Sable moyen à fin consolidé à grésifié, renfermant quelques graves et blocs gréseux, brun rouegâtre.	5
32.0										
33.0		45 %								
34.0										
35.0										
36.0										
37.0										
38.0										
39.0										
40.0										

<b>Observations</b>



Projet:	Extension du Metro d'Alger EL HARRACH - AEROPORT International Houari Boumediene (LOT 1)
Client :	DOHWA
Lieu	ALGER

Profondeur totale	46
Niveau d'eau	Non trouvé
Fluide de forage	Eau claire
Type de machine	Sondeuse hydraulique
Type de forage	Carottage en rotatif
Coordonnées	

Etat des échantillons	<input checked="" type="checkbox"/> Intact	<input checked="" type="checkbox"/> Remanié	<input type="checkbox"/> Paraffiné	<input type="checkbox"/> Roche
-----------------------	--	---	------------------------------------	--------------------------------

Profondeur (m)	Niveau d'eau	Récupération (%)	ROD (%)	Ø Tubage (m)	Ø Forage (mm)	Echantillons	SPT	Symboles	Description	Caissons à carottes	
41,0		45 %			101 mm		41		Sable moyen à fin consolidé à grésifié, renfermant quelques graves et blocs gréseux, brun rouegâtre.	5	
42,0											
43,0											
44,0											
45,0											
46,0											34

Observations
--------------

## ✚ Sandage carotté S 34

 <b>INGEO International</b> Etudes - Réalisation - Laboratoire géotechnique	<b>RAPPORT DE SONDAGE</b>	juin-13
		N° Sondage : S 34
		Feuille 1/2

<b>Projet:</b>	Extension du Metro d'Alger EL HARRACH - AEROPORT International Houari Boumediene (LOT 1)	<b>Profondeur totale</b>	31
<b>Client :</b>	DOHWA	<b>Niveau d'eau</b>	Non trouvé
<b>Lieu</b>	ALGER	<b>Fluide de forage</b>	Eau claire
		<b>Type de machine</b>	Sondeuse hydraulique
		<b>Type de forage</b>	Carottage en rotatif
		<b>Coordonnées</b>	X : 517147.09 Y : 4063606.82

<b>Etat des échantillons</b>	 Intact	 Remanié	 Paraffiné	 Roche
------------------------------	--	---	--	---

Profondeur (m)	Niveau d'eau	Récupération (%)	ROD (%)	Ø Tubage (m)	Ø Forage (mm)	SPT (N1+N2)	Echantillons	Symboles	Description	Caisnes à carottes		
1,00				113 mm	101 mm				0,5 Terre végétale: Argile rougeâtre.			
2,0							1,70			Argile brunâtre à quelques taches brunes foncées, carbonatées et peux plastiques.		
3,0							2,00	10				
4,0										4,2 Argile brun-gris plastique.		
5,0							5,60	14				
6,0		100 %					6,00			Argile gris-ocre moyennement compacte.		
7,0										7,0 Argile graveleuse, sableuse, brun-ocre.		
8,0							7,9					
9,0							8,2	31			8,5 Argile sableuse rougeâtre.	
10,0												
11,0							10,7	30			11,0 Argile carbonatée brun-jaunâtre avec présence de graves.	
12,0							11,0					
13,0									12,5 Sable argileux brun-jaune.			
14,0												
15,0												
16,0									16,0 Sable argileux compact.			
17,0		70 %							17,0 Grès tendre, fin, de couleur beige, légèrement carbonaté.			
18,0									18,0 Sable argilo-graveleux, jaune.			
19,0									18,6 Grès fin, beige.			
20,0									19,0 Sable fin, légèrement argileux, avec passage grésifié épais d'environ 45 cm.			
20,5												

<b>Observations</b>

<b>Projet:</b>	Extension du Metro d'Alger EL HARRACH - AEROPORT International Houari Boumediene (LOT 1)	<b>Profondeur totale</b>	31
<b>Client :</b>	DOHWA	<b>Niveau d'eau</b>	Non trouvé
<b>Lieu</b>	ALGER	<b>Fluide de forage</b>	Eau claire
		<b>Type de machine</b>	Sondeuse hydraulique
		<b>Type de forage</b>	Carottage en rotatif
		<b>Coordonnées</b>	

<b>Etat des échantillons</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Intact	<input checked="" type="checkbox"/> Remanié	<input checked="" type="checkbox"/> Paraffiné	<input type="checkbox"/> Roche
------------------------------	--	---	---	--------------------------------

Profondeur (m)	Niveau d'eau	Récirculation (%)	RQD (%)	Ø Tubage (m)	Ø Forage (mm)	Echantillons	SPT	Symboles	Description	Caisnes à carottes	
21,0					 101 mm				Sable fin, légèrement argileux, avec passage grésifié épais d'environ 45 cm.		
22,0											
23,0							37				
24,0											
25,0							R				
26,0	70 %										
27,0							36				
28,0											
29,0							32				
30,0											
31,0						R					
32,0									<b>FIN DU SONDAGE</b>		
33,0											
34,0											
35,0											
36,0											
37,0											
38,0											
39,0											
40,0											

<b>Observations</b>
---------------------

		<b>RAPPORT DE FORAGE</b>											
<b>Projet : METRO D'ALGER TRONCON EL HARRACHE AEROPORT</b>		<b>Dossier N° :</b>											
<b>Endroit : Station Beb Ezzouar - SMAIL YEFSAH</b>		<b>Client : COSIDER M28</b>											
Date début : 05-11-2015 Date fin : 10-11-2015 Profondeur forée (m) : 52 Niveau d'eau (m) : 20,10		Coordonnées GPS: X : Y : Z :											
Boue de forage : EAU CLAIRE Type forage : CAROTTE Foreuse : SM 8G		Etat des échantillons : Intact <input type="checkbox"/> Remanié <input type="checkbox"/> Paraffiné <input type="checkbox"/> Roche <input type="checkbox"/>											
Echelle (m)	Elévation (m) Profondeur (m)	Récupération 25 50 75 100	SPT (N1 + N2)	ROD	Tubage	Carottier	Etat	Profondeur Echantillon	Niveau d'eau	Symboles	DESCRIPTION	ESSAIS DE LABORATOIRE	
1.5	-1.50	85 %	7			SPT		1.50			Terre végétale		
1.50	1.50							1.95					
3.0	-3.00	100 %	10			SPT		3.00			Argile limoneuse sableuse peu graveleuse brunatre		
3.00	3.00							3.50					
4.5	-5.00	95 %	12			SPT		4.00			Argile avec trace de limons vaseuse grisatre à nuence noiratre		
4.50	4.50							4.50					
5.0	5.00							5.00					
6.0	-7.00	100 %	24			SPT		6.00			Argile limoneuse peu sableuse avec trace de graviers grisatre		
6.00	6.00							6.45					
7.5	7.00							7.50					
7.50	7.00	98 %	33			SPT		7.95			Sable limoneux peu argileux marron claire à rougeatre		
9.0	-9.50							9.00					
9.00	9.50		32			SPT		9.45			Grès sain à fissuré blanchatre à jaunatre claire		
10.5	-10.50	94 %	60			SPT		10.50					
10.50	10.50							10.95					
12.0			60			SPT		12.00					
12.00		90 %	60			CR		12.45			Grès lumachellique sain à fissuré blanchatre à jaunatre claire		
13.5			60			SPT		13.50					
13.50								13.95					
15.0	-15.00		60			SPT		15.00			Grès friable broyé fissuré sous forme de fraguements jaunatre		
15.00	15.00							15.45					
16.5			60			SPT		16.50					
16.50		94 %						16.95					
18.0	-18.00		60			SPT		18.00					
18.00	18.00							18.45					
19.5			60			SPT		19.50			Sable peu limoneux fin à moyen de couleur jaunatre		
19.50		86 %						19.95					
21.0	-21.00		44			SPT		21.00			Sable avec trace de limons et trace de gravles jaunatre		
21.00	-21.00	90 %						21.45					
22.5	21.80		60			SPT		22.50			Sable consolidé sain à fissuré de couleur jaunatre		
22.50		86 %						22.95					
24.0	-24.00		60			SPT		24.00			Grès lumachellique broyé fraguementé jaunatre		
24.00	24.00							24.45					
25.5	-25.50		60			SPT		24.45					
25.50	25.50										Fin du forage à une profondeur de 52 m.		
<b>REMARQUES :</b> * SPT : Pour les SPT à 60 coups la pénétration est inférieure à 45cm * le niveau d'eau est la dernière lecture d'eau dans le sondag										<b>TYPE CAROTTIER :</b> CF : Carottier fendu TM : Tube à paroi mince PS : Tube à position fixe CR : Tube carottier		<b>ABREVIATIONS :</b> AG : Analyse granulométrique S : Sedimentométrie L : Limites d'Aterberg(WL,IP) W : Teneur en eau PV : Poids volumique(Gs, Gm) AC : Analyse chimique CIB : Cisaillement rectiligne TR : Cisaillement Triaxial Rc : Résistance à la compression OED : Essai oedométrique GL : Gonflement libre R : Refus à l'enfoncement	
Préparé par : Mr BENDJAM					Vérifié par :					16/11/2015		Page : 1 de 3	

Projet : METRO D'ALGER TRONCON EL HARRACHE AEROPORT  
 Endroit : Station Beb Ezzouar - SMAIL YEFSAH

Dossier N° :  
 Client : COSIDER M28

Date début : 05-11-2015  
 Date fin : 10-11-2015  
 Profondeur forée (m) : 52  
 Niveau d'eau (m) : 20,10

Coordonnées GPS:  
 X :  
 Y :  
 Z :

Boue de forage : EAU CLAIRE  
 Type forage : CAROTTE  
 Foreuse : SM 8G

Etat des échantillons :

Intact  Remanié  Paraffiné  Roche

Echelle (m)	Élévation (m) Profondeur (m)	Récupération 25 50 75 100	SPT (Nf + Nz)	ROD	Tubage	Carottier	Etat	Profondeur Échantillon	Niveau d'eau	Symboles	DESCRIPTION	ESSAIS DE LABORATOIRE
27.0	-26.50 26.50	75 %	80		113	SPT		25.95			Sable limoneux caillouteux marron clair	
28.5	-27.00 27.00	90 %	42			SPT		27.00 27.45			Sable grossier peu limoneux graveleux brunâtre	
30.0	-28.50 28.50	90 %	80			SPT		28.80 29.95				
31.5	-30.00 30.00	96 %	42			SPT		30.00 30.45				
33.0	-30.50 30.50	96 %	80			SPT		31.88 31.83			Sable consolidé sain à fissuré broyé par endroit de couleur jaunâtre	
34.5	-33.00 33.00	80 %	60			SPT		33.00 33.45			Grès broyé sous forme de graviers jaunâtre	
36.0	-34.50 34.50	85 %	52			SPT		34.50 34.95			Sable consolidé sain à fissuré broyé par endroit de couleur jaunâtre	
37.5	-36.00 36.00	75 %	80			SPT		36.00 36.45			Sable limoneux graveleux de couleur jaunâtre	
39.0	-37.50 37.50	75 %	80			SPT		37.50 37.95			Grès sain à fissuré blanchâtre à jaunâtre clair	
40.5	-39.00 39.00	96 %	40			CR SPT		39.00 39.45				
42.0	-39.20 39.20	96 %	80			SPT		40.50 40.95			Marne peu limoneuse avec trace de sable	
43.5	-43.60 43.60	95 %	80			SPT		43.50 43.95 44.27				
45.0	-45.00 45.00	95 %	34			SPT		44.78 45.00				
46.5	-45.50 45.50	95 %	42			SPT		45.45 46.10 46.90			Marne peu limoneuse peu sableuse de couleur grisâtre à verdâtre	
48.0	-46.50 46.50	95 %	52			SPT		46.95 48.00 48.45			Argile limoneuse sableuse avec trace de marne	
49.5	-48.00 48.00	90 %	80			SPT		48.00 48.45			Sable fin à moyen avec trace de limon jaunâtre	
51.0	-50.70 50.70 51.00	95 %						49.80 49.95				
Marne peu limoneuse de couleur grisâtre à verdâtre Fin du forage à une profondeur de 52 m.												

<p><b>REMARQUES :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* SPT : Pour les SPT à 60 coups la pénétration est inférieure à 45cm</li> <li>* le niveau d'eau est la dernière lecture d'eau dans le sondage</li> </ul>	<p><b>TYPE CAROTTIER :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>CF : Carottier fendu</li> <li>TM : Tube à paroi mince</li> <li>PS : Tube à position fixe</li> <li>CR : Tube carottier</li> </ul>	<p><b>ABREVIATIONS :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>AG : Analyse granulométrique</li> <li>S : Sédimentométrie</li> <li>L : Limites d'Atterberg(WL, IP)</li> <li>W : Teneur en eau</li> <li>PV : Poids volumique(Ds, G)</li> <li>AC : Analyse chimique</li> <li>CIS : Cisaillement rectiligne</li> <li>TR : Cisaillement Triaxial</li> <li>Rc : Résistance à la compression</li> <li>OED : Essai oedométrique</li> <li>GL : Gonflement libre</li> <li>R : Refus à renforcement</li> </ul>
Préparé par : Mr BENDIMAM	Vérifié par :	16/11/2015

Projet : METRO D'ALGER TRONCON EL HARRACHE AEROPORT  
 Endroit : Station Beb Ezzouar - SMAIL YEF SAH

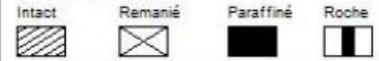
Dossier N° :  
 Client : COSIDER M28

Date début : 05-11-2015  
 Date fin : 10-11-2015  
 Profondeur forée (m) : 52  
 Niveau d'eau (m) : 20,10

Coordonnées GPS:  
 X :  
 Y :  
 Z :

Boue de forage : EAU CLAIRE  
 Type forage : CAROTTE  
 Foreuse : SM 8G

Etat des échantillons :



Echelle (m)	Élévation (m) Profondeur (m)	Récupération 25 50 75 100	SPT (N1 + N2)	ROD	Tubage	Carottier	État	Profondeur Échantillon	Niveau d'eau	Symboles	DESCRIPTION	ESSAIS DE LABORATOIRE
	-52.00		40					51.45			Marne peu limoneuse de couleur grisâtre à verdâtre	
	52.00										Fin du forage à une profondeur de 52 m.	
52.5												
54.0												
55.5												
57.0												
58.5												
60.0												
61.5												
63.0												
64.5												
66.0												
67.5												
69.0												
70.5												
72.0												
73.5												
75.0												
76.5												

<b>REMARQUES :</b> * SPT : Pour les SPT à 60 coups la pénétration est inférieure à 45cm * le niveau d'eau est la dernière lecture d'eau dans le sondage	<b>TYPE CAROTTIER :</b> CF : Carottier fendu TM : Tube à paroi mince PS : Tube à position fixe CR : Tube carottier	<b>ABREVIATIONS :</b> AG : Analyse granulométrique S : Sedimentométrie L : Limites d'Atterberg(WL, IP) W : Teneur en eau PV : Poids volumique(Gd, Gh) AC : Analyse chimique CIS : Cisaillement rectiligne TR : Cisaillement Triaxial Rc : Résistance à la compression OED : Essai oedométrique GL : Gonflement libre R : Refus à l'enfoncement	
Préparé par : Mr BENDJAM	Vérifié par :	16/11/2015	Page : 3 de 3

Sandage carotté SC 68

Echelle (m)		Récupération		SPT (N1 + N2)	ROD	Tubage	Carottier	État	Profondeur Echantillon	Niveau d'eau	Symboles	DESCRIPTION	ESSAIS DE LABORATOIRE
Elévation (m)	Profondeur (m)	25	50										
-0.80	0.80	50 %							1.00			Terre Végétale	
1.5	2.50	90 %		10			SPT		1.46			Argile peu limoneuse grisâtre à brunâtre mole avec trace de graviers	
3.0	4.30	76 %		40			SPT		2.50			Argile limoneuse brunâtre à nuance noirâtre mole avec trace de graviers	
4.5	5.50			19			SPT		4.00			Argile vaseuse peu graveleuse noirâtre avec présence de matière organique	
6.0	6.50	65 %		9			SPT		5.50				
7.5	7.50			12			SPT		7.00			Sable limoneux graveleux jaunâtre à marron clair	
9.0	8.70	70 %		12			SPT		8.50				
10.5	10.30	65 %		41			SPT		10.00			Sable argileux limoneux mole grisâtre à nuance noirâtre	
12.0	11.50	55 %		80			SPT		11.50			Passage de grès sous forme de graviers	
13.5	11.80	70 %		80			CR		12.35			Argile limoneuse sableuse avec trace de graviers rougeâtre	
15.0	13.30	75 %		80			SPT		13.00			Sable limoneux peu argileux jaunâtre à marron clair avec un petit passage de grès broyé	
16.5	13.30			80			SPT		13.45				
18.0	15.70	75 %		22			SPT		14.80			Sable argileux limoneux avec trace de graviers de couleur rougeâtre	
19.5	17.50	95 %		80			SPT		16.00			Sable limoneux peu argileux avec trace de graviers marron clair à foncé	
21.0	17.50			80			SPT		16.45				
22.5	20.50	85 %		80			SPT		17.50			Grès friable fissuré broyé sous forme de fraguement par endroit	
24.0	20.50			80			SPT		17.95				
25.5	25.30	85 %		80			SPT		19.00			Sable grossiers limoneux brunâtre	
	25.50			80			SPT		19.45			Fin du forage à une profondeur de 52 m.	

**REMARQUES :**  
 - SPT : Pour les SPT à 60 coups la pénétration est inférieure à 45cm  
 \* le niveau d'eau est la dernière lecture d'eau dans le sondage

**TYPE CAROTTIER :**  
 CF : Carottier fendu  
 TM : Tube à paroi mince  
 PS : Tube à position fixe  
 CR : Tube carottier

**ABREVIATIONS :**  
 AG : Analyse granulométrique  
 B : Bétonomètre  
 L : Limites d'Atterberg (WL, LP)  
 W : Teneur en eau  
 PV : Poids volumique (Gd, Gh)  
 AC : Analyse chimique  
 CIS : Cisaillement rectiligne  
 TR : Cisaillement Triaxial  
 Rc : Résistance à la compression  
 OED : Essai oedométrique  
 GL : Gonflement libre  
 R : Retus à renforcement

Préparé par : Mr BENDIMAM      Vérifié par :      09/11/2015      Page : 1 de 3

Projet : METRO D'ALGER TRONCON EL HARRACHE AEROPORT  
Endroit : Station Beb Ezzouar - SMAIL YEFSAH

Dossier N° :  
Client : COSIDER M28

Date début : 26-10-2015  
Date fin : 03-11-2015  
Profondeur forée (m) : 52  
Niveau d'eau (m) : 14,20

Coordonnées GPS:  
X :  
Y :  
Z :

Boue de forage : EAU CLAIRE  
Type forage : CAROTTE  
Foreuse : SM 8G

Etat des échantillons :  
Intact  Remanié  Paraffiné  Roche 

Echelle (m)	Elevation (m)	Profondeur (m)	Récupération				SPT (N1 + N2)	RQD	Tubage	Carottier	Etat	Profondeur Echantillon	Niveau d'eau	Symboles	DESCRIPTION	ESSAIS DE LABORATOIRE
			25	50	75	100										
	-26.50	26.50	35 %				60		SPT		26.50			Sable grossiers limoneux brunatre		
27.0	26.50	26.95	30 %				60		SPT		26.95			Grès sain à fissuré jaunatre claire à brunatre		
28.5	28.00	28.45	30 %				60		SPT		28.45			Sable consolidé fissuré broyé de couleur marron claire		
30.0	29.50	29.95	30 %				60		SPT		29.95			Sable limoneux avec trace d'argile et trace de graviers marron claire à jaunatre		
31.5	31.00	31.45	35 %				60		SPT		31.45			Sable consolidé sain à fissuré broyé par endroit de couleur marron claire		
33.0	32.50	32.95	30 %				52		SPT		32.95			Conglomérats poudingue fissuré broyé par endroit		
34.5	34.00	34.45	30 %				60		SPT		34.45			Grès sain à fissuré de couleur marron claire		
36.0	35.50	35.95	30 %				60		SPT		35.95			Conglomérats poudingue à ciment carbonaté sain à fissuré jaunatre		
37.5	37.00	37.45	30 %				60		SPT		37.45			Grès sain à fissuré jaunatre à marron claire		
39.0	38.50	38.95	30 %				60		SPT		38.95			Sable consolidé avec présence de grès sous forme de cailloux marron claire		
40.5	40.00	40.45	30 %				60		SPT		40.45			Marne avec trace de limon grisatre		
42.0	41.50	41.95	30 %				60		SPT		41.95			Marne avec trace de limon et trace de sable grisatre		
43.5	43.00	43.45	30 %				60		SPT		43.45			Marne avec peu de sable grisatre		
45.0	44.50	44.95	35 %				60		SPT		44.95			Fin du forage à une profondeur de 52 m.		
46.5	46.00	46.45	35 %				60		SPT		46.45					
48.0	47.50	47.95	35 %				46		SPT		47.95					
49.5	49.00	49.45	35 %				57		SPT		49.45					
51.0	50.50	50.95	35 %				50		SPT		50.95					

**REMARQUES :**

\* SPT : Pour les SPT à 60 coups la pénétration est inférieure à 45cm

\* le niveau d'eau est la dernière lecture d'eau dans le sondage

**TYPE CAROTTIER :**

CF : Carottier fendu  
TM : Tube à paroi mince  
PS : Tube à position fixe  
CR : Tube carottier

**ABREVIATIONS :**

AG : Analyse granulométrique  
S : Sédimentométrie  
L : Limites d'Aterberg(WL, IP)  
W : Teneur en eau  
PV : Poids volumique(Gs, Gm)  
AC : Analyse chimique  
OIS : Cisaillement rectiligne  
TR : Cisaillement Triaxial  
Rc : Résistance à la compression  
OED : Essai oedométrique  
GL : Gonflement libre  
R : Refus à l'enfoncement

Préparé par : Mr BENDIMA.M

Vérifié par :

09/11/2015

Page : 2 de 3

Projet : METRO D'ALGER TRONCON EL HARRACHE AEROPORT  
Endroit : Station Beb Ezzouar - SMAIL YEFSAH

Dossier N° :  
Client : COSIDER M28

Date début : 26-10-2015  
Date fin : 03-11-2015  
Profondeur forée (m) : 52  
Niveau d'eau (m) : 14,20

Coordonnées GPS:  
X :  
Y :  
Z :

Boue de forage : EAU CLAIRE  
Type forage : CAROTTE  
Foreuse : SM 8G

Etat des échantillons :

Intact  Remanié  Paraffiné  Roche

Echelle (m)	Élévation (m)	Profondeur (m)	Récupération	SPT (N1 + N2)	RCD	Tubage	Carottier	État	Profondeur Echantillon	Niveau d'eau	Symboles	DESCRIPTION	ESSAIS DE LABORATOIRE
	-51.50		96 %										
	-51.50		90 %										
	52.00			60			SPT	X	52.00 52.45			Marne avec peu de sable grisâtre limoneuse peu caillouteuse peu graveleuse grisâtre à verdâtre	
	52.5											Fin du forage à une profondeur de 52 m.	
	54.0												
	55.5												
	57.0												
	58.5												
	60.0												
	61.5												
	63.0												
	64.5												
	66.0												
	67.5												
	69.0												
	70.5												
	72.0												
	73.5												
	75.0												
	76.5												

REMARQUES :

\* SPT : Pour les SPT à 60 coups la pénétration est inférieure à 45cm  
\* le niveau d'eau est la dernière lecture d'eau dans le sondage

TYPE CAROTTIER :

CF : Carottier fendu  
TM : Tube à paroi mince  
PS : Tube à position fixe  
CR : Tube carottier

ABREVIATIONS :

AG : Analyse granulométrique  
S : Sédimentométrie  
L : Limites d'Atterberg(WL, IP)  
W : Teneur en eau  
PV : Poids volumique(30, 0h)  
AC : Analyse chimique  
CIS : Cisaillement rectiligne  
TR : Cisaillement Triaxial  
Rc : Résistance à la compression  
OED : Essai oedométrique  
GL : Gonflement libre  
R : Refus à l'enfoncement



Projet : METRO D'ALGER TRONCON EL HARRACHE AEROPORT  
 Endroit : Station Beb Ezzouar - SMAIL YEFSAH

Dossier N° :  
 Client : COSIDER M28

Date début : 27-10-2015  
 Date fin : 02-11-2015  
 Profondeur forée (m) : 52  
 Niveau d'eau (m) : 20,80

Coordonnées GPS:  
 X :  
 Y :  
 Z :

Boue de forage : EAU CLAIRE  
 Type forage : CAROTTE  
 Foreuse : SM 8G

Etat des échantillons :  
 Intact  Remanié  Paraffiné  Roche

Echelle (m)	Elevation (m)	Profondeur (m)	Récupération				SPT (N1 + N2)	RQD	Tubage	Carottier	Etat	Profondeur Echantillon	Niveau d'eau	Symboles	DESCRIPTION	ESSAIS DE LABORATOIRE
			25	50	75	100										
27.0	-27.00	27.00	75 %			60	85		SPT		25.95	26.00	○ ○ ○ ○ ○ ○	Conglomérats poudingue à ciment carbonaté broyé sous forme de fraguements		
28.5	-27.00	27.00	80 %			60			SPT		27.00	27.45	● ● ● ● ● ●	Grès lumachellique fissuré broyé sous forme de fraguements marron clair		
30.0	-29.50	29.50	90 %			60	85		SPT		28.50	28.95	● ● ● ● ● ●	Grès sain à fissuré friable de couleur marron clair		
31.5	-31.50	31.50	90 %			60	85		SPT		30.00	30.45	● ● ● ● ● ●	Grès sain à fissuré friable de couleur marron clair		
33.0	-33.00	33.00	86 %			60			SPT		31.50	31.95	○ ○ ○ ○ ○ ○	Sable peu limoneux avec trace de graviers jaunâtre		
34.5	-33.00	33.00	90 %			60	85		SPT		33.00	33.45	● ● ● ● ● ●	Sable consolidé sain à fissuré de couleur jaunâtre		
36.0	-34.50	34.50	90 %			60	85		SPT		34.12	34.48	● ● ● ● ● ●	Grès lumachellique sous forme de graviers de couleur marron clair à brunâtre		
37.5	-36.00	36.00	90 %			60			SPT		34.95	36.00	● ● ● ● ● ●	Grès lumachellique sous forme de graviers de couleur marron clair à brunâtre		
39.0	-37.00	37.00	96 %			60			SPT		36.00	36.45	○ ○ ○ ○ ○ ○	Sable peu limoneux avec trace de graviers jaunâtre		
40.5	-39.00	39.00	80 %			60			CR		37.50	37.95	○ ○ ○ ○ ○ ○	Grès lumachellique broyé sous forme de graviers de couleur jaunâtre clair		
42.0	-39.00	39.00	80 %			60			SPT		39.00	39.45	● ● ● ● ● ●	Grès lumachellique broyé sous forme de graviers de couleur jaunâtre clair		
43.5	-42.00	42.00	80 %			60	85		SPT		40.50	40.95	○ ○ ○ ○ ○ ○	Grès lumachellique sain à fissuré de couleur brunâtre		
45.0	-42.00	42.00	80 %			60			SPT		42.00	42.45	● ● ● ● ● ●	Grès lumachellique sain à fissuré de couleur brunâtre		
46.5	-43.50	43.50	88 %			60			SPT		43.50	43.95	○ ○ ○ ○ ○ ○	Grès sain à fissuré broyé par endroit de couleur jaunâtre		
48.0	-45.00	45.00	100 %			60	85		SPT		45.00	45.45	○ ○ ○ ○ ○ ○	Grès sain à fissuré broyé par endroit de couleur jaunâtre		
49.5	-46.00	46.00	100 %			60			SPT		46.50	46.95	— — — — —	Marne compacte avec trace de limons grisâtre à verdâtre		
51.0	-47.50	47.50	100 %			58			SPT		48.00	48.45	— — — — —	Marne de consistance compacte de couleur grisâtre à verdâtre		
51.0	-49.50	49.50	100 %			60			SPT		48.84	49.23	— — — — —	Marne de consistance compacte de couleur grisâtre à verdâtre		
	-49.50	49.50	100 %			60			SPT		49.50	49.95	— — — — —	Marne de consistance compacte de couleur grisâtre à verdâtre		
	-51.00	51.00												Fin du forage à une profondeur de 52 m.		

**REMARQUES :**

\* SPT : Pour les SPT à 60 coups la pénétration est inférieure à 45cm

\* le niveau d'eau est la dernière lecture d'eau dans le sondage

**TYPE CAROTTIER :**

CF : Carottier fendu  
 TM : Tube à paroi mince  
 PS : Tube à position fixe  
 CR : Tube carottier

**ABREVIATIONS :**

AG : Analyse granulométrique  
 S : Sédimentométrie  
 L : Limites d'Atterberg (WL, IP)  
 W : Teneur en eau  
 PV : Poids volumique (Gd, Gh)  
 AC : Analyse chimique  
 OIS : Cisaillement rectiligne  
 TR : Cisaillement Triaxial  
 Rc : Résistance à la compression  
 OED : Essai oedométrique  
 GL : Gonflement libre  
 R : Refus à l'enfoncement

Préparé par : Mr BENDIMAM

Vérifié par :

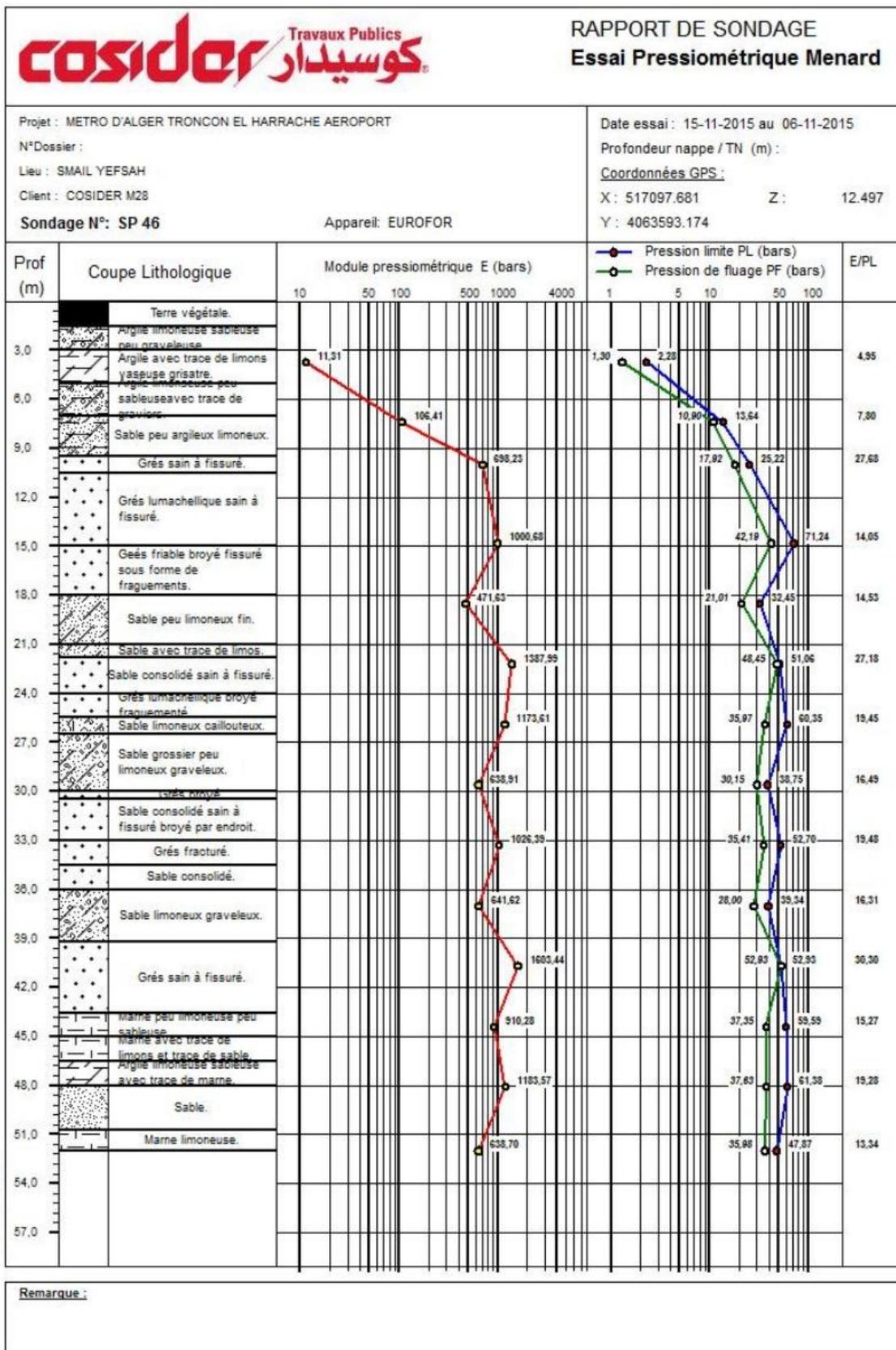
09/11/2015

Page : 2 de 3

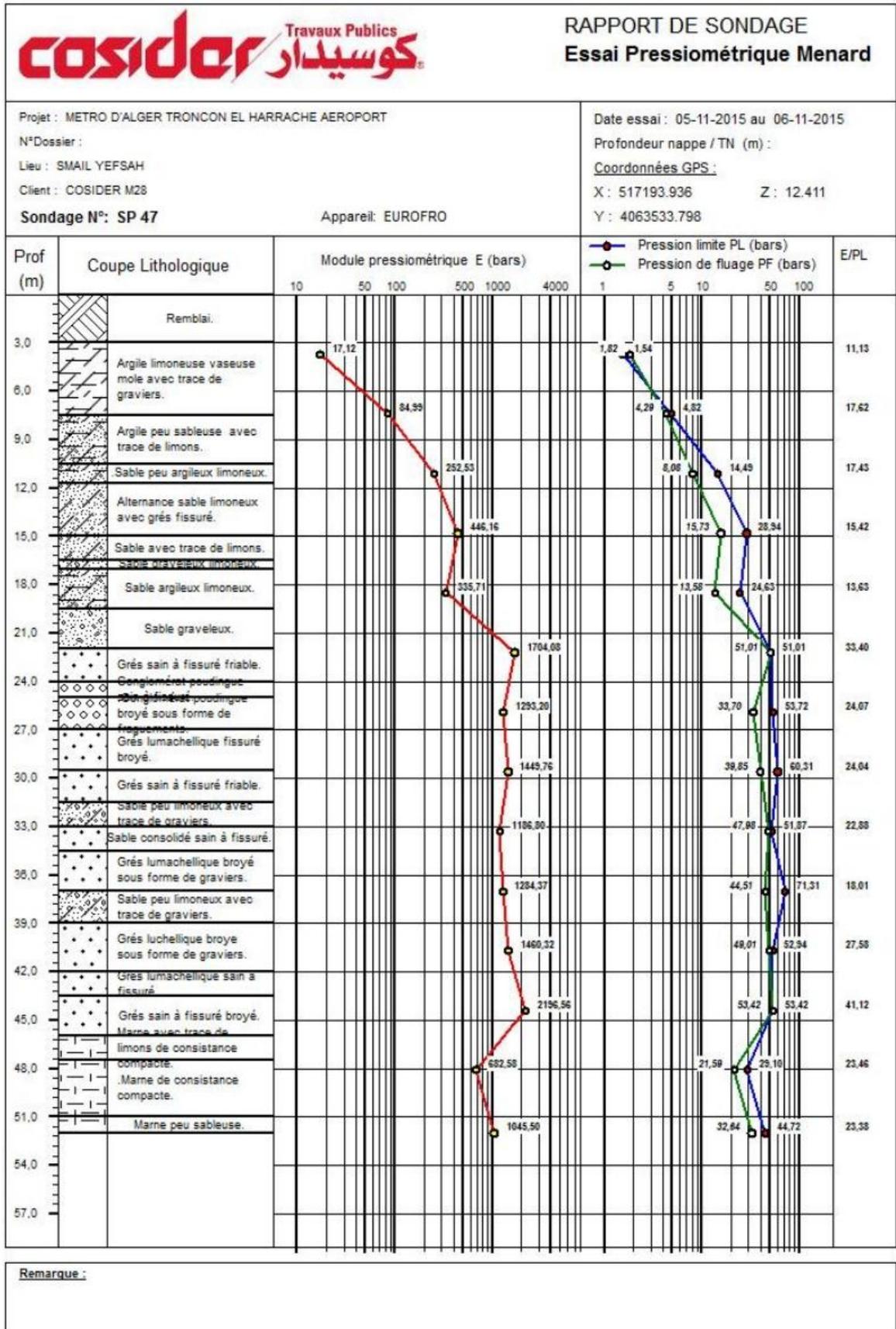
<b>Projet : METRO D'ALGER TRONCON EL HARRACHE AEROPORT</b> <b>Endroit : Station Beb Ezzouar - SMAIL YEFSAH</b>				<b>Dossier N° :</b> <b>Client : COSIDER M28</b>								
Date début : 27-10-2015 Date fin : 02-11-2015 Profondeur forée (m) : 52 Niveau d'eau (m) : 20,80		Coordonnées GPS: X : Y : Z :		Boue de forage : EAU CLAIRE Type forage : CAROTTE Foreuse : SM 8G		Etat des échantillons : Intact <input type="checkbox"/> Remanié <input type="checkbox"/> Paraffiné <input type="checkbox"/> Roche <input type="checkbox"/>						
Echelle (m)	Élévation (m) Profondeur (m)	Récupération	SPT (N1 + N2)	ROD	Tubage	Carottier	État	Profondeur Echantillon	Niveau d'eau	Symboles	DESCRIPTION	E S S A I S D E L A B O R A T O I R E
	-52,00 52,00	25 50 75 100 100 %	80			SPT	X	#1,45 #1,96			Marne peu sableuse de couleur grisâtre à verdâtre  Fin du forage à une profondeur de 52 m.	
	52,5											
	54,0											
	55,5											
	57,0											
	58,5											
	60,0											
	61,5											
	63,0											
	64,5											
	66,0											
	67,5											
	69,0											
	70,5											
	72,0											
	73,5											
	75,0											
	76,5											
<b>REMARQUES :</b> * SPT : Pour les SPT à 60 coups la pénétration est inférieure à 45cm  * le niveau d'eau est la dernière lecture d'eau dans le sondage						<b>TYPE CAROTTIER :</b> CF : Carottier fendu TM : Tube à paroi mince PS : Tube à position fixe CR : Tube carottier		<b>ABREVIATIONS :</b> AG : Analyse granulométrique S : Sedimentométrie L : Limites d'Atterberg(WL, IP) W : Teneur en eau PV : Poids volumique(G <sub>s</sub> , G <sub>n</sub> ) AC : Analyse chimique CIS : Cisaillement rectiligne TR : Cisaillement Triaxial Rc : Résistance à la compression OED : Essai oedométrique GL : Gonflement libre R : Refus à renforcement				
Préparé par : Mr BENDIMAM				Vérifié par :				09/11/2015		Page : 3 de 3		

## Annexe B : Résultats des essais pressiométriques

### Sandage Pressiométrique SP46



Remarque :



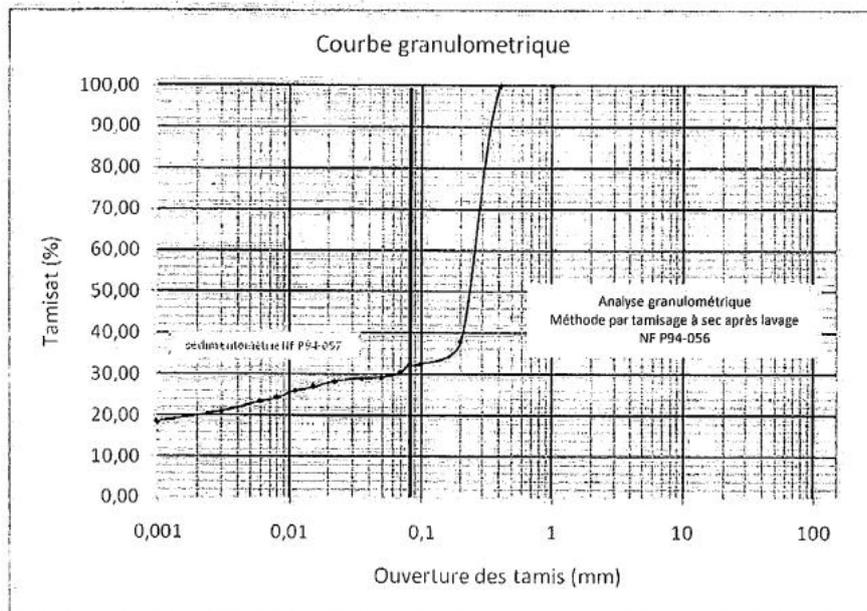
## Annexe C : Granulométrie et classification des sols

 Sandage carotté SC68

	LABORATOIRE CENTRAL DES MATERIAUX (LCM)	réf : ER_LCM.510.1.1V0
		Date : 01/06/2014
		Page : 1/1

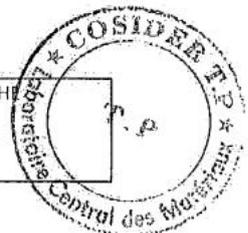
**PROCES VERBAL**  
Analyse granulométrique  
Méthode par tamisage à sec après lavage  
NF P 94-056/NA 5232

N° R / LCM_G_037 /2015/61	Commande N° : 338 / LCM /2015	Code échantillon : 2015-SS-353
Provenance		Date de prélèvement
Nature du matériau		
Sondage N°	SC 68-pz	Profondeur (m)
Date début d'essai	28/12/2015	Date fin d'essai
dm (mm)	01	Température étuve °C



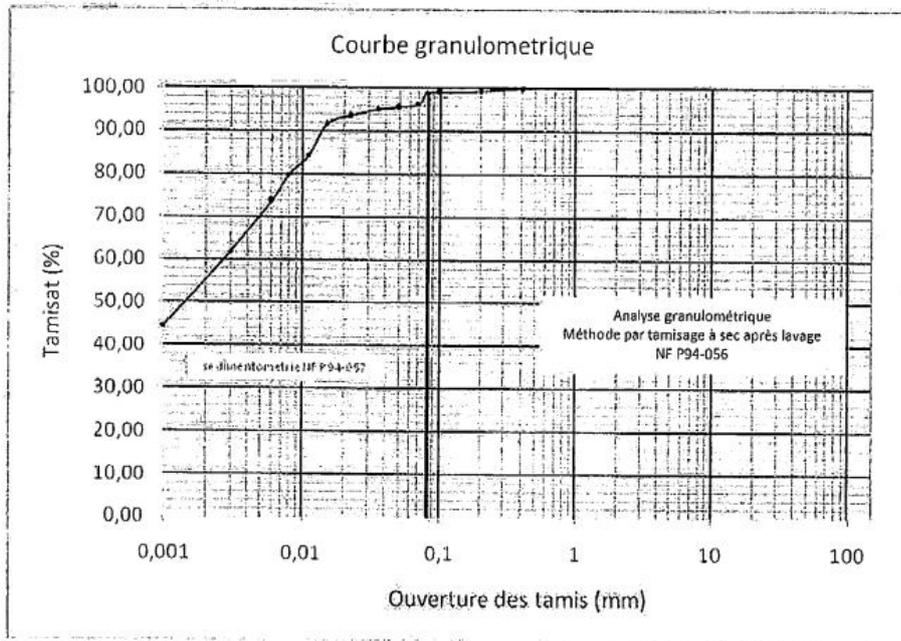
Tamis d mm	1.0	0.4	0.2	0.100	0.08	0.068	0.049	0.035	0.022	0.015	0.011	0.008
Passant %	100	99.62	38.09	32.64	32.27	30.50	29.30	29.10	28.30	26.90	26.10	24.50
Tamis d mm	0.006	0.003	0.001									
Passant %	23.60	21.10	18.50									

Observations		Etabli par : Z.CHAOUCHI
--------------	--	-------------------------



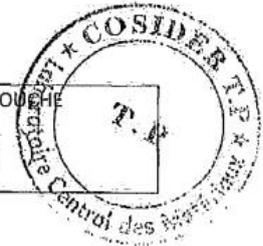
**PROCES VERBAL**  
Analyse granulométrique  
Méthode par tamisage à sec après lavage  
NF P 94-056/NA 5232

N° R / LCM_G_037 /2015/66		Commande N° : 338 / LCM /2015		Code échantillon : 2015-SS-356	
Provenance			Date de prélèvement		
Nature du matériau					
Sondage N°		SC 68-pz		Profondeur (m)	
				46.52 – 47.03 m	
Date début d'essai		27/12/2015		Date fin d'essai	
				28/12/2015	
dm (mm)		0.400		Température étuve °C	
				105°	



Tamis d mm	0.4	0.2	0.100	0.08	0.070	0.049	0.035	0.022	0.015	0.011	0.008
Passant %	100	99.45	99.13	99.02	96.40	95.60	95.20	93.60	91.60	84.40	80.00
Tamis d mm	0.006	0.003	0.001								
Passant %	73.60	61.80	44.60								

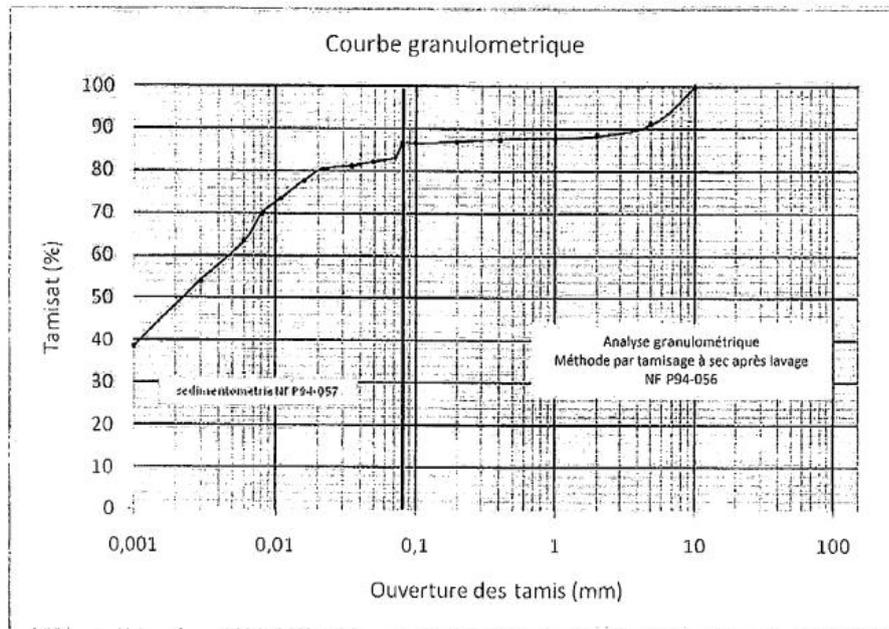
Observations	Etabli par : Z.CHAOUACHE	
--------------	--------------------------	--



	LABORATOIRE CENTRAL DES MATERIAUX (LCM)	réf : ER_LCM.510.1.1V0
		Date : 01/06/2014
		Page : 1/1

**PROCES VERBAL**  
Analyse granulométrique  
Méthode par tamisage à sec après lavage  
NF P 94-056/NA 5232

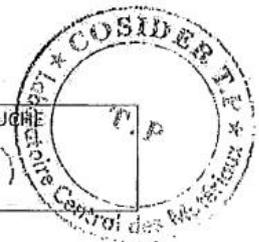
N° R / LCM_G_037 / 2015/86		Commande N° : 338 / LCM / 2015		Code échantillon : 2015-SS-359	
Provenance			Date de prélèvement		
Nature du matériau					
Sondage N°	SC 69-pz	Profondeur (m)	05.30 – 05.70 m		
Date début d'essai	20/12/2015	Date fin d'essai	21/12/2015		
dm (mm)	10	Température étuve °C	105°		



Tamis d mm	10.0	5.0	2.0	1.0	0.4	0.2	0.1	0.08	0.070	0.049	0.035	0.022	0.016
Passant %	100	91.11	88.33	87.78	87.50	86.94	86.67	86.67	83.30	82.20	81.20	80.50	77.70
Tamis d mm	0.011	0.008	0.006	0.003	0.001								
Passant %	73.70	69.90	63.60	54.10	38.60								

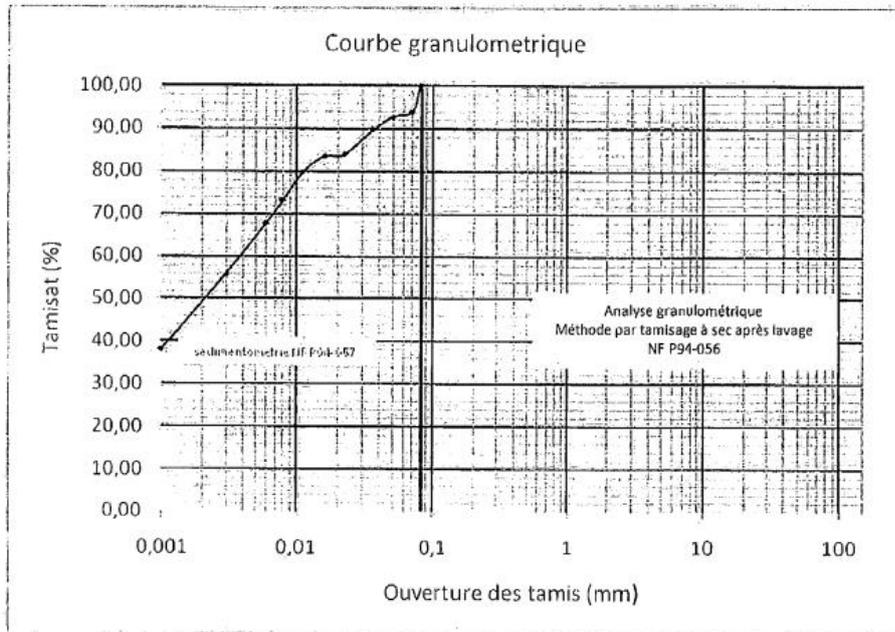
Observations

Etabli par : Z. CHAOUCHI



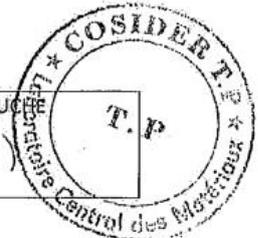
**PROCES VERBAL**  
Analyse granulométrique  
Méthode par tamisage à sec après lavage  
NF P 94-056/NA 5232

N° R / LCM_G_037 /2015/92	Commande N° : 338 / LCM /2015		Code échantillon : 2015-SS-360
Provenance			Date de prélèvement
Nature du matériau			
Sondage N°	SC 69-pz	Profondeur (m)	10.00 – 10.36 m
Date début d'essai	24/12/2015	Date fin d'essai	24/12/2015
dm (mm)	10	Température étuve °C	105°



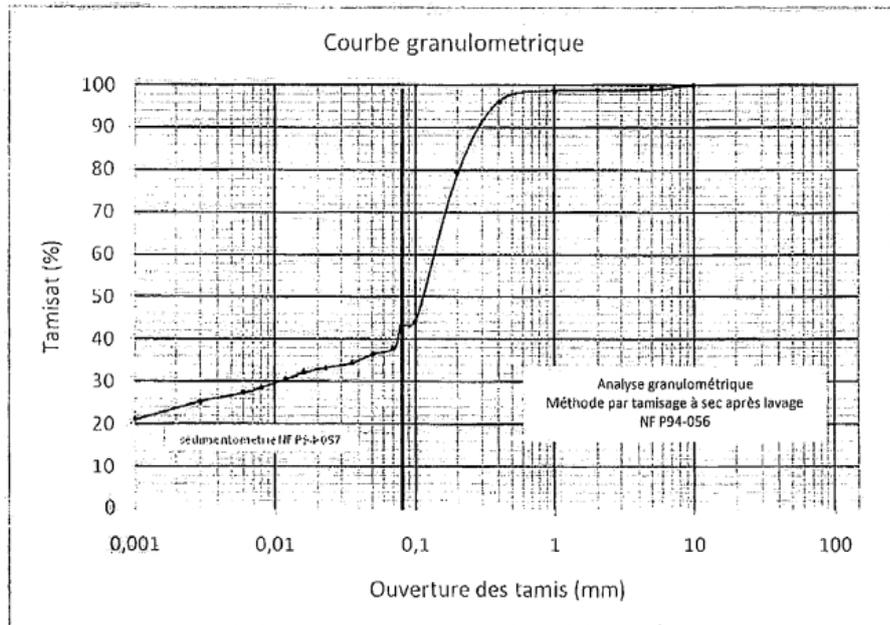
Tamis d mm	10.0	5.0	2.0	1.0	0.4	0.2	0.1	0.08	0.070	0.050	0.035	0.022	0.016
Passant %	100	99.55	97.74	97.07	96.39	95.48	95.03	95.03	88.70	88.30	87.90	87.50	86.00
Tamis d mm	0.011	0.008	0.006	0.003	0.001								
Passant %	84.80	81.00	73.30	62.00	45.80								

Observations		Etabli par : Z.CHAOU
--------------	--	----------------------



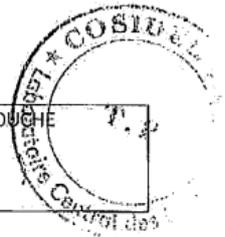
**PROCES VERBAL**  
Analyse granulométrique  
Méthode par tamisage à sec après lavage  
NF P 94-056/NA 5232

N° R / LCM_G_037 /2015/98		Commande N° : 338 / LCM /2015		Code échantillon : 2015-SS-361	
Provenance				Date de prélèvement	
Nature du matériau					
Sondage N°		SC 69-pz		Profondeur (m)	
				17.67 – 17.90 m	
Date début d'essai		16/12/2015		Date fin d'essai	
				17/12/2015	
dm (mm)		10		Température étuve °C	
				105°	



Tamis d mm	10.0	5.0	2.0	1.0	0.4	0.2	0.1	0.08	0.071	0.051	0.036	0.023	0.016
Passant %	100	99.11	98.93	98.75	96.26	79.32	44.39	43.32	38.00	36.60	34.50	33.30	32.20
Tamis d mm	0.012	0.008	0.006	0.003	0.001								
Passant %	30.70	28.70	27.50	25.30	21.20								

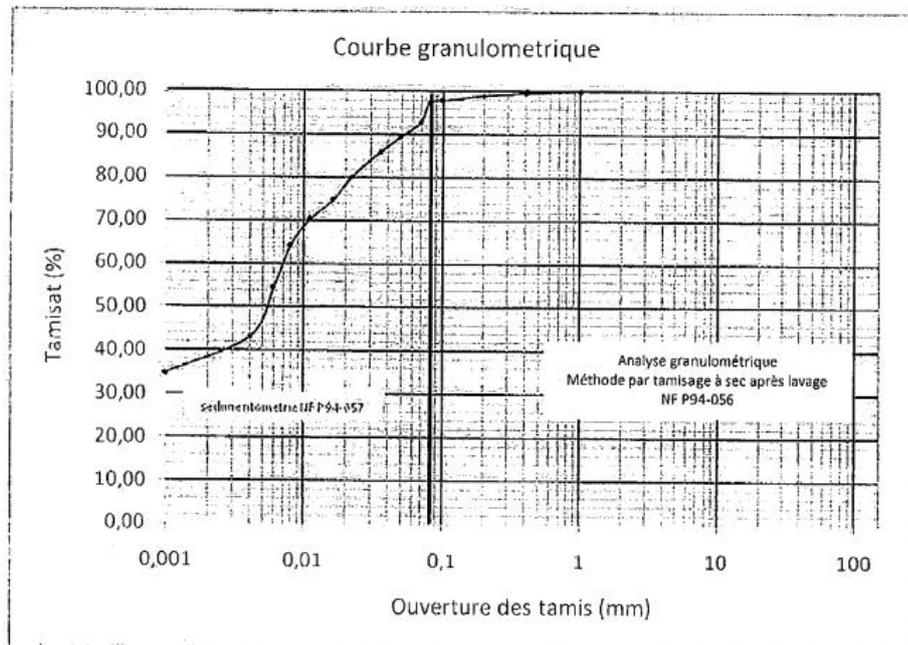
Observations	Etabli par : Z.CHAOUACHE
--------------	--------------------------



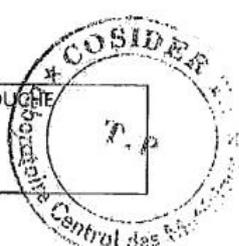
**PROCES VERBAL**

Analyse granulométrique  
Méthode par tamisage à sec après lavage  
NF P 94-056/NA 5232

N° R / LCM_G_037 /2015/104		Commande N° : 338 / LCM /2015		Code échantillon : 2015-SS-364	
Provenance				Date de prélèvement	
Nature du matériau					
Sondage N°		SC 69-pz	Profondeur (m)		48.84 – 49.23 m
Date début d'essai		22/12/2015	Date fin d'essai		22/12/2015
dm (mm)		01	Température étuve °C		105°



Tamis d mm	1.0	0.4	0.2	0.1	0.08	0.069	0.049	0.035	0.022	0.016
Passant %	100	99.62	98.98	97.96	97.45	92.90	89.40	85.90	80.10	74.90
Tamis d mm	0.011	0.008	0.006	0.004	0.001					
Passant %	70.30	64.40	54.60	43.30	34.90					

Observations		Etabli par : Z.CHAOUKHE
		

◆ **Sondage SC 33-1 :**

- **Echantillon 01 : [01.60m – 02.00m] :**

$T(80 \mu\text{m}) = 94 \% > 50 \%$  ,  $R(80\mu\text{m}) = 6 \% < 50 \%$  , donc le sol est un sol fin.

$WL = 56 (\%)$   
 $WP = 15 (\%)$   
 $Ip = 41 (\%)$  } D'après l'abaque de Casagrande, le sol est une argile très plastique (At).

- **Echantillon 02 : [22.20m – 22.70m] :**

$T(80 \mu\text{m}) = 84.24 \% > 50 \%$  ,  $R(80\mu\text{m}) = 15.76\% < 50 \%$  , donc le sol est un sol fin.

$WL = 45 (\%)$   
 $WP = 15 (\%)$   
 $Ip = 30 (\%)$  } D'après l'abaque de Casagrande, le sol est une argile peu plastique (Ap).

◆ **Sondage SC 34 :**

- **Echantillon 01 : [01.70m – 02.00m] :**

$T(80 \mu\text{m}) = 86.78\% > 50 \%$  ,  $R(80\mu\text{m}) = 13.22 \% < 50 \%$  , donc le sol est un sol fin.

$WL = 63 (\%)$   
 $WP = 21 (\%)$   
 $Ip = 42 (\%)$  } D'après l'abaque de Casagrande, le sol est une argile très plastique (At).

- **Echantillon 02 : [05.60m – 06.00m] :**

$T(80 \mu\text{m}) = 85.51 \% > 50 \%$  ,  $R(80\mu\text{m}) = 14.49\% < 50 \%$  , donc le sol est un sol fin.

$WL = 66 (\%)$   
 $WP = 21 (\%)$   
 $Ip = 45 (\%)$  } D'après l'abaque de Casagrande, le sol est une argile très plastique (At).

◆ **Sondage SC 66 :**

- **Echantillon 01 : [05.00m – 05.50m] :**

$T(80 \mu\text{m}) = 84.6 \% > 50 \%$  ,  $R(80\mu\text{m}) = 15.4\% < 50 \%$  , donc le sol est un sol fin.

$WL = 47.1(\%)$   
 $WP = 29.3(\%)$   
 $Ip = 17.8(\%)$  } D'après l'abaque de Casagrande, le sol est une argile peu plastique (Ap).

- **Echantillon 02 : [44.27m – 44.79m] :**

$T(80 \mu\text{m}) = 97.50 \% > 50 \%$  ,  $R(80\mu\text{m}) = 2.5\% < 50 \%$  , donc le sol est un sol fin.

$WL = 51.5(\%)$   
 $WP = 25.75(\%)$   
 $Ip = 25.75(\%)$  } D'après l'abaque de Casagrande, le sol est une argile très plastique (At).

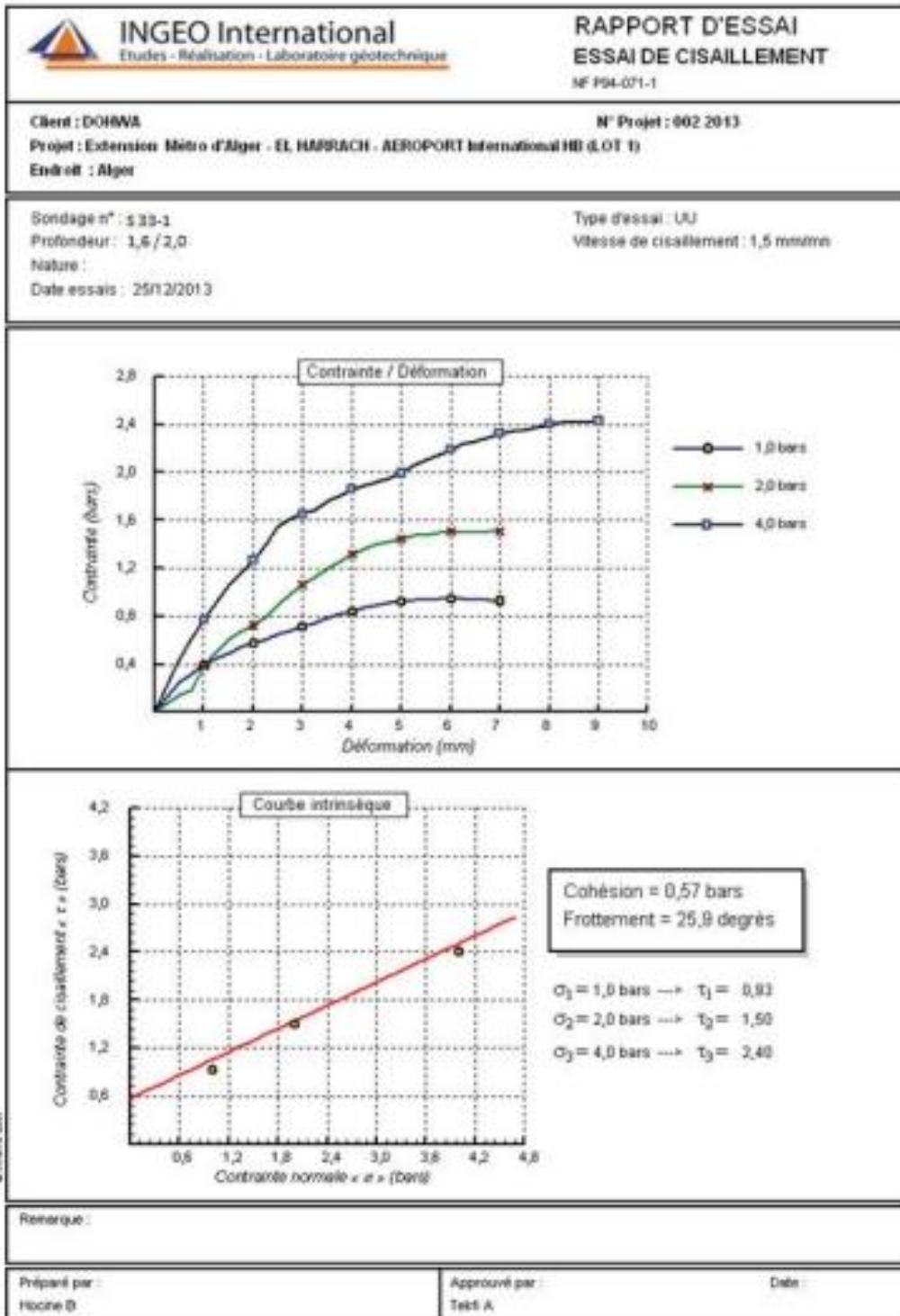
- **Echantillon 03 : [46.10m – 46.50m] :**

$T(80 \mu\text{m}) = 75.83 \% > 50 \%$  ,  $R(80\mu\text{m}) = 24.17\% < 50 \%$  , donc le sol est un sol fin.

$WL = 34.9(\%)$   
 $WP = 24.5(\%)$   
 $Ip = 10.37(\%)$  } D'après l'abaque de Casagrande, le sol est une argile peu plastique (Ap).

## Annexe D : Résultats des essais de cisaillement

 Sandage carotté SC 33-1



© 2013 INGEN

Client : DONWA

N° Projet : 002 2013

Projet : Extension Métro d'Alger - EL HARRACH - AEROPORT International HB (LOT 1)

Endroit : Alger

Sondage n° : S 33-1

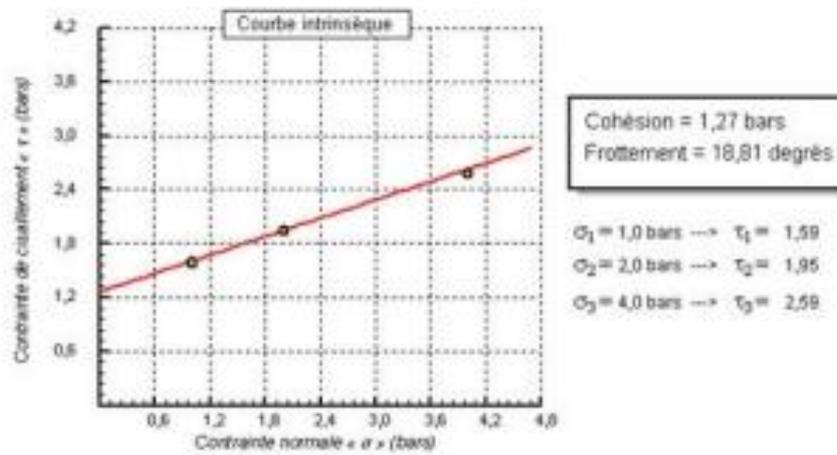
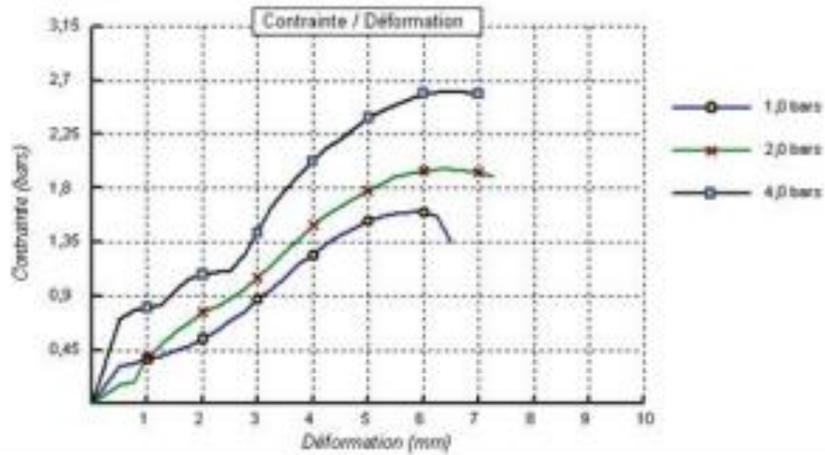
Profondeur : 22,2 / 22,7

Nature :

Date essais : 25/12/2013

Type d'essai : UU

Vitesse de cisaillement : 1,5 mm/mn



Remarque :

Préparé par :  
Houche B

Approuvé par :  
Télif A.

Date :

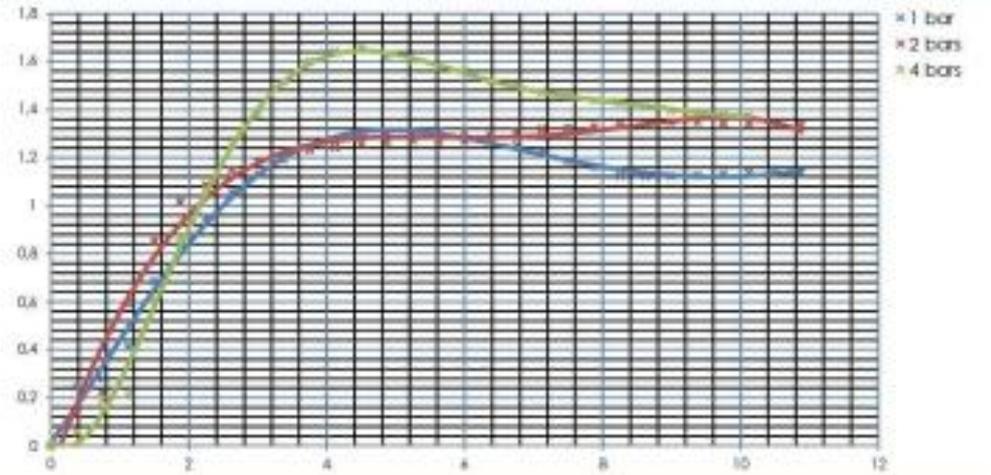
**✚ Sandage carotté SC 34**

 <b>INGEO International</b> Etudes - Réalisation - Laboratoire géotechnique	Code : ER 830 - 01&02
	Edition : 01
	Date : 24/08/2013
	Page : 1-1

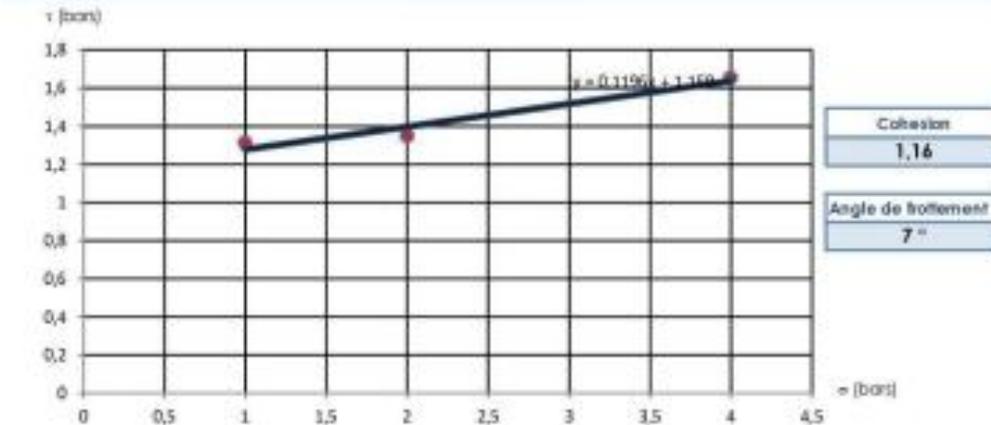
**Rapport d'essai**  
Essai de cisaillement rectiligne (NF P94 70-1).

<b>Cliant</b>	DCHWA	<b>Projet</b>	Extension Metro d'Alger EL HARRACH - AEROPORT #8
<b>Provenance Ech</b>	BAS EZZOUBAR	<b>Lithologie</b>	Argile
<b>Sondage/puif</b>	5.34	<b>Date début</b>	04/08/2013
<b>Profondeur</b>	1,70m - 2,00m	<b>Date fin</b>	04/08/2013
		<b>Type essai</b>	UU
		<b>Vitesse</b>	1,5 mm/min
		<b>Type section</b>	Circulaire

**Contraintes/Déformations**



**Courbe intrinsèque**

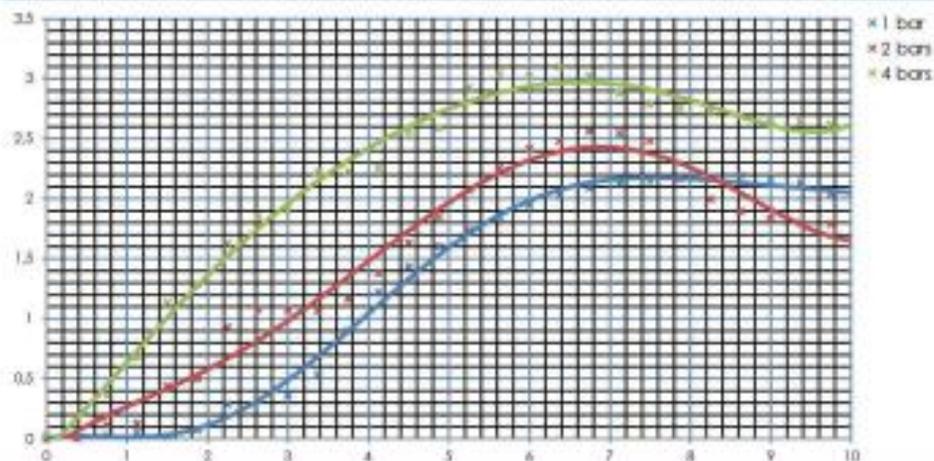




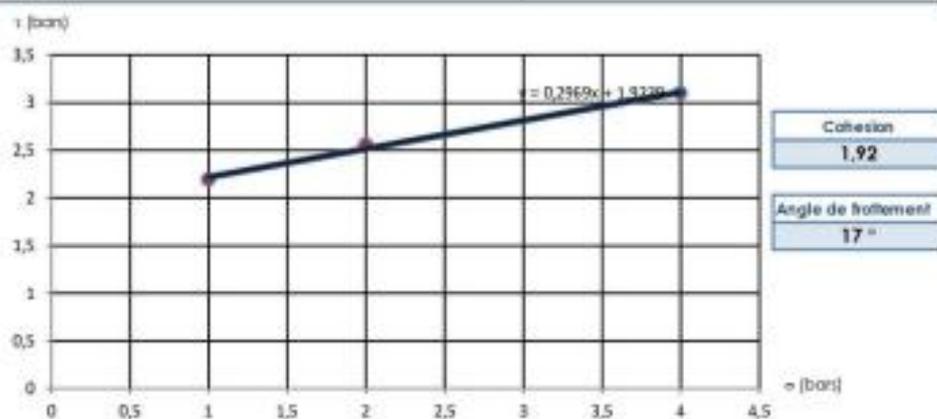
**Rapport d'essai**  
**Essai de cisaillement rectiligne (NF P94 70-1).**

<b>Cliant</b>	DGHWA	<b>Projet</b>	Extension Metro d'Alger EL HARRACH - AEROPORT HB	
<b>Provenance Ech</b>	BAB EZZOUJAR	<b>Lithologie</b>	Argile	<b>Type essai</b> U/U
<b>Sondage/puit</b>	S 34	<b>Date début</b>	04/08/2013	<b>Vitesse</b> 1.5 mm/min
<b>Profondeur</b>	5.60m - 6.00m	<b>Date fin</b>	04/08/2013	<b>Type section</b> Circulaire

**Contraintes/Déformations**



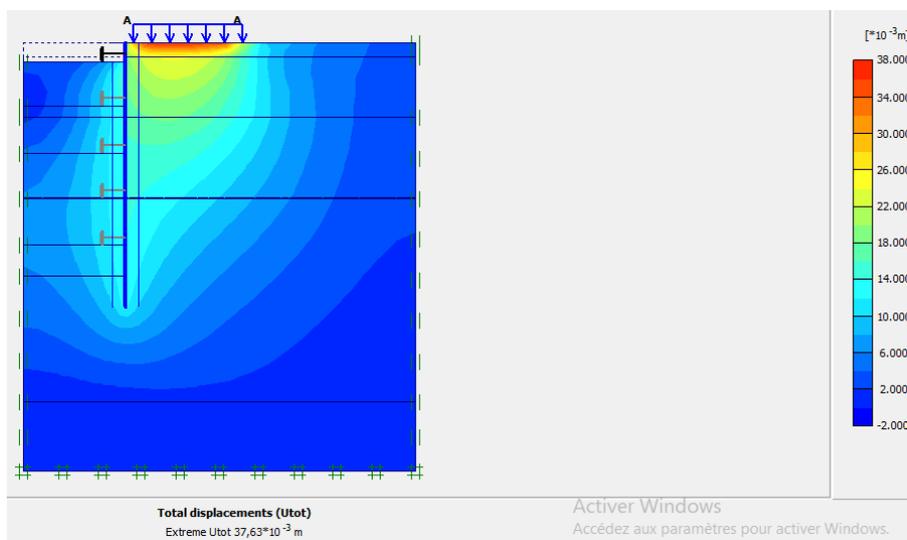
**Courbe Intrinsèque**



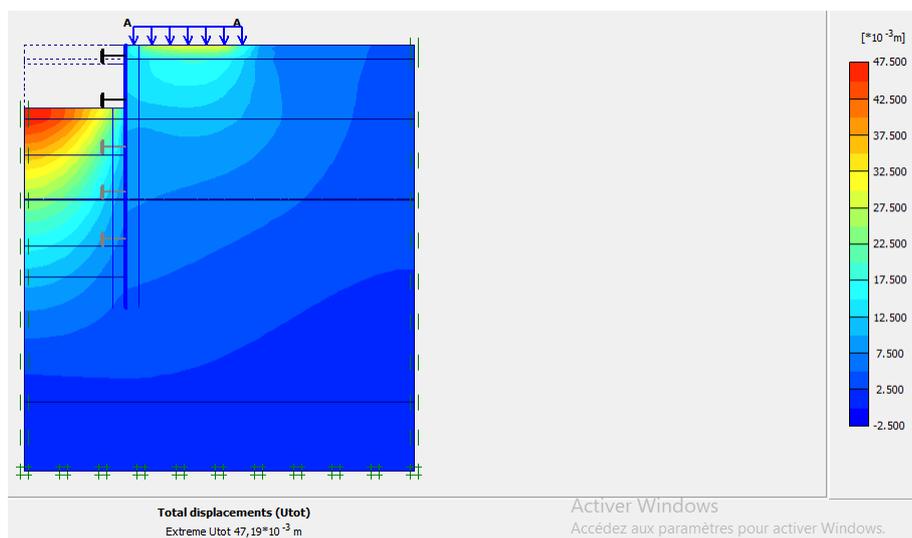
## Annexe E : Résultats de la modélisation

### Parois moulée

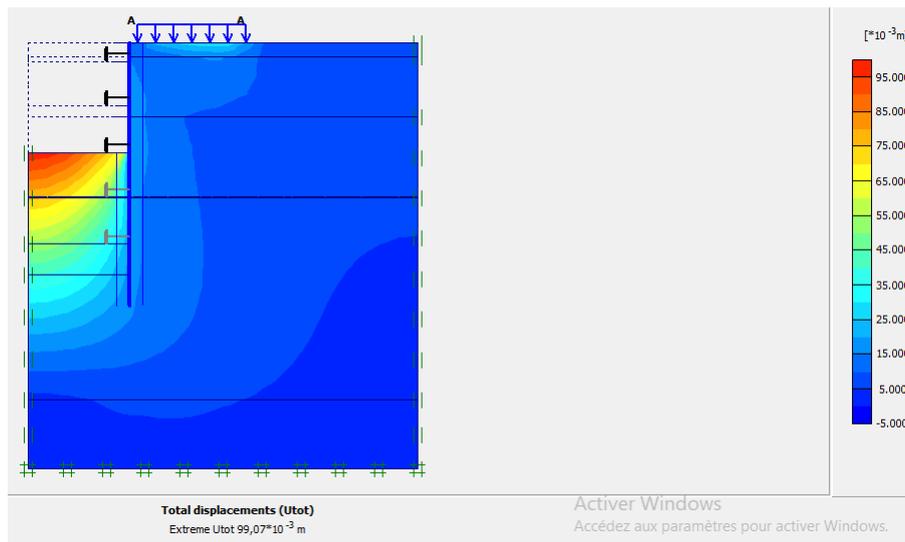
#### 🚧 Déplacement total de la 1ère phase.



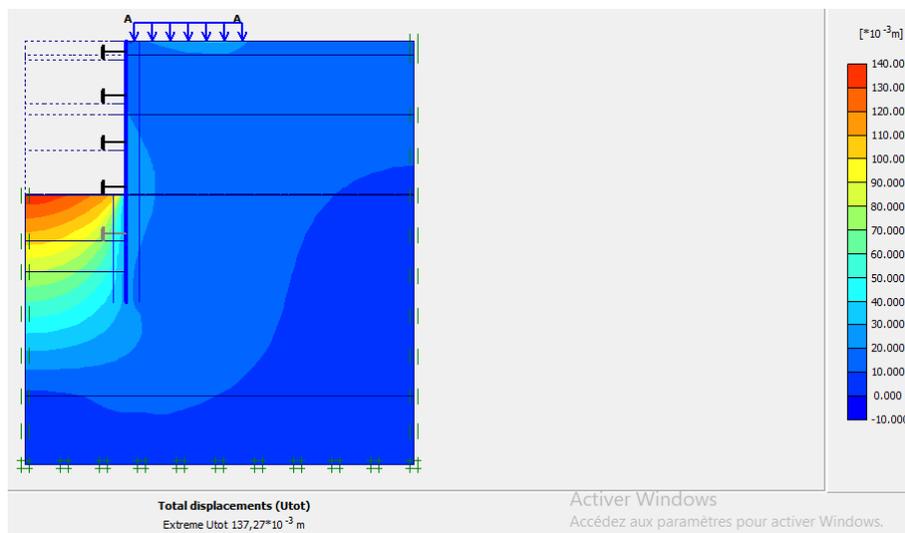
#### 🚧 Déplacement total de la 2ème phase.



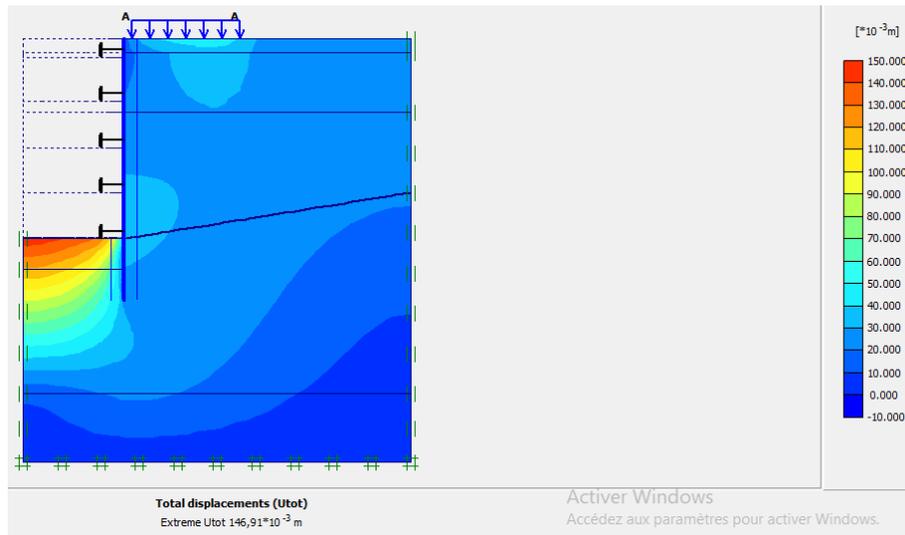
### 🚧 Déplacement total de la 3ème phase.



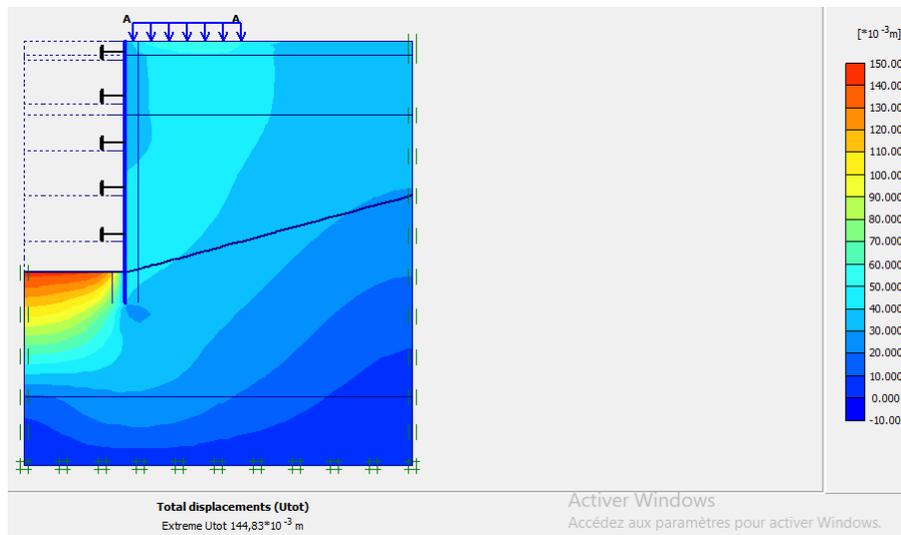
### 🚧 Déplacement total de la 4ème phase.



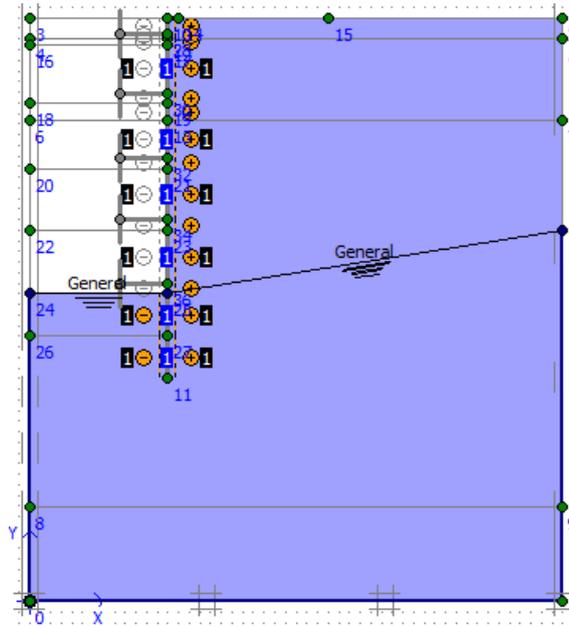
 **Déplacement total de la 5ème phase.**



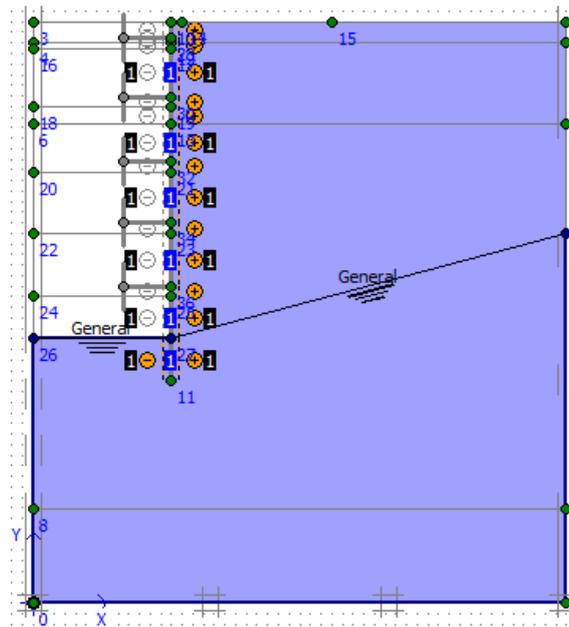
 **Déplacement total de la 6ème phase.**



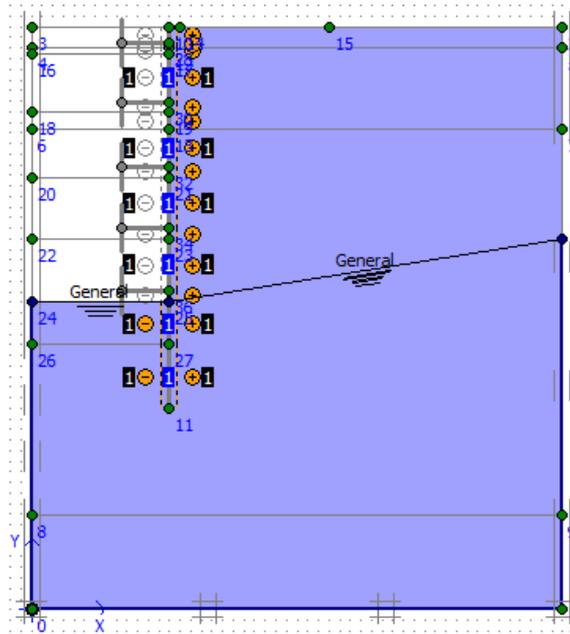
✚ Conditions hydrauliques de la 5ème phase.



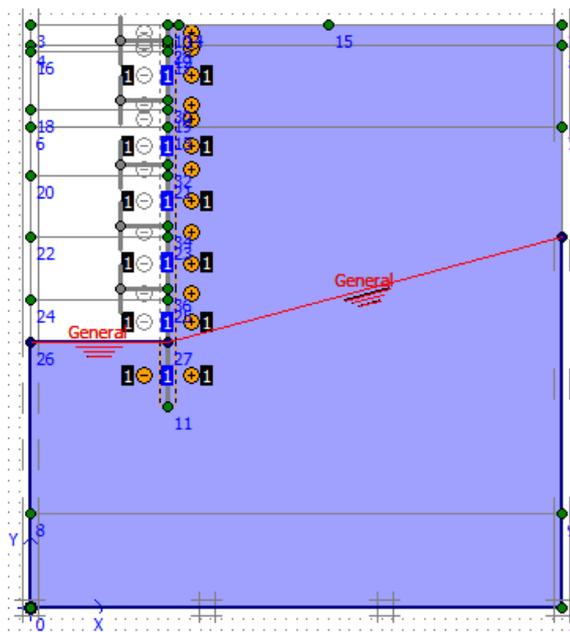
✚ Conditions hydrauliques de la 6ème phase.



✚ Conditions hydrauliques de la 5ème phase de Paroi en pieux sécants



✚ Conditions hydrauliques de la 6ème phase de Paroi en pieux sécants



## Annexe F : Normes

**Tableau(A.1) :** Définition des catégories conventionnels des sols.

Classe de sol		Nature	Pressionmètre (Mpa)
Argile , limon	A	Argile et limon mou	<0.7
	B	Argile et limon fermes	1.2 – 2.0
	C	Lache	< 0.5

**Tableau(A\_2) :** Classification de sol selon le rapport EM/PL (XP P94-011)

Argile	(EM/PL) < 5	Argile remaniées ou triturée
	5 < (EM/PL) < 8	Argile sous-consolidé
	12 < (EM/PL) < 12	Argile normalement consolidé
	12 < (EM/PL) < 15	Argile légèrement sourconsolidé

**Tableau(A\_3) :** Etat de sol en fonction de la Indice de consistance Ip (XP P94-011)

Etat	Indice de plactisité
Non plastique	Ip < 12
Peu plastique	12 < Ip < 25
Plastique	25 < Ip < 40
Très plastique	Ip > 40

**Tableau(A\_4) : Etat de sol en fonction de la Indice de consistance  $I_c$  (XP P94-011)**

Etat	Indice de consistance $I_c$
Liquide	$I_c < 0$
Très molle	$0 < I_c < 0.25$
Molle	$0.25 < I_c < 0.50$
Ferme	$0.50 < I_c < 0.75$
Très Ferme	$0.75 < I_c < 1$
dur	$I_c > 1$

**Tableau(A\_5) : Etat de sol en fonction de la Masse volumique  $\gamma_{dsec}$  (XP P94-011)**

Etat	Degré de saturation
Non saturé	$S_r < 100$
Saturé	$S_r = 100$

**Tableau(A\_6) : Etat de sol en fonction de la degré de saturation  $S_r$  (XP P94-011)**

Etat	Masse volumique $\gamma_d$ ( $\text{kg/m}^3$ )
Peu Dense	$\gamma_d < 1600$
Dense	$1600 < \gamma_d < 1800$
Très Dense	$> \gamma_d > 1800$