



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTÉ : DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DÉPARTEMENT : DE GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : HAMAID Achraf et LAKHRIF H'meida

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : TRAVAUX PUBLICS

OPTION : VOIES ET OUVRAGES D'ART

Thème

Analyse statique d'une paroi moulée

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr, ZIREGUE. A	MCB	Président
Mr, RACHIDI. N	MAB	Examineur
Mme, KOUIDRI. Z	MAA	Rapporteur
Mr, ANNANE. A	MAB	Co-rapporteur

Promotion : 2020/ 2021

Remerciements

*Nous remercions premièrement avant tout
Notre Dieu Qui nous a donné le courage et la
volonté de poursuivre nos études*

*Nous remercions en second nos parents et nos
familles, qui ont sacrifiés leur vie pour notre
bien*

*Nous remercions très vivement notre
encadreur Mme, Kouidri Zohra et co-encadreur
Annane Abdallah pour leur aide précieuse et
leur bon encadrement ainsi que
nous remercions également le président et les
membres de jury d'avoir accepté d'examiner
notre travail.*

*Nous remercions tous les enseignants qui ont
contribué à notre formation.*

*Nous remercions aussi tous nos amis pour leur
aide, leur patience, leur compréhension et leur
encouragement.*

Dédicace

Je dédie cet humble acte à mes chers parents pour leur amour et leur sacrifice. Nous regrettons leur absence en raison de la pandémie de COVID-19. Nous demandons à Dieu de nous l'enlever,

A l'âme de mon frère Mustafa, que Dieu ait pitié de lui, qui ne m'a pas épargné dans sa vie et m'a recommandé la connaissance et l'apprentissage

À mes frères et sœurs pour leur patience, leur soutien et leurs encouragements à mon égard.

A mon binôme Lakhriç H'meïda

A mes amis proches, amis d'études, et ceux avec qui j'ai partagé les souffrances du logement universitaire,

A tous ceux qui me connaissent de près ou de loin

ACHRAF HAMAID

Dédicace

*Une dédicace, au plus cher et au plus proche de mon cœur.
A l'âme de mon père, le pur et pur, et à ma chère mère, que
dieu prolonge sa vie, qui m'ont été d'aide et de soutien.*

A celle qui a soutenu moi et suivi mes pas, ma chère épouse.

*Aux âmes de mon foie, mes chers enfants : Mohamed
Elamine, Ayat Errahmane, Abdelhakim Boulanouar et
Islam.*

*A mes frères, frère et collègues, à mon binôme Hamaïd
Achraf, à mes professeurs et les personnes de haut crédit
pour mes études, à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou
de loin.*

*A ceux qui pensent et recherchent pour faire avancer les
connaissances partout.*

*Je dédie cet humble travail et nous demandons à dieu d'en
faire un phare pour chaque étudiant en savoir.*

LAKHRIF H'MEIDA

Résumé :

En raison des changements qui ont eu lieu dans les villes et capitales des pays du monde, dont l'Algérie, qui souffre de la congestion du trafic, on s'est mis en face du problème de transport, ce qui nous a obligé à établir et élargir un réseau pour les stations de métro et en parallèle assurer la sécurité des chantiers de réalisation et des constructions qui lui sont proches. La paroi moulée est l'ouvrage le plus utilisé actuellement pour atteindre ce but.

Parmi ces stations se trouve la station Houari Boumediene (Alger), que nous avons choisie pour étude au moyen du code de calcul Plaxis 2D, et dont nous avons étudié la déformation du mur de soutènement lors de l'excavation de station, sur la base des données paramétriques géotechniques et données structurales que nous avons obtenues.

Les résultats obtenus comparés aux résultats inclinométriques réelles, nous permettent de poursuivre l'étude par tout ce qui s'y rapporte (pré-dimensionnement, ferraillement, boutonnage,...)

Mots-Clefs :

Paroi moulée, cohésion, déplacement, excavation.

Abstract:

Due to the changes that have taken place in the cities and capitals of the world, including Algeria, which suffers from traffic congestion, we are faced with the problem of transport, which has forced us to establish and expand a network for the metro stations and in parallel ensure the safety of the construction sites and buildings near it. The diaphragm wall is the most used structure to achieve this goal.

Among these stations is the Houari Boumediene station (Algiers), which we have chosen for study by means of the calculation software Plaxis 2D, and of which we have studied the deformation of the retaining wall during the excavation of the station, on the basis of the geotechnical parametric data and structural data that we have obtained.

The results obtained compared to the real inclinométrique results; allow us to continue the study with everything related to it (pre-dimensioning, reinforcement, buttoning ...)

Key Words:

Diaphragm wall, cohesion, displacement, excavation.

ملخص:

بسبب التغيرات التي طرأت على مدن وعواصم دول العالم ومنها الجزائر التي تعاني من الازدحام المروري، اضطرت الجهات الوصية لإنشاء مشروع شبكة لمحطة المترو.

من بين هذه المحطات محطة هواري بومدين (الجزائر العاصمة)، والتي قمنا بدراستها في هذا البحث بواسطة كود الحساب Plaxis 2D ، وتطرقنا خلالها لتشوه جدار الحجاب الحاجز أثناء عملية حفر المحطة ، على أساس البيانات و المعلومات الجيوتقنية المتحصل عليها من طرف شركة الإنجاز.

بناء على النتائج التي توصلنا إليها رقميا مقارنة بنتائج سلوك الميل الفعلية ، تمكنا من دراسة كل ما يتعلق ب: تحديد الأبعاد ، التسليح ، الدعامات التي تستعمل أثناء الحفر ،إلخ.....

الكلمات المفتاحية:

جدار الحجاب الحاجز، معامل التماسك؛ التشوه، سلوك الميل.

Liste des figures

N°	Titres des figures	page
Chapitre I Généralités sur les ouvrages de soutènement		
Fig.I.1	Murs poids en béton ou en maçonnerie	5
Fig.I.2	Mur en terre armée	6
Fig.I.3	Mur cellulaire	6
Fig.I.4	Ancrage de paroi moulée	7
Fig.I.5.1	Mur en « T renversé » classique	8
Fig.I.5.2	Mur à contreforts en béton arme	9
Fig.I.6	Les murs dévers	9
Fig.I.7	Diverses dispositions de bêches.	10
Fig.I.8	Schéma de principe du mur de palplanche	10
Fig.I.9	Assemblage des éléments des palplanches	11
Fig.I.10	Les différents types des palplanches	12
Fig.I.11	Paroi moulée	13
Fig.I.12	Schéma d'exécution d'une paroi moulée	13
Fig.I.13	Murettes guides coupe longitudinale et transversale	14
Fig.I.14	Principe de soutènement de boue de bentonite	15
Fig.I.15	Schéma de principe paroi moulée d'étanchéité	15
Fig.I.16	Paroi moulée soutènement simple encrée	17
Fig.I.17	Schéma de les parois moulées de tranchée couverte avec planché.	18
Fig.I.18	Les étapes de constructions parois moulées de tranchée couverte avec planché.	18
Fig.I.19	Les parois moulées "jambes de pantalon"	19
Fig.I.20	Mise en place de paroi caisson	20
Fig.I.21	Principe de construction d'une paroi moulée préfabriqué	21

Liste des figures

Chapitre II Présentation du projet

Fig.II.1	La wilaya d'Alger	22
Fig.II.2	Plan du métro d'Alger	23
Fig.II.3	L'extension D'el Harrach Vers L'Aéroport	24
Fig.II.4	Implantation de la station	24
Fig.II.5	Schéma général des différents corps de la Station Université Houari Boumediene	25
Fig.II.6	Mode d'exécution des panneaux considéré pour la Station Université Houari Boumediene	26
Fig.II.7	Définition de murette-guide utilisé dans la station	26
Fig.II.8.1	Vue en plan. a- une armure conventionnelle. b- le profil en acier. Lindquist et Jameson (2011).	27
Fig.II.8.2	Mode d'exécution du rideau de pieux avec des colonnes en jet-grouting	27
Fig.II.9	Exemple de butonnage d'une paroi moulée	28
Fig.II.10	Illustration butonnage direct	28
Fig.II.11	Illustration butonnage sur lierne	29

Chapitre III Présentation de l'outil de simulation

Fig.III.1	Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input)	32
Fig.III.2	Fenêtre principale du programme de calcul	34
Fig.III.3	Fenêtre principale du programme de résultats (output)	35
Fig.III.4	La fenêtre principale du programme Curves	36
Fig.III.5	Surface de rupture du modèle de Mohr-Coulomb dans l'espace des contraintes principales pour un sol sans cohésion	40
Fig.III.6	Modélisation d'un essai de compression triaxiale avec le modèle de Mohr-Coulomb (a) et représentation des contraintes dans le plan de Mohr (b)	41
Fig.III.7	Module d'Yong à 50 % de la rupture	42
Fig.III.8	Illustration de coefficient de poisson	43

Liste des figures

Chapitre IV Modélisation de l'ouvrage et analyse des résultats

Fig.IV.1	Emplacement des sections de calcul 3	45
Fig.IV.2	Schéma avec les différents niveaux d'excavation préconisés pour le corps principal et l'accès Sud de la Station Université Houari Boumediene	46
Fig.IV.3	Les différentes couches de sol dans plaxis	47
Fig.IV.4	Modèle géométrique du projet	50
Fig.IV.5	Introduction de la surcharge de consolidation	51
Fig.IV.6	Les différents niveaux d'excavation de la station	51
Fig.IV.7	Les différents niveaux des butonnages	52
Fig.IV.8	Génération de maillage	55
Fig.IV.9	Conditions hydrauliques initiales	56
Fig.IV.10	Génération des pressions initiales	56
Fig.IV.11	Phase 2	57
Fig.IV.12	Phase 4	57
Fig.IV.13	Phase 6	57
Fig.IV.14	Phase 7	57
Fig.IV.15	Phase 17	57
Fig.IV.16	Phase 22	57
Fig.IV.17	Techniques de mesure	58
Fig.IV.18	Inclinomètre et tubage de mesure	59
Fig.IV.19	La déformation du maillage	60
Fig.IV.20	Présentation de déplacement horizontal à excavation de profondeur 4.5m	60
Fig.IV.21	Présentation de déplacement horizontal à excavation de profondeur 16.80m	61
Fig.IV.22	Présentation de déplacement horizontal à excavation de profondeur 25.15m	61
Fig.IV.23	Diagramme de l'effort normal de l'applique sur des parois moulées phase 5	62

Liste des figures

Fig.IV.24	Diagramme de l'effort normal des éléments structuraux phase 15	62
Fig.IV.25	Diagramme de l'effort normal des éléments structuraux phase 19	62
Fig.IV.26	Diagramme de l'effort cisaillement des éléments structuraux phase 5	63
Fig.IV.27	Diagramme de l'effort cisaillement des éléments structuraux phase 15	63
Fig.IV.28	Diagramme de l'effort cisaillement des éléments structuraux phase 19	63
Fig.IV.29	Diagramme de Moment fléchissant des éléments structuraux phase 5	64
Fig.IV.30	Diagramme de Moment fléchissant des éléments structuraux phase 15	64
Fig.IV.31	Diagramme de Moment fléchissant des éléments structuraux phase 19	64

Liste des tableaux

N°	Titre des tableaux	Page
Chapitre I Généralités sur les ouvrages de soutènement		
Tableau I.1	Montre les différents types de soutènement	4
Chapitre IV Modélisation de l'ouvrage et analyse des résultats		
Tableau.IV.1	Résumé des profondeurs des facies existantes	45
Tableau. IV.2	Paramètres géotechniques de calcul - sols (valeurs de référence)	48
Tableau. IV.3	Paramètres géotechniques de calcul – roche	48
Tableau .IV.4	Caractéristiques par mètre de développement des éléments du type « plate » considérés pour simuler les structures de blindage	49
Tableau .IV.5	Caractéristiques des éléments types « node-to-node Anchor » considérés pour simuler les niveaux de boutonnage matérialisés par des profils métalliques	49
Tableau. IV.6	Éloignement entre appuis pour chaque section de calcul	49
Tableau. IV.7	Les valeurs maximales de toutes les phases de calcul	65

Table de matières

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Dédicace	III
Résumé	IV
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	XI
Table des matières	XII
Introduction générale	1

Chapitre I Généralités sur les ouvrages de soutènement

I.1 Introduction	3
I.2 Historique	3
I.3 Différents types d'ouvrage de soutènement.....	4
I.3.1 Cas où la poussée est reprise par le poids de l'ouvrage de soutènement	5
I.3.1.1 Les murs poids en béton ou en maçonnerie	5
I.3.1.2 Mur en terre armée	5
I.3.1.3 Ouvrage cellulaire	6
I.3.2 Cas où la poussée est reprise par des ancrages	6
I.3.3 Cas où la poussée est reprise par encastrement de l'ouvrage de soutènement.....	7
I.3.3.1 Les murs cantilevers en béton armé	7
I.3.3.2 Les rideaux palplanche	10
I.4 Paroi moulée.....	12
I.4.1 Généralités et définition de paroi moulée.....	12
I.4.2 Mise en œuvre de paroi moulée	13
I.4.3 Différents types des parois moulées.....	15
I.4.3.1 Paroi d'étanchéité	15
I.4.3.2 Les parois de soutènement simple	16
I.4.3.3 Les parois moulées classiques	17
I.4.3.4 Les parois caissons	19
I.4.3.5 Les parois préfabriquées.....	20
I.5 Conclusion.....	21

Chapitre II Présentation du projet

II.1 Introduction.....	22
------------------------	----

Table de matières

II.2	Présentation de la wilaya d'Alger	22
II.3	Le réseau de métro d'Alger	23
II.4	Localisation de la station	24
II.5	Description de la station	25
II.6	Présentation de la structure	25
II.6.1	Paroi moulée :.....	26
II.6.2	Paroi de pieux	27
II.6.3	Les butons	28
II.6.3.1	Le butonnage direct	28
II.6.3.2	Le butonnage sur lierne	29
II.7	Méthode d'exécution de station "TOP- DOWN"	29
II.8	Conclusion	30
Chapitre III Présentation de l'outil de simulation		
III.1	Introduction	31
III.2	Présentation du logiciel PLAXIS 2D	31
III.2.1	Les sous-programmes de Plaxis2D	32
III.2.1.1	Le programme d'entrée des données (input)	32
III.2.1.2	Le programme de calcul (Calculations)	34
III.2.1.3	Le programme de résultats (output) :	35
III.2.1.4	Le programme courbe (Curves) :	36
III.3	Les étapes nécessaires de la modélisation avec Plaxis2D	37
III.3.1	Géométrie	37
III.3.2	Conditions aux limites	38
III.3.3	Définition des paramètres des matériaux	38
III.3.4	Maillage	38
III.3.5	Les conditions initiales	38
III.3.6	Phase de calcul	39
III.3.7	Visualisation des Résultats	39
III.4	Les lois de comportement utilisés dans Plaxis2D	39
III.4.1	Modèle de Mohr-Coulomb	40
	Le module d'Young E :	42
	Le coefficient de Poisson ν	42
	La cohésion c	43

Table de matières

L'angle de frottement ϕ	43
L'angle de dilataance	43
III.5 Conclusion	44
chapitre IV Modélisation de l'ouvrage et analyse des résultats	
IV.1 Introduction	45
IV.2 Présentations de projet	45
IV.3 Reconnaissance de site	46
IV.4 Les paramètres des matériaux utilisés	47
IV.4.1 Paramètres géotechniques	47
IV.4.2 Paramètres structurels	48
IV.5 Description du modèle géométrique retenu	49
IV.5.1 Les différents niveaux de l'excavation	51
IV.5.2 Les différents niveaux de butonnage	51
IV.6 La modélisation numérique	52
IV.6.1 Les phasages de section de modélisation	52
IV.6.2 Génération des maillages	55
IV.6.3 Les conditions hydrauliques	55
IV.6.4 La géométrie de quelques phasages de calculs	57
IV.7 Les instruments de contrôle	58
IV.7.1 Exécution de la mesure inclinométrique	58
IV.7.2 Interprétation de la mesure inclinométrique	59
IV.8 Les résultats et dissections	59
IV.8.1 Déformation du maillage	60
IV.8.2 Déformation des éléments structuraux	60
IV.8.2.1 Déplacement horizontal	60
IV.8.2.2 Effort normal	61
IV.8.2.3 Effort de cisaillement	63
IV.8.2.4 Moment fléchissant	64
IV.9 Conclusion	66
Conclusion générale	66
Liste de références	67
Annexe	70



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'exécution des excavations profondes dans les zones urbaines demande l'utilisation de structures de soutènement afin de soutenir les constructions existantes avoisinantes. En effet les excavations peuvent aller jusqu'à leurs fondations, ce qui constitue un réel danger. Même si ces structures sont souvent réalisées en génie civil, leur calcul et leur dimensionnement sont complexés : les interactions entre le sol, la paroi et les structures avoisinantes étant importantes, leur prise en compte est difficile.

Le choix des parois moulées est une nécessité plus qu'un avantage, en effet, pour construire sous le niveau naturel du terrain, une autre solution envisageable aurait été de terrasser sur une surface beaucoup plus grande et de réaliser ensuite la paroi extérieure. Mais ce cas n'était pas envisageable sur un chantier à cause de son implantation au centre-ville qui ne laisse pas assez de place en périphérie de l'ouvrage pour la réalisation. La solution envisageable des parois moulées fut donc adoptée.

L'analyse de la stabilité des parois est généralement réalisée avec la méthode d'équilibre limite basée sur des hypothèses concernant la forme de la surface de l'excavation. Ces méthodes restent populaires en raison de leur simplicité et le nombre réduit de paramètres dont ils ont besoin, qui sont la géométrie des parois, de la topographie, la géologie, les charges statiques et dynamiques, les paramètres géotechniques et conditions hydrogéologiques. Cette analyse est réalisée par le logiciel PLAXIS 2D pour notre étude.

L'objectif de ce travail est l'étude d'une paroi moulée de la station de métro Alger, avec l'analyse des résultats obtenus (déplacements, moments, les efforts), pour éviter les problèmes en cours de réalisation de projet.

Le premier chapitre présente les généralités sur les ouvrages de soutènement qui sont classés selon leur mode de reprise de la poussée et son application aux structures de soutènement. On présente également dans ce chapitre la mise en œuvre de paroi moulée et ces différents types.

Le deuxième chapitre donne la présentation du projet ainsi que celle de la wilaya d'Alger, le réseau de métro d'Alger, localisation de la station, description de la station, présentation de la structure et méthode d'exécution de station.

Dans le troisième chapitre, présentations de l'outil de simulation Plaxis2D, les sous-programmes, les étapes nécessaires de la modélisation et les lois de comportement utilisés.

Introduction générale

Quatrième chapitre, modélisation de l'ouvrage et les paramètres des matériaux utilisés dans la simulation et analyse des résultats à savoir : les déplacements maximaux et les différentes contraintes, et faire la comparaison avec les mesures données par l'inclinomètre.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES OUVRAGES
DE SOUTÈNEMENT

I.1 Introduction

Le mur de soutènement est un mur vertical ou sub-vertical qui permet de contenir des terres (ou tout autre matériau granulaire ou pulvérulent) sur une surface réduite. La retenue des terres par un mur de soutènement répond à des besoins multiples: préserver les routes et chemins des écoulements et glissement de terrain, structurer une berge naturelle en un quai (ports maritimes et voies navigables), parer en soubassement les fondations d'édifices de grande hauteur ou de digues, créer des obstacles verticaux de grande hauteur (mur d'escarpe et glacis dans les fortifications), soutenir des fouilles et tranchées de chantier pour travailler à l'abri de l'eau (batardeau), établir des fondations ou créer des parkings souterrains, etc. On trouve des murs de soutènement en pierres sèches, en moellons, en pierres de taille, en briques, en béton armé, en acier, voire en bois ou en polymère. [1]

I.2 Historique

Pendant l'empire Romaine, les murs de soutènement ont été utilisés dans les monuments comme les galeries dans les amphithéâtres et dans les théâtres. En effet, les murs jouaient à la fois le rôle de gradin et de soutènement des talus sur les collines où se situait l'ouvrage.

Après la période antique, les phénomènes naturels et sociaux ont poussé les hommes à les employer dans d'autres domaines comme l'agriculture. Ainsi, l'usage des rizières en terrasse fut l'une des premières utilisations de la technique. La méthode consistait à border les terrasses par des pierres crues en montant les pierres brutes sans mortier dans le but d'empêcher l'érosion du sol.

La méthode s'est ensuite étendue pour permettre la protection des berges et des talus des routes accidentées jusqu'à constituer un quai ou un appontement, recevoir des édifices imposant grâce à la construction des murs massifs constituées de blocs de pierre et avec des méthodes de montage plus soignées.

Ce n'est qu'au milieu du XXème siècle que l'usage du voile en béton et de la semelle de fondation a été introduit dans les procédés de mise en œuvre. Enfin, différentes méthodes se sont ensuite développées depuis quelques décennies comme les parois préfabriquées, les murs en gabion, les parois ancrées, etc. ... mais dont la principale fonction reste toujours le même rôle de protection et soutènement. [2]

I.3 Différents types d'ouvrage de soutènement

Dans la définition Eurocode (EC7_1,2004), un ouvrage de soutènement retient des terrains (sols, roche ou remblai) et/ou de l'eau. L'effort de poussée exercé par le massif de terres retenu peut être repris de divers manières, trois modes principaux peuvent être distingués :[2]


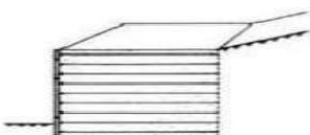
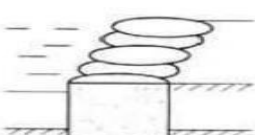
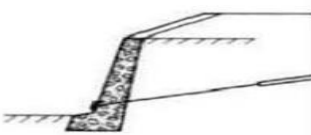
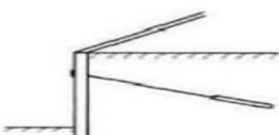
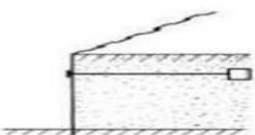
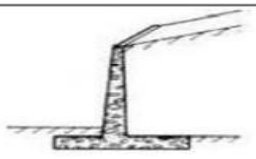
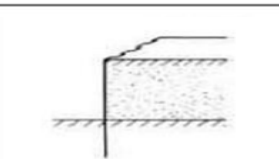
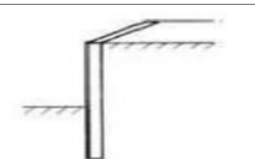
- ✓ Cas où la poussée est reprise par le poids de l'ouvrage de soutènement ;
- ✓ Cas où la poussée est reprise par des ancrages ;
- ✓ Cas où la poussée est reprise par encastrement de l'ouvrage de soutènement.

On distingue donc trois grandes familles d'ouvrages de soutènement :

- **Les murs de soutènement** : Ce sont des ouvrages généralement fondés superficiellement, dont le poids (incluant parfois une partie de la masse de sol retenu) joue un rôle prépondérant.
- **Les écrans de soutènement** : Ce sont des ouvrages minces (acier, béton armé ou bois), retenus ou soutenus par des ancrages, des butons ou la butée des terres. Leur résistance à la flexion joue un rôle important, alors que leur poids est insignifiant.
- **Les ouvrages en remblai ou sol renforcé** : Ce sont des ouvrages qui comportent des rangées sensiblement horizontales de renforcements, interposées entre des couches successives du remblai au fur et à mesure de la construction de l'ouvrage.

Le tableau suivant montre les différents types d'ouvrages de soutènement classés d'après la distinction précédente :

Tableau I.1 Montre les différents types des soutènements.

Classification des ouvrages de soutènement d'après le mode de reprise de la poussée			
Mode de reprise de la poussée	Ouvrages de soutènement		
Poids de l'ouvrage	 Mur poids en béton ou maçonnerie	 Mur en terre armée	 Ouvrage cellulaire
Ancrage	 Mur en béton, ancré	 Paroi moulée ancrée	 Rideau ancré
Encastrement	 Mur cantilever en béton armé	 Rideau de palplanches	 Paroi moulée

I.3.1 Cas où la poussée est reprise par le poids de l'ouvrage de soutènement

Dans ce cas et à partir du tableau I.1, on a :

I.3.1.1 Les murs poids en béton ou en maçonnerie

Le type d'ouvrage le plus classique et le plus ancien . Ce sont des ouvrages rigides qui ne peuvent supporter sans dommages des tassements différentiels [3] et est un mur de soutènement dont la stabilité est assurée en grande partie par son propre poids. [4]

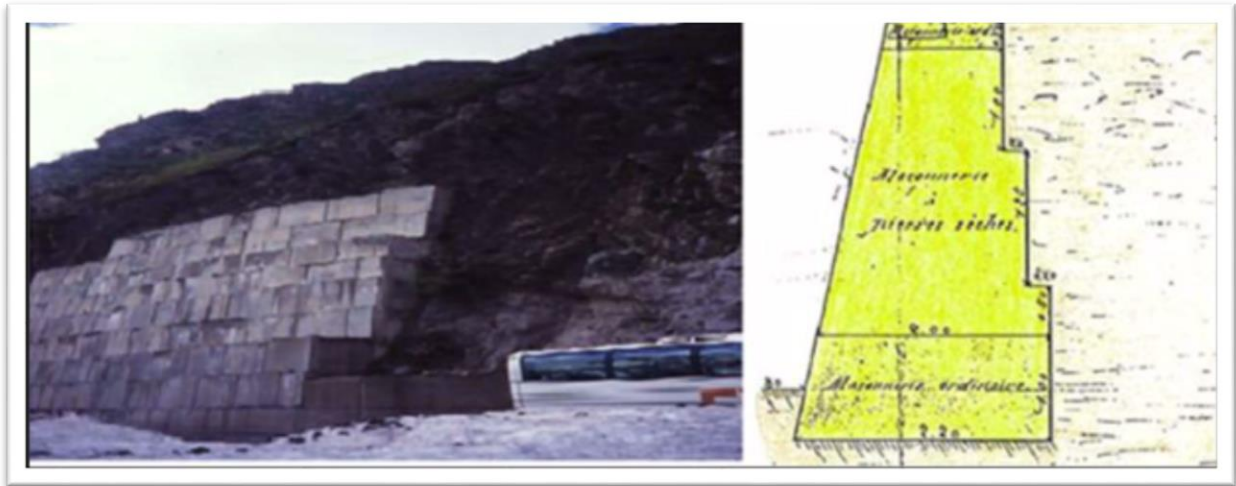


Fig.I.1 Murs poids en béton ou en maçonnerie.

I.3.1.2 Mur en terre armée

La terre armée a été inventée par Henri VIDAL, ingénieur des Ponts et Chaussées, et architecte, qui a publié les premiers résultats de ses recherches en 1963.

La Terre Armée est une méthode de construction basée sur l'association d'un remblai compacté qui représente la part la plus importante en volume et d'armatures (métalliques ou géo-synthétiques) liées à un parement (Figure I.2).

L'alternance de couches de remblai pulvérulent et de bandes d'armatures bien réparties horizontalement conduit au développement d'efforts d'interaction et donne naissance à un matériau composite à part entière apte à résister à son propre poids et aux actions qui lui sont appliquées au long de la durée de service de l'ouvrage. Les applications les plus courantes sont les murs de soutènement, les rampes d'accès aux ouvrages d'art et les culées de pont. [5]

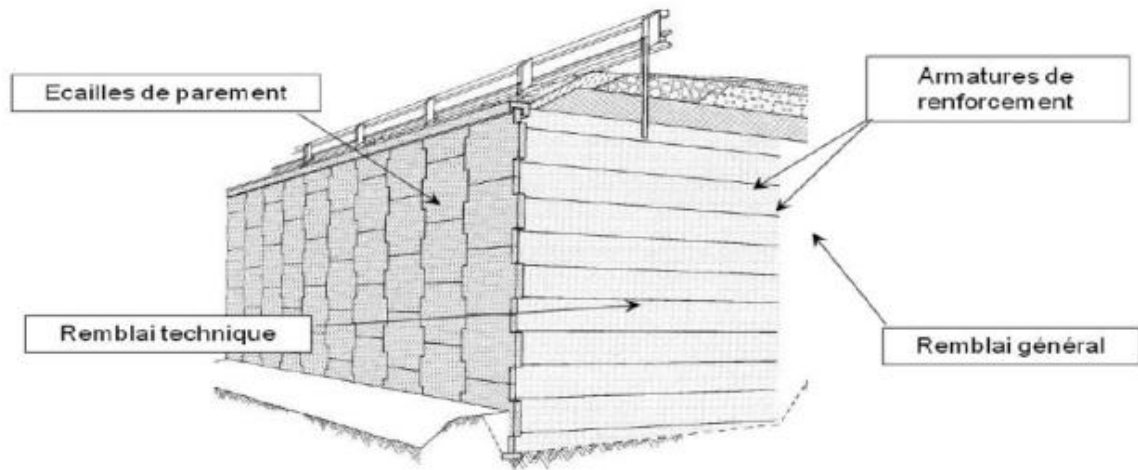


Fig.I.2 Mur en terre armée

I.3.1.3 Ouvrage cellulaire

C'est un mur en béton armé préfabriqué ou en métal constitué d'éléments superposés.

Dans un ouvrage cellulaire, la cellule est remplie de sol et l'ensemble forme un ouvrage qui peut être, dans certains cas, très souple, on l'utilise généralement dans les travaux maritimes.[6]

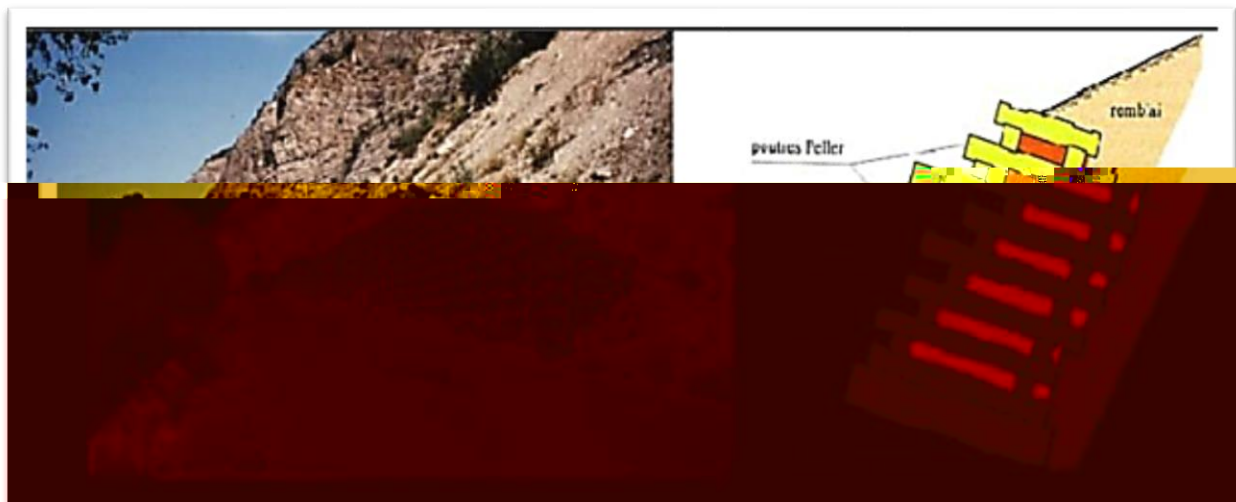


Fig.I.3 Mur cellulaire.

I.3.2 Cas où la poussée est reprise par des ancrages

Dans les deux cas poussés reprise par le poids ou l'encastrement, il est possible d'utiliser des tirants d'ancrage pour reprendre l'effort de poussée en partie ou totalité, c'est le cas des murs en béton, les parois moulées, paroi berlinoise et des rideaux. À la différence d'une paroi moulée, une paroi berlinoise est réalisée à partir de poteaux placés préalablement dans le sol en place. Au fur et à mesure de l'excavation, on vient placer entre les poteaux des éléments

de soutènement soit préfabriqués (poutres, plaques), soit coulés en place, et l'on reprend la poussée des terres par des ancrages précontraints fixés sur les poteaux. Il existe également des techniques d'ouvrages en déblai où la poussée des terres est totalement reprise par des ancrages précontraints. C'est le cas des murs épinglés construits par excavations successives de 2 m de hauteur environ, avec coulage d'éléments verticaux en béton armé et mise en place d'ancrages précontraints.[6]

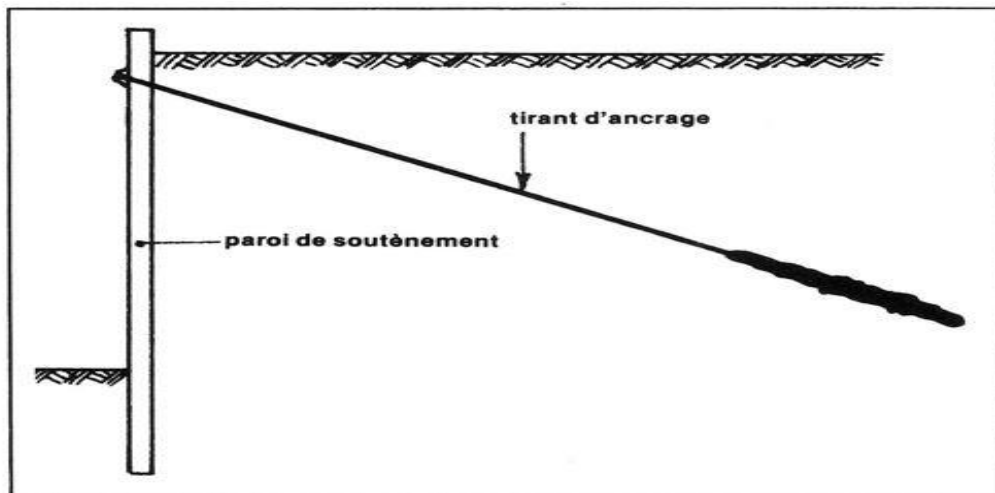


Fig.I.4 Ancrage de paroi moulée.

I.3.3 Cas où la poussée est reprise par encastrement de l'ouvrage de soutènement

Dans ce cas et à partir du tableau cité dessus (**Le tableau I.1**), on a :

I.3.3.1 Les murs cantilevers en béton armé

Les murs de soutènement en béton armé, également appelés mur cantilever, sont très couramment employés. Ils sont constitués d'un voile résistant en béton armé encasté sur une semelle de fondation, en béton armé également. Celle-ci comprend le patin, situé à l'avant du voile, et le talon, situé à l'arrière. La semelle peut être pourvue d'une bêche (longrine) pour améliorer la stabilité de l'ouvrage au glissement. Cela peut être le cas notamment lorsque la bonne résistance du sol de fondation et/ou des problèmes d'emprise permettent ou imposent une semelle peu large.

Les murs de soutènement en béton armé sont normalement pourvus d'un dispositif de drainage disposé à l'arrière du voile auquel est associé un dispositif d'évacuation des eaux (barbacanes généralement), lorsqu'ils ne sont pas prévus pour maintenir un niveau d'eau à

l'amont. Ils sont constitués de plots de 15 à 30 m de longueur (murs coulés en place). L'eau constitue un véritable danger pour la stabilité de l'ouvrage l'évacuer est donc une priorité[5]

Les murs en béton armé peuvent avoir des formes diverses et être réalisés de façons multiples. [7]

I.3.3.1.1 Mur en «T renversé» classique

Le mur en « T renversé » est la forme classique pour un mur en béton armé de treillis soudé. Il est économique sans contreforts, tant que sa hauteur n'excède pas 5 à 6 mètres, et peut-être réalisé sur un sol de qualités mécaniques peu élevées. En effet, par rapport à un mur-poids de même hauteur, il engendre des contraintes sur le sol plus faibles pour une même largeur de semelle. [7]

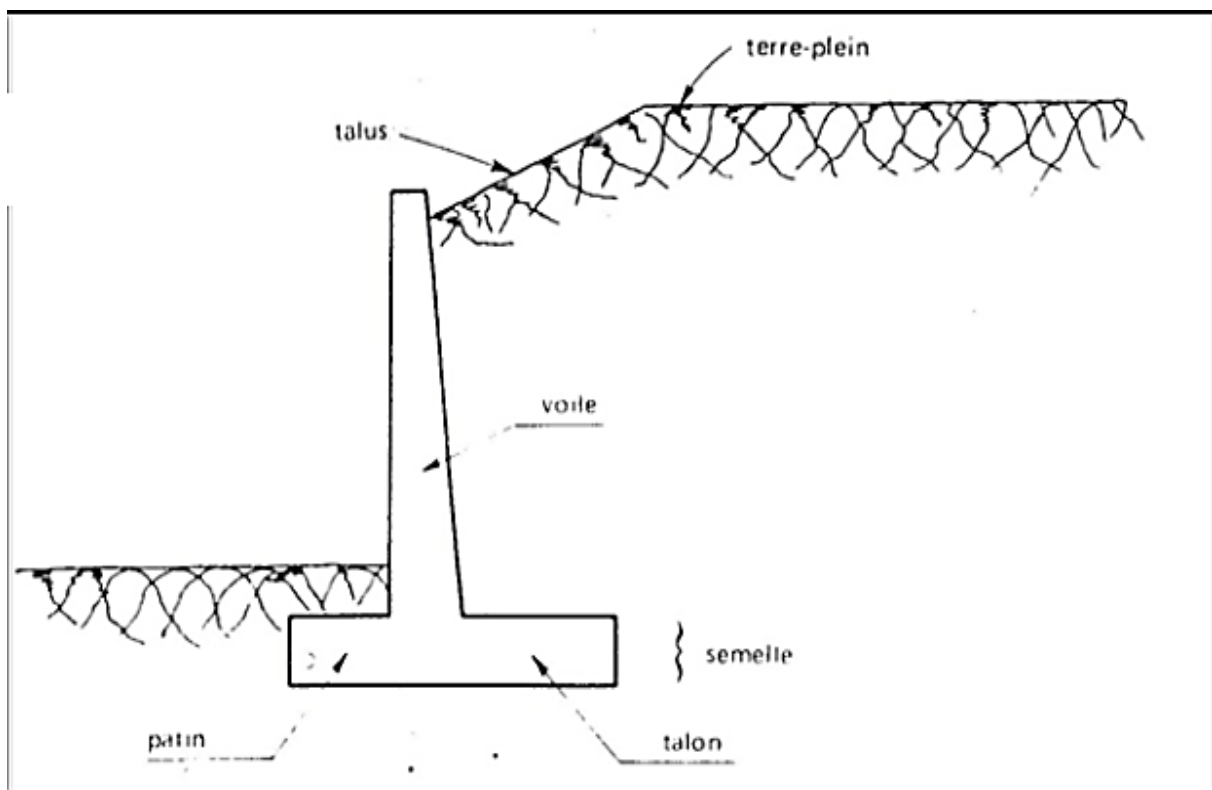


Fig.I.5.1 Mur en «T renversé» classique

I.3.3.1.2 Mur à contreforts

Lorsque la hauteur du mur devient importante ou que les coefficients de poussée sont élevés, le moment d'encastrement du voile sur la semelle devient grand. Une première solution consiste à disposer des contreforts dont le but est de raidir le voile. [7]

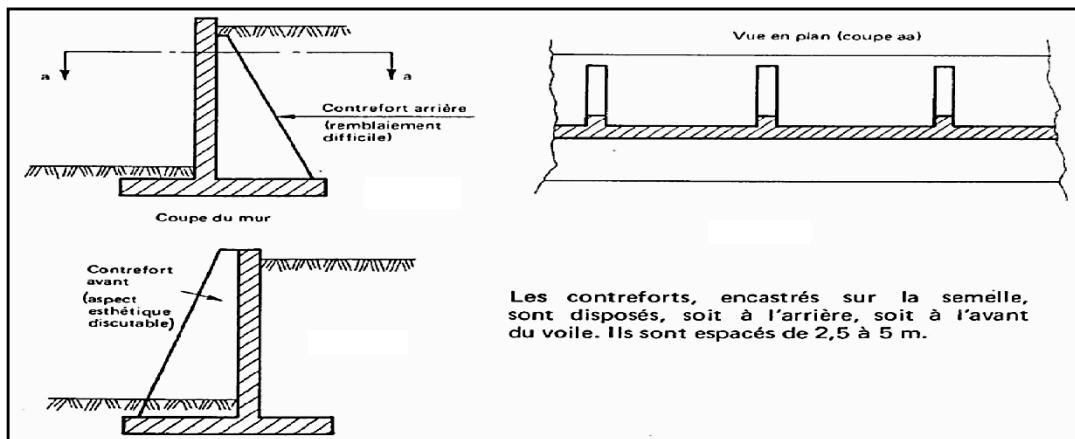


Fig.I.5.2 Mur à contreforts en béton arme

I.3.3.1.3 Murs divers

On peut encore adopter d'autres solutions pour limiter les poussées des terres sur le voile des murs, mais elles sont d'un emploi peu fréquent. Ces solutions, certes astucieuses et séduisantes, ont l'inconvénient d'être d'une exécution difficile et de grever le coût du mur, même si l'on économise par ailleurs sur la matière. [7]

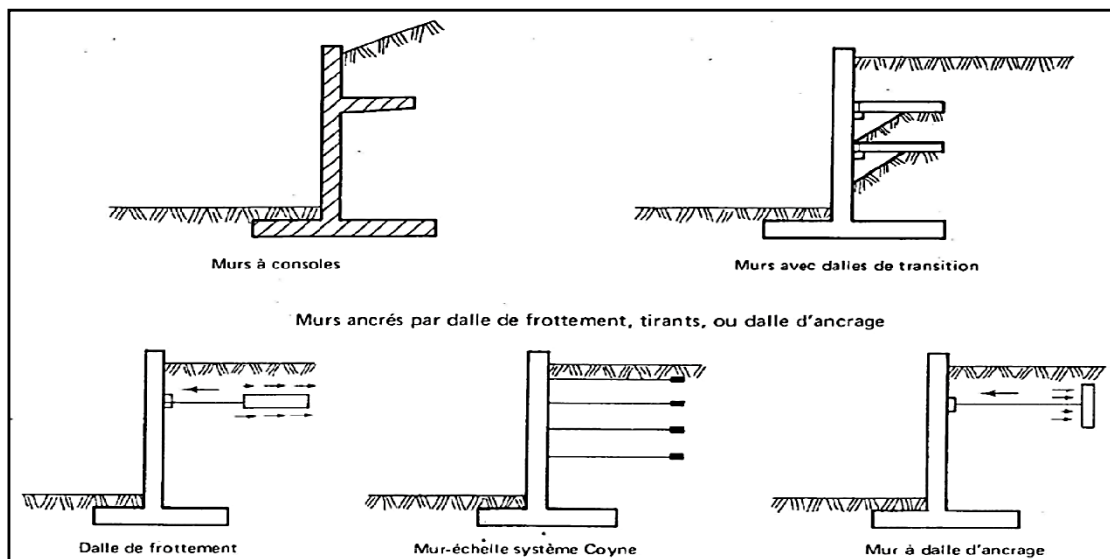


Fig.I.6 Les murs dévers

Parfois, la stabilité au glissement du mur nécessite de disposer sous la semelle une « bêche ». Celle-ci peut être soit à l'avant, soit à l'arrière de la semelle, soit parfois encore en prolongement du voile. Cette bêche est toujours coulée en « pleine fouille » sans coffrage.[7]

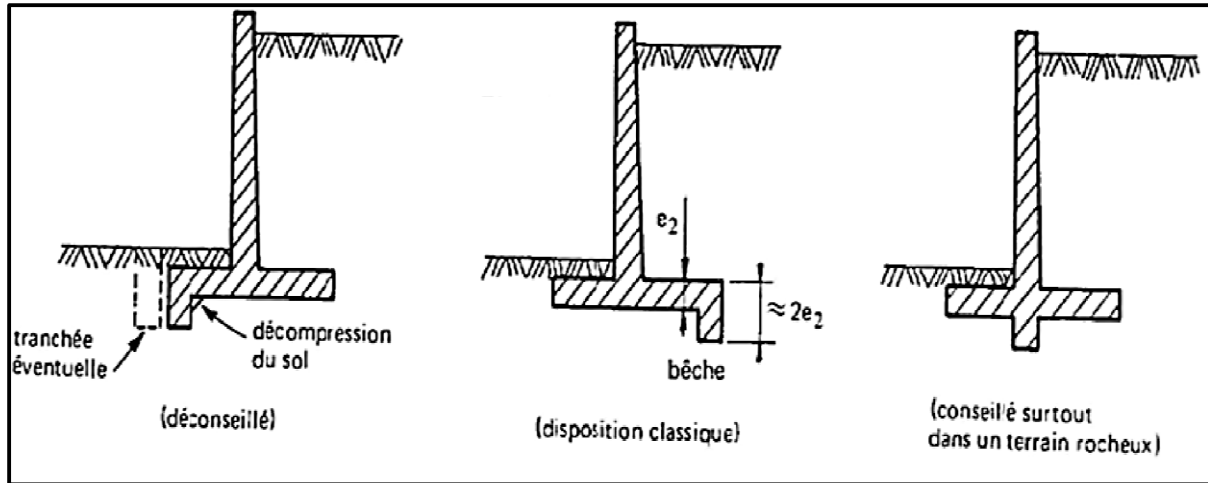


Fig.I.7 Diverses dispositions de bêches.

I.3.3.2 Les rideaux palplanche

Largement utilisées dans les applications géotechniques, les palplanches sont des lames métalliques enfoncées verticalement dans le sol. Flexibles par leur faible épaisseur, leur longueur est en pratique limitée à 30 m.[8]

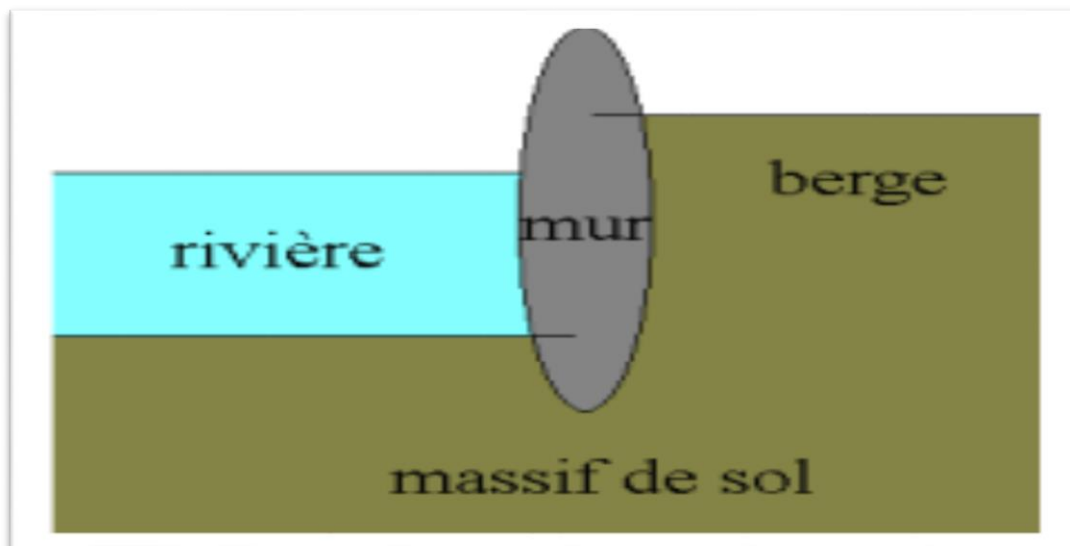


Fig.I.8 Schéma de principe du mur de palplanche.

- ✓ Comme on ne peut enfoncer la paroi simultanément sur toute sa longueur, celle-ci est découpée en éléments verticaux étroits à la manière de touches de pianos qui vont être mis en place l'un après l'autre comme illustré sur la Figure I.9 : ces éléments sont appelés des palplanches. [8]



Fig.I.9 Assemblage des éléments des palplanches.

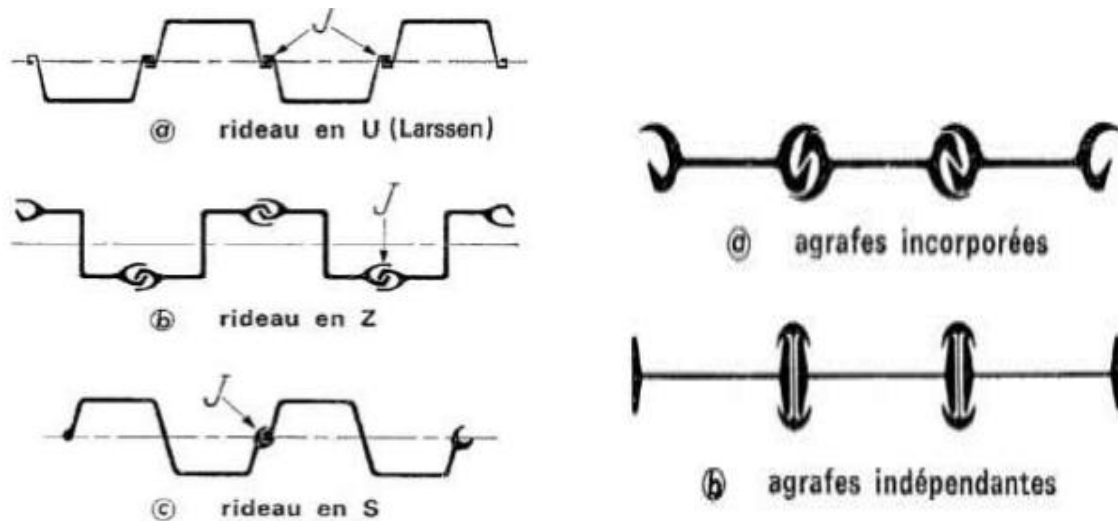
- ✓ Les rideaux qu'elles constituent sont assimilables à des murs ou des parois supportant la poussée des terres en place, ou des remblais et des dénivelés.

On distingue :

- les palplanches à module ou à inertie.
- les palplanches plates.

Les premières se comportent comme des poutres verticales, mobilisant la butée au niveau de leur encastrement dans le sol et supportant les poussées dues aux dénivellations de terrain et d'eau (palplanches Larssen).

Les secondes permettent de réaliser des enveloppes cylindriques fermées, contenant des matériaux dont les poussées engendrent des tractions importantes dans les joints, ces derniers sont, de ce fait, conçus pour résister à des efforts. [9]



a. Les palplanches à module

b. Les palplanches plates

Fig.I.10 Les différents types des palplanches.

I.4 Paroi moulée

I.4.1 Généralités et définition de la paroi moulée

La paroi moulée est le terme logique de l'évaluation des rideaux de pieux jointifs ou sécants mis en point depuis 1934 sur différents chantiers de génie civil, les premiers brevets ont été pris en Italie par professeur VEDER en 1952 et par MARCONI 1953.[10]

On appelle paroi moulée, un écran vertical en béton armé ou non, construit sans blindage ni coffrage à partir de la surface du sol par excavation à l'aide de machines appropriées. Ce procédé de construction permet d'exécuter des murs ou écrans au sein même du terrain avant d'effectuer le terrassement correspondant aux fouilles de pleine masse. Ce système est donc particulièrement intéressant lorsqu'on se trouve dans la nappe phréatique.[10]

Le principe est de creuser une tranchée, constamment tenue pleine de boue durant l'excavation, puis de couler du béton dedans.[11]



Fig.I.11 Paroi moulée

L'épaisseur de ces parois verticales varie généralement de 0,50 m à 1,50 m, leur profondeur souvent compris entre 10 m et 20 m, n'est limitée que par les moyens mis en œuvre pour les réaliser. (Certaines parois ont atteint 90 m de profondeur au barrage de la villita au Mexique par exemple)[10]

La paroi moulée peut accomplir plusieurs fonctions par rôle :

- **De fondation (barrette)** : La paroi peut jouer le rôle de fondation d'un ouvrage, elle transmet de ce fait les charges de l'ouvrage vers un sol en profondeur de meilleur capacité portante.
- **De soutènement** : Dans ce cas la paroi joue un rôle de parement vertical soutenant le sol et les surcharges, fixes ou mobiles, qui lui sont appliquées, on distingue trois types de paroi de soutènement selon la norme NF 1538 (11-2015)
 - ✓ les parois moulées en béton
 - ✓ les parois moulées préfabriquées
 - ✓ les parois moulées en coulis armée
- **De paroi étanche** : Dans ce cas la paroi est utilisée pour éviter le passage d'eau ou d'autres liquides d'un espace à un autre, elle n'a pas le rôle de soutènement.

I.4.2 Mise en œuvre de la paroi moulée : La figure suivante représente les étapes de réalisation d'une paroi moulée.

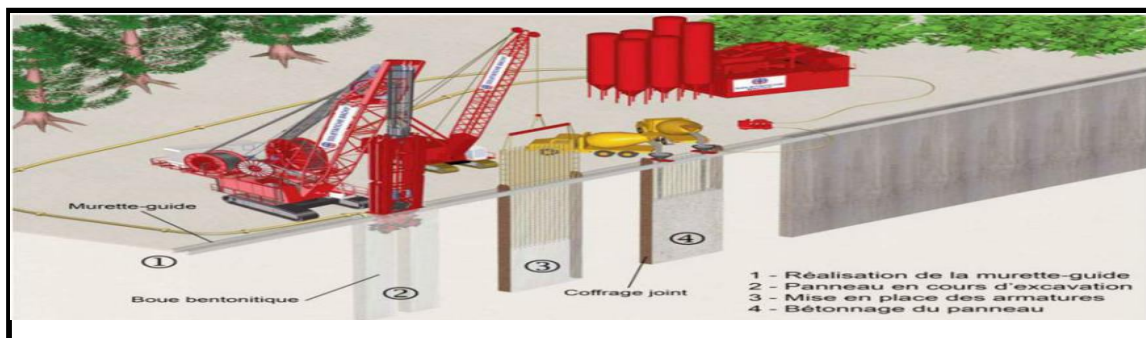


Fig.I.12 Schéma d'exécution d'une paroi moulée

I.4.2.1 La première étape : l'ouvrage exécuté est la murette-guide, il permet l'implantation des parois, la stabilité du terrain en tête soumis au battement de la boue, la suspension des cages d'armatures, l'appui pour le positionnement puis l'extraction des coffrages d'extrémités et de guider l'outil de forage.

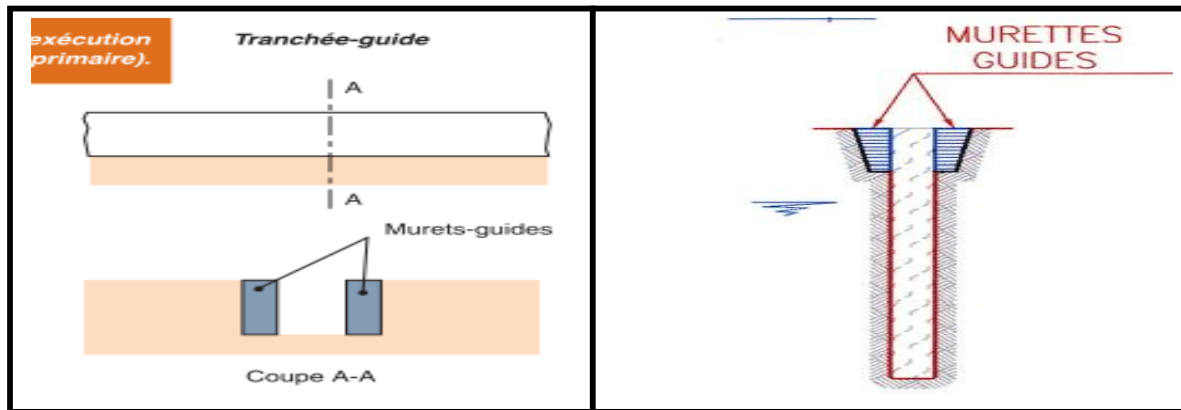


Fig.I.13 Murettes guides coupe longitudinale et transversale

I.4.2.2 La deuxième étape : l'excavation : creuse, à l'aide de grappins rectangulaires spéciaux, des tranchées individuelles dans le sol ('panneaux'), jusqu'à la profondeur requise, Pour éviter l'effondrement de la tranchée durant l'excavation, celle-ci est remplie d'un fluide de support (généralement de la boue bentonite) après l'excavation.

- ❖ 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.[15]
- ❖ Le rôle de la boue de bentonite est d'assurer une stabilité autour de l'excavation pendant la phase du forage. La boue est généralement un mélange d'eau et de bentonite (gonflante) dans laquelle sont introduits des polymères[14]

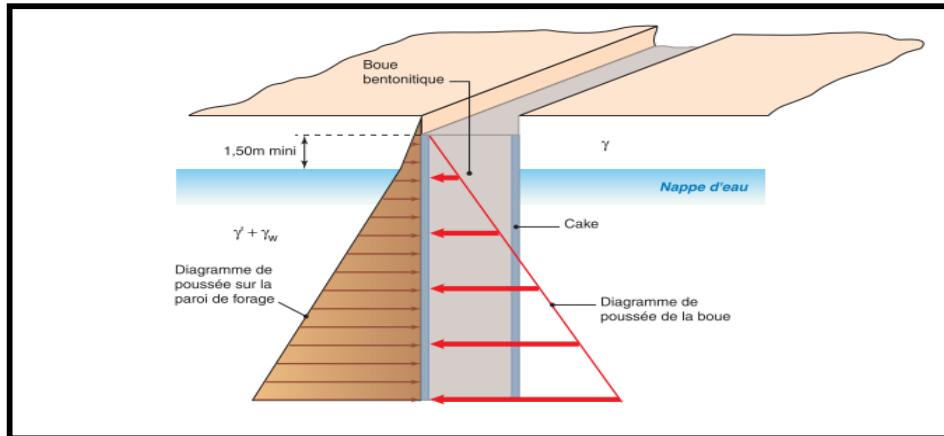


Fig.I.14 Principe de soutènement de boue de bentonite

I.4.2.3 La troisième étape : la mise en place de la cage d'armature: puis les cages d'armature et les tubes plongeurs sont mis en place dans la tranchée excavée, après quoi le béton est coulé en une phase par le fond et le fluide d'excavation est pompé par le dessus. Cette technique permet d'obtenir une paroi de soutènement jointive.

I.4.2.4 En fin : le bétonnage du panneau : en béton coulé dans le sol.

I.4.3 Différents types des parois moulées

I.4.3.1 Paroi d'étanchéité: Destinée à créer une barrière étanche dans l'épaisseur du sol, les parois d'étanchéité à base d'un liant spécial offrent une solution idéale pour maîtriser les fluctuations de la nappe phréatique n'étant pas armée.

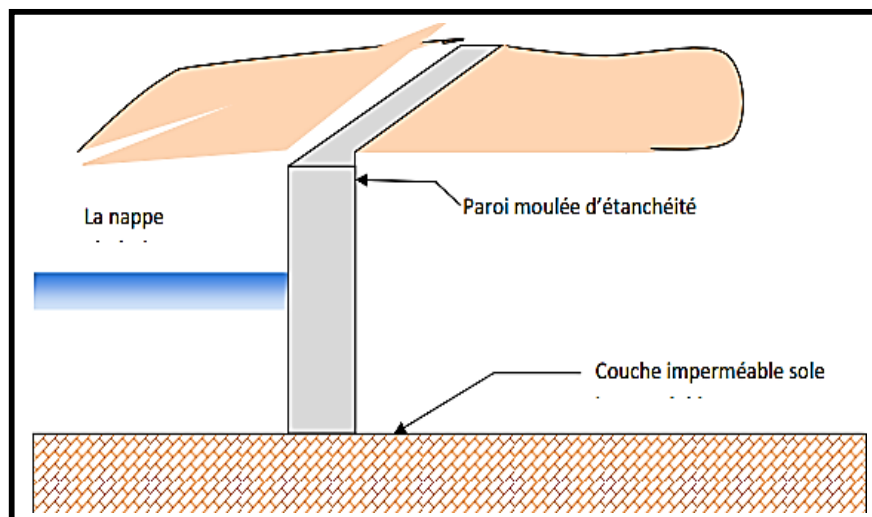


Fig.I.15 Schéma de principe paroi moulée d'étanchéité.

Les parois peuvent être placées à la verticale et à l'horizontale. Ce type de paroi ne comporte pas de terrassement après son exécution. Elles assurent une résistance durable à l'eau, elles sont aussi de trois types :

I.4.3.1.1 Paroi à bentonite : La tranchée excavée est remplie de boue de bentonite mélangée avec le sol extrait[12] (graviers)[13] créant ainsi un écran étanche sans aucune résistance mécanique[12]. L'épaisseur importante, d'au moins 1,50 m.[13]

I.4.3.1.2 Paroi en béton plastique : La tranchée est remplie d'un ciment plastique à dosage de ciment réduit introduit au tube plongeur sous boue de bentonite, utilisation d'adjuvant hydrofuge (épaisseur variable de quelques centimètres à une soixantaine, suivant le dosage).

I.4.3.1.3 Paroi en coulis auto durcissable : La tranchée est remplie d'un coulis à base de ciment, de bentonite et divers additifs assurant son auto durcissement qui se répandent dans les pores des parois de la tranchée augmentant ainsi son imperméabilité. (Épaisseur de 50 à 60 cm).

I.4.3.2 Les parois de soutènement simple: La paroi, en béton armé, est alors maintenue par des tirants d'ancrage permanents, ou par des contreforts, intérieurs ou extérieurs, utilisée généralement dans le cas où il n'est pas prévu de construction dans l'excavation après terrassement.

Le fonctionnement des parois moulées classiques est celui d'une structure chargée par la poussée des terres et de l'eau soutenue et résistant en flexion pour mobiliser des appuis constitués d'une part par le sol en fiche et d'autre part par des tirants ou butons disposés dans la partie libre de l'écran.

L'écran est généralement fiché de façon significative dans le terrain : de façon typique, la fiche pour une paroi ancrée varie de 30% à 50% de la hauteur de fouille, en permettant la mobilisation d'un appui au sein du terrain, cette fiche joue un rôle déterminant dans l'équilibre de l'ouvrage. La nature de cet appui est variable selon les propriétés de terrain, la longueur en fiche de l'écran et sa rigidité et la distribution des autres appuis, tirant ou butons en partie aérienne. Elle peut se réduire à un appui simple pour des écrans très rigides, ancrés en partie supérieure et dont la fiche est courte, tandis que pour des écrans ne possédant pas d'appuis en partie supérieure l'encastrement en fiche devra être totale. Dans le cas général, l'écran se trouve partiellement encastré dans le terrain.[16]

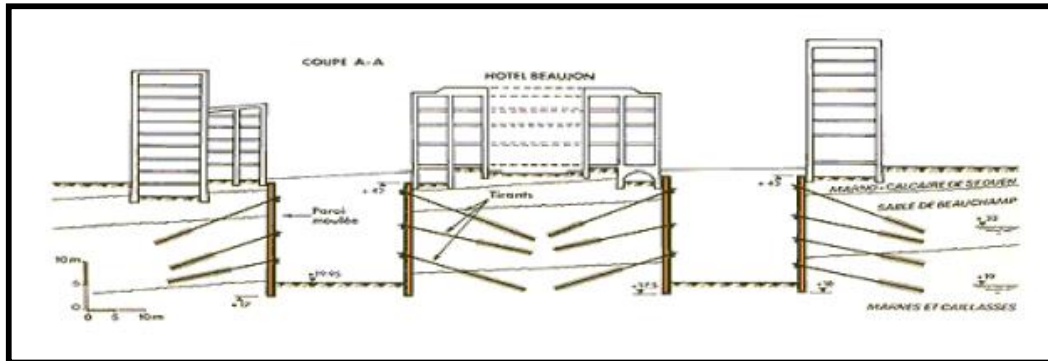


Fig.I.16 paroi moulée de soutènement simple encrée

Soutènement notamment pour les fouilles de grande profondeur (usine, centrale ...) Ouvrage hydraulique tel que les quais Fondation profonde qui transmette aux sols sous-jacents des charges permanentes et d'exploitations dans les zones urbaines pour protéger les structures à proximité de la fouille.

I.4.3.3 Les parois moulées classiques : En plus de ce qui a été mentionné précédemment sur le rôle de paroi moulée de soutènement, fondation et étanche et la technique classique il existe deux types des parois moulées classiques la paroi de tranchée couverte et paroi "jambes de pantalon".

I.4.3.3.1 La paroi de tranchée couverte : Surtout utilisée en travaux publics pour les voies de circulation (routes, chemins de fer, métro) et pour canaux souterrains surtout les parkings à niveaux multiples. On coule les parois moulées de rive en béton armé (éventuellement celles formant appuis intermédiaires), puis le plancher de couverture au niveau du sol, qui sert à buter les parois en tête.

Le terrassement est ensuite effectué en souterrain, sous ce plancher sur la hauteur du premier sous-sol. Plusieurs planchers successifs peuvent être coulés au cours du terrassement. D'une part, cette technique est utile de libération immédiate de la surface pour la circulation au niveau du sol existant suppression des tirants et des butons. [17]

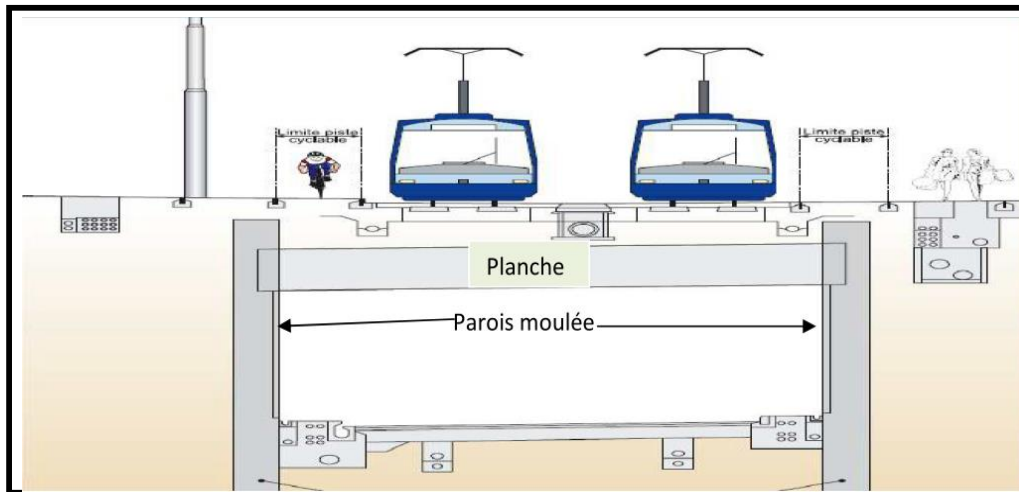


Fig.I.17 Schéma des parois moulées de tranchée couverte avec plancher

La méthode de "tranchée couverte" est généralement choisie pour procéder à la réalisation d'un ouvrage dans un environnement urbanisé et sous faible couverture

✓ **Les étapes de construction**

- 1 Ouverture d'une tranchée sur toute la longueur d'un ouvrage (tunnel par exemple).
- 2 Ferrailage et bétonnage de la paroi.
- 3 Forage et Terrassement réalisé en profondeur, à l'intérieur des parois.
- 4 Constitution de la dalle de couverture reposant sur les parois.
- 5 L'aménagement et mise en service

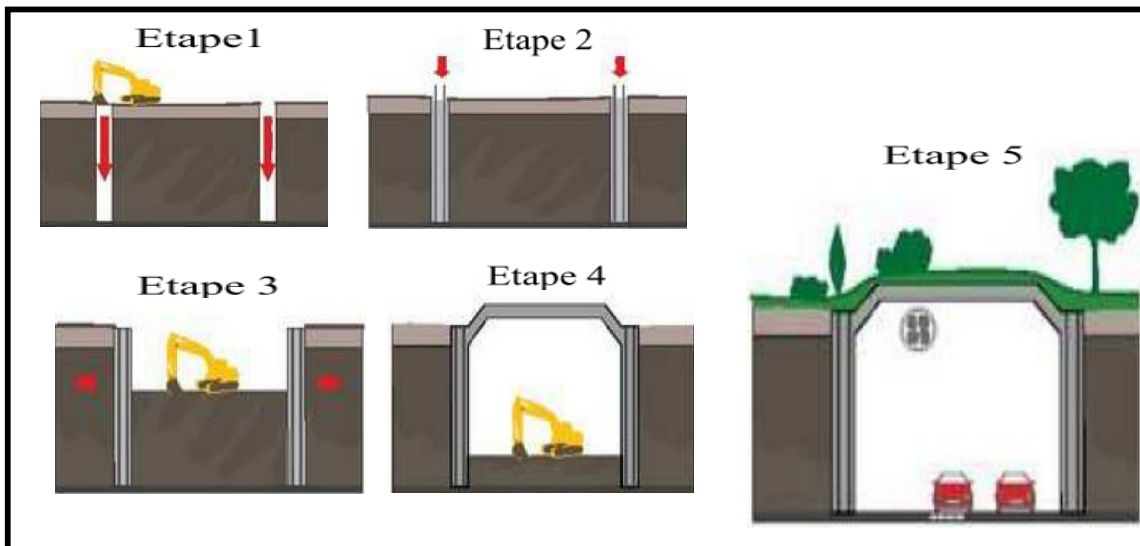


Fig.I.18 Les étapes de construction des parois moulées de tranchée couverte avec plancher.

I.4.3.3.2 Les parois "jambes de pantalon" : Dans le cas d'une paroi à fonction porteuse, la couche d'assise peut être située beaucoup plus bas que le dernier sous-sol et que les couches imperméables sous la nappe : la paroi de soutènement et d'étanchéité continue n'a pas besoin d'être prolongée jusqu'à l'assise de fondation. On la prolonge seulement sous une partie des panneaux de la paroi. On obtient ainsi une disposition dite "en jambes de pantalon".

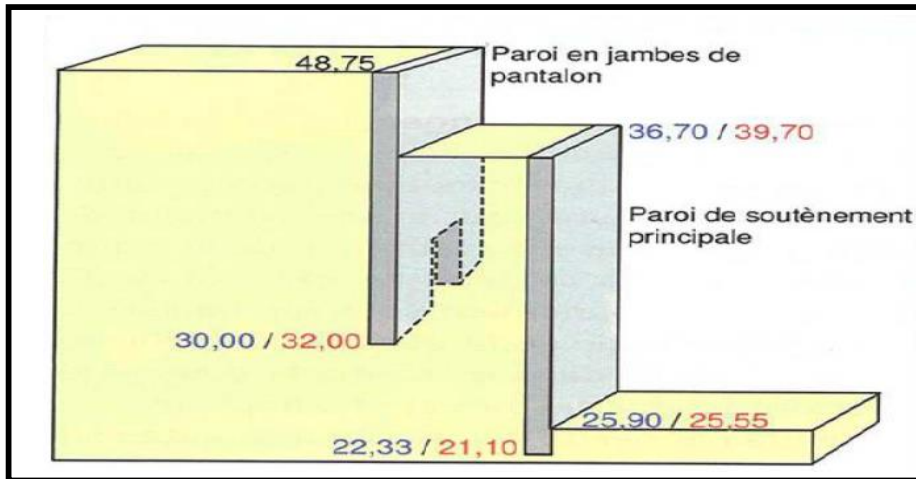


Fig.I.19 Les parois moulées "jambes de pantalon".

Parois en jambe de pantalon à deux fonctions : une fonction vis-à-vis de la stabilité et une fonction hydraulique, les panneaux les plus longs assurant la stabilité de l'ouvrage tandis qu'un meilleur écoulement de l'eau est assuré sous les panneaux adjacents plus courts ; cette disposition se rapproche quelque peu, du point de vue du fonctionnement en écran, de celui des parois composite.[16],[17]

I.4.3.4 Les parois caissons : en génie civil, un caisson, souvent appelé caisson à air comprimé lorsqu'il est en surpression, est une enceinte ouverte à sa partie inférieure, destinée au creusement de fondations profondes en terrain humide ou inondé, typiquement la fondation de piles de ponts en milieu de cours d'eau.[11]

Les parois caissons sont une autre mode de la technique de la paroi moulée, elle est consistée en une enveloppe en béton armé, que l'on remplit de gros béton après avoir retiré les terres contenues à l'intérieur.

Elle remplace, pour de très grandes dimensions et de grandes profondeurs, la technique des caissons havés.

Caissons havés ("ouverts") Les extrémités inférieure et supérieure sont ouvertes, Le caisson est foncé, en place Lorsque la cote finale est atteinte on assèche le caisson et on le remplit de béton Pour faciliter la pénétration du caisson dans le sol, les extrémités inférieures des parois latérales du caisson sont façonnées en biseau ; sur cette partie biseautée, ou "crinoline", est fixée une "trousse coupante" munie d'un "couteau" prolongeant la paroi extérieure du caisson, Elle permet de fonder des charges ou d'ancrer des efforts de traction considérables.

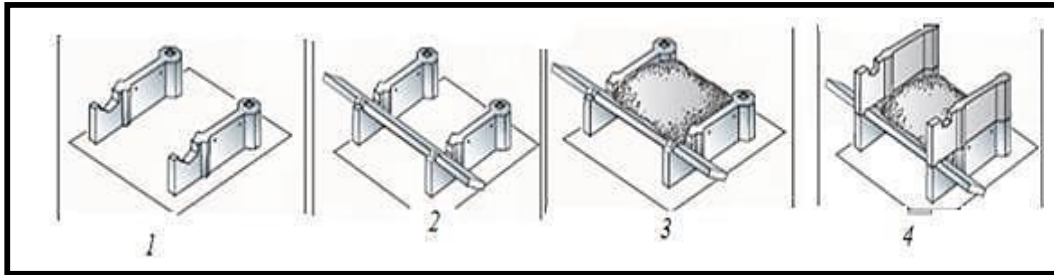


Fig.I.20 Mise en place de paroi caisson

I.4.3.5 Les parois préfabriquées

L'écran est constitué d'une succession d'éléments préfabriqués en béton armé, jointoyés et mise en place dans une tranchée forée sous coulis autodurcissant, les panneaux sont plus souvent suspendu jusque la prise de coulis, ce dernier dans la partie inférieure de la tranchée, peut assurer en outre une fonction de barrière hydraulique. [18]

Le forage est fait comme pour une paroi moulée, mais un peu plus large que la future paroi, avec remplissage de boue de bentonite. Les panneaux préfabriqués, en béton armé, sont descendus à la suite les uns des autres dans le forage et calés sur les parois de la pré-saignée. Ils sont centrés de manière à laisser une épaisseur de boue de chaque côté. Un coulis de sable et ciment est ensuite injecté par le bas, qui prend la place de la boue sur les deux faces des panneaux. Il existe des mélanges autodurcissants qui font office à la fois de boue de forage et de coulis, ce qui simplifie les opérations. Les extrémités des panneaux préfabriqués sont façonnées en forme de joints, de manière à assurer la liaison de panneau à panneau, le coulis de ciment assurant le scellement. Au moment du terrassement le coulis durci est enlevé sur la face de la paroi qui devient apparente.

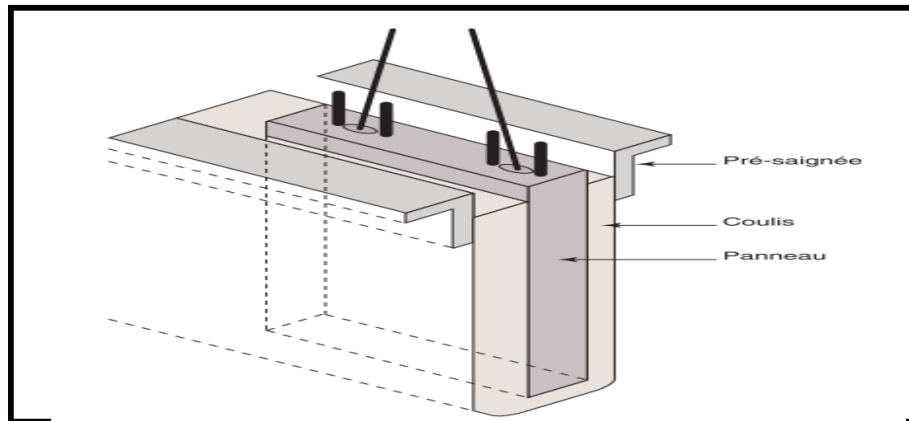


Fig.I.21 Principe de construction d'une paroi moulée préfabriquée

Les dimensions des panneaux préfabriqués sont conditionnées par leur poids qui ne doit pas être prohibitif vis-à-vis de la manutention et de l'appui sur les murettes de la pré-saignée.

La longueur est en général comprise entre 2 m et 4 m. Les épaisseurs sont un peu inférieures à celles des parois moulées, la préfabrication autorisant des contraintes du béton plus élevées. Des passages sont réservés dans les panneaux pour les tirants d'ancrage qui seront mis en place au cours du terrassement. [17]

I.5 Conclusion

Dans cette étude du projet, la réalisation de la paroi moulée a été choisie comme un mur de soutènement efficace pour protéger les ouvrages du métro, car elle est située en zone urbaine (Alger) ainsi qu'en raison de la profondeur de l'excavation à atteindre, qui est d'environ 35 m, ceci pour éviter le risque de faire glisser le sol adjacent au projet et ainsi éviter l'effondrement des bâtiments voisins.

CHAPITRE II



PRÉSENTATION DU PROJET

II.1 Introduction

Dans ce deuxième chapitre, nous aborderons la localisation du projet de station de métro Houari Boumediene, qui vise à étendre le réseau de transport afin de faciliter et assurer la circulation confortable et sûre des citoyens au sein du tissu urbain, ainsi que d'aborder les éléments structurants de la station et la méthode d'excavation utilisée dans la mise en œuvre.

II.2 Présentation de la wilaya d'Alger

La wilaya d'Alger située au bord de la mer Méditerranée, délimité par les wilayas de Tipaza, Blida et Boumerdes à des agglomérations de 2,8M d'habitants, Superficie de 810 km², elle contient également de 57 communes et 13 circonscriptions administratives.



Fig.II.1 la wilaya d'Alger

Le choix d'Alger comme zone d'étude n'est pas fortuit, puisqu'un important programme de modernisation du réseau ferré urbain a été engagé par les autorités publiques. En plus, sur le même corridor de transport de masse, évoluent simultanément les modes ferroviaires et routiers.

II.3 Le réseau de métro d'Alger

Le réseau de transport par métro est composé du tronçon ayant comme point de départ la station de Tafourah (Grande poste) vers la station Haï-El-Badr, s'étalant sur une longueur de 9,5 km comportant dix stations. Ce premier tronçon a été mis en exploitation le 1^{er} novembre 2011. L'extension de la ligne 1 depuis Haï-El-Badr vers El-Harrach-Centre, d'une longueur de 4 km, avec quatre stations a été mise en service le 5 juillet 2015



Fig.II.2 Plan du métro d'Alger

La ligne 1 du métro d'Alger est équipée de 14 rames d'une longueur de 108mètres et chaque rame peut transporter jusqu'à 1290 personnes, dont 210 places assises. Le métro permet le déplacement de 40 000 voyageurs / heure/ sens. En 2015, la fréquentation du métro était de 21,5 millions de voyageurs (en augmentation de 73% par rapport à 2012). Cette augmentation est due principalement à l'ouverture de l'extension vers El Harrach-Centre. [19]

Deux nouvelles extensions ont été mises en service, le 4 juillet 2015 une section de 4 km vers El Harrach-Centre et le 9 avril 2018 deux sections, une de 1,7 km vers la Place des Martyrs et une autre de 3,6 km vers Ain Naâdja



.Fig.II.3 L'extension D'el Harrach Vers L'Aéroport

Deux autres extensions d'une longueur totale de 15 km sont en cours de construction en direction de l'Aéroport et de Baraki .D'autres extensions du métro d'Alger sont en cours, elles concernent : prolongements de la ligne 1 depuis la station Tafourah vers la Place des Martyrs et de Hai-El-Badr vers Ain-Naâdja[11]

Dans notre thème on va étudier l'analyse statique de la paroi moulée comme un mur de soutènement pour nous permettre l'excavation de terre pour réaliser la station de métro Houari Boumediene qui se trouve dans l'extension qui est en cours de construction en direction de l'Aéroport et de Baraki.

II.4 Localisation de la station

La Station Université Houari Boumediene sera située sur le côté Sud-Est d'une section de la Route de Bab Ezzouar et au Nord-Ouest du parking de l'université sur 129.80m du pk 4km740.10 au pk 4km869.90.

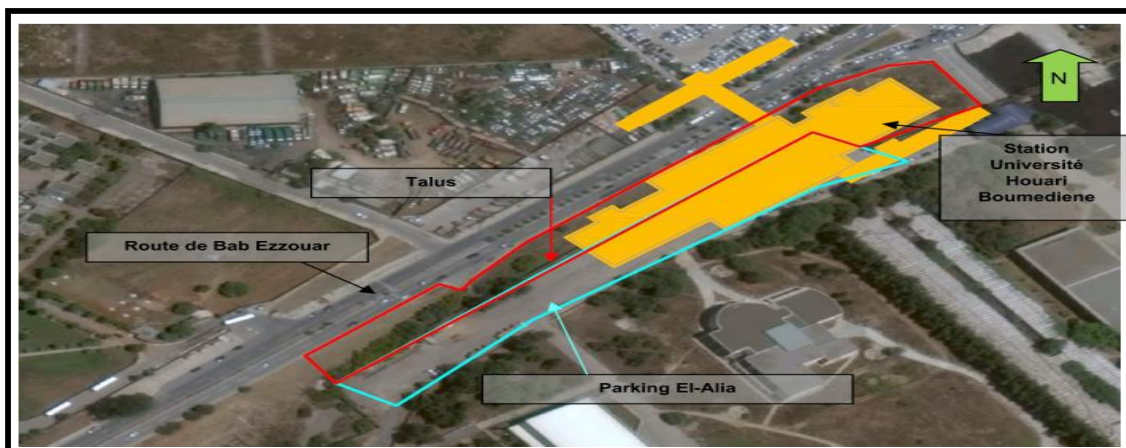


Fig.II.4 Implantation de la station

II.5 Description de la station

La zone d'implantation de la station et des respectifs accès (Nord et Sud) correspond à une surface d'environ 4856 m². Une des contraintes importantes est le fait que dans le terrain naturel il y a une différence de cotes entre la route de Bab Ezzouar et le parking de l'université d'environ 4 m, matérialisé par un talus. En plan, l'excavation associée à l'exécution de la station aura d'environ 130,00 m de longueur et deux largeurs courants, 22,60 m aux extrêmes et 36,52 m dans la zone central. La profondeur moyenne d'excavation sera de 25,00 m à partir de la cote d'haut du talus. Nous signalons que dans l'extrémité ouest de la station est prévu un puits collecteur d'eau sous la dalle de fond, lequel implique que le niveau d'excavation soit d'environ 4,50 m plus profonde.

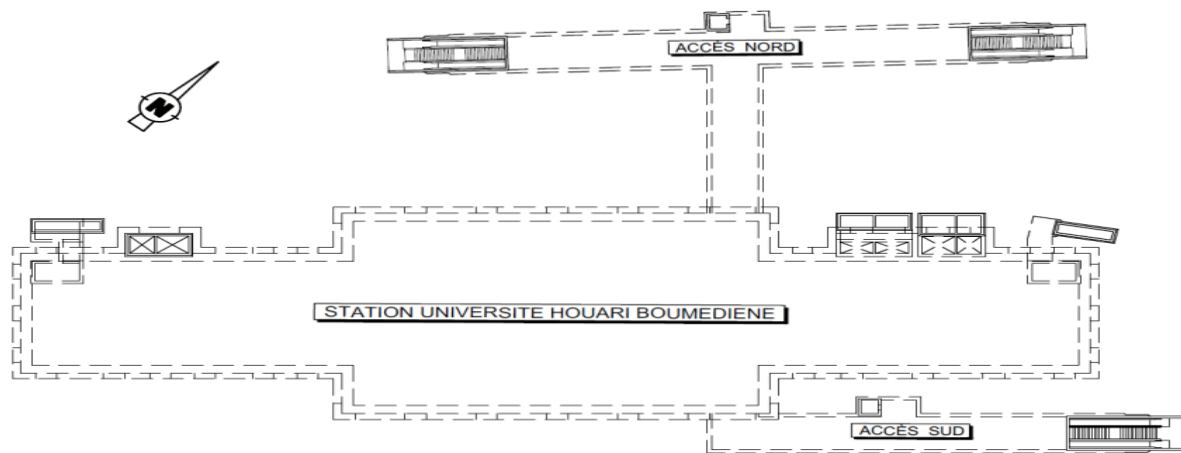


Fig.II.5 Schéma général des différents corps de la Station Université Houari Boumediene

Les accès Nord et Sud auront une extension de, respectivement, 90 m et 55 m. La profondeur maximale des excavations associées à l'exécution des accès sera d'environ de 14,50 m pour l'accès Nord et 10,5 m pour le Sud, en considérant les différents niveaux du terrain naturel. L'intersection entre les excavations des accès et l'excavation de la station aura lieu à la cote de la dalle intermédiaire (R-1).

II.6 Présentation de la structure

Dans le cas de la station université Houari Boumediene, nous avons utilisé de paroi moulée pour le corps principal et paroi de pieux pour l'accès sud et utiliser les butons dans les blindages de fouille et les soutènements provisoires.

II.6.1 Paroi moulée

Dans le présent projet, il a été considéré deux panneaux avec 2,40 de longueur et 1,00 de largeur de panneau primaire et 2,80 m de longueur et 1,00 m de largeur de panneau secondaire. La profondeur prévue pour les parois varie entre 28,40 et 30.20 m dans le cas courant, à partir de la cote de haut du talus.

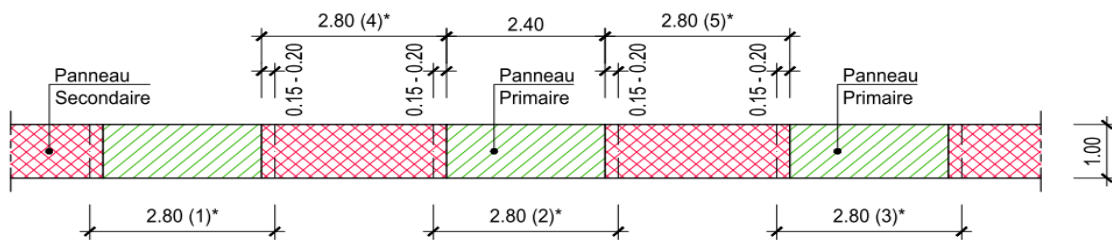


Fig.II.6 Mode d'exécution des panneaux considérés pour la Station Université Houari Boumediene

La continuité entre panneaux primaires et secondaires sera assurée par l'invasion, au fur et à mesure de l'excavation des panneaux secondaires, des tronçons d'extrémité des panneaux primaires qui seront déjà bétonnés. L'épaisseur de béton à démolir des panneaux primaires sera entre 15 cm et 20 cm pour des situations courantes, en accord avec le schéma présenté dans la Figure.II.6

Pour assurer le correct alignement des panneaux et garantir la stabilité de la couche supérieure du terrain à excaver, la construction des murette-guides est considérée indispensable.

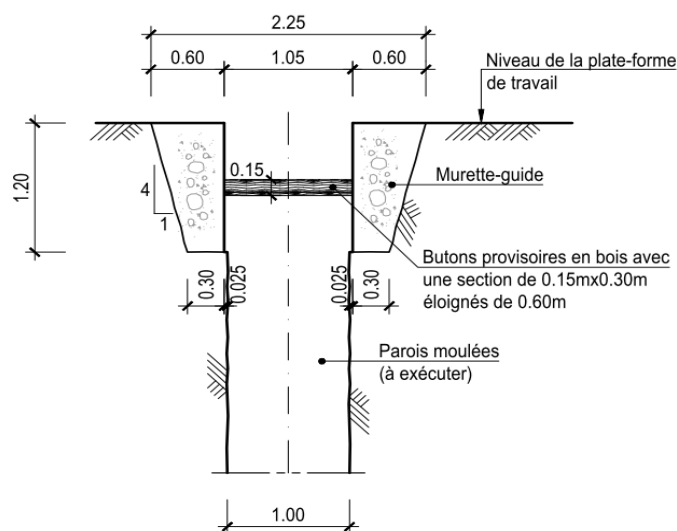


Fig.II.7 Murette-guide utilisé dans la station

Cette structure est constituée par deux murettes parallèles en béton armé, partiellement bétonnés contre le terrain, et la distance entre eux correspond à l'épaisseur de la paroi (1,0 m) additionné de 5 cm. La distance finale correspond à l'espace libre nécessaire au passage de l'équipement d'excavation.

Nous soulignons encore que l'implantation de ces murettes et de l'axe des parois doit prendre en considération une tolérance de déviation verticale des parois de 0,5% de la hauteur à creuser. Ainsi, dans le cas de cette station, nous avons prévu une tolérance de 13 cm.

II.6.2 Paroi de pieux

Le soutènement formé par des pieux primaires et secondaires intersectés est appelé paroi de pieux sécants figure .II.8. Les pieux primaires peuvent être exécutés moins profondément que les pieux secondaires (rideau de pieux en touches de piano).

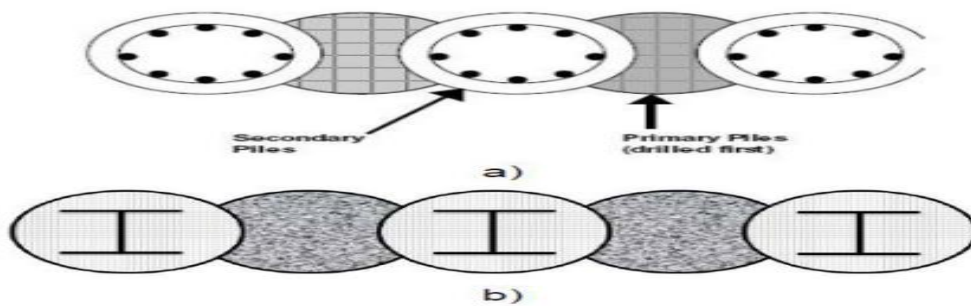


Fig.II.8.1 Vue en plan. a- une armure conventionnelle. b- le profil en acier. Lindquist et Jameson (2011).

✓ **Dimensions :**

Les pieux constituant des parois de l'accès ont le diamètre caractéristique de 0.80 m a des pieux à tarière continue et 0.60 m a des pieux forés(colonnes en jet-grouting)

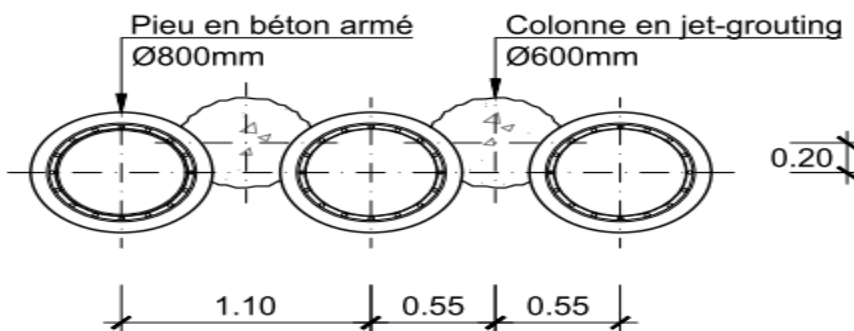


Fig.II.8.2 Mode d'exécution du rideau de pieux avec des colonnes en jet-grouting

II.6.3 Les butons

C'est un ouvrage métallique qui encaisse les efforts appliqués à une paroi et les transmette à l'intérieur de l'aire du projet à un élément de réaction. Les butons sont utilisés généralement dans les blindages de fouille et les soutènements provisoires

Le renforcement de l'écran de soutènement à la face intérieure par des butons qui s'appelle la technique : de BUTONNAGE.

Après la mise en place des cornières scellées dans notre paroi, on place les butons avec une grue de levage dans notre cas, ensuite les butons sont scellés avec un mortier spécial.

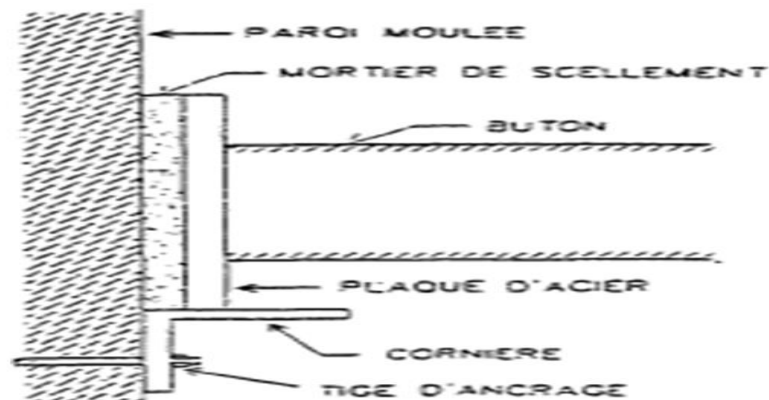


Fig.II.9 Exemple de butonnage d'une paroi moulée

On distingue deux types de butonnage, qui sont

II.6.3.1 Le butonnage direct : Le buton prend appui directement sur la paroi ou par l'intermédiaire d'une plaque de raidissement.



Fig.II.10 Butonnage direct

II.6.3.2 Le butonnage sur lierne : Le buton 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.



Fig.II.11 Butonnage sur lierne

II.7 Méthode d'exécution de station "TOP- DOWN"

Afin d'assurer une bonne organisation de projet pour atteindre une bonne cadence d'avancement des travaux, il était indispensable de revoir certaines méthodes d'exécution, notamment celles liées à la structure des stations.

Ainsi, la réflexion s'est orientée vers le changement de la méthode d'exécution du génie civil des stations par la méthode dit TOP-DOWN.

La méthode TOP-DOWN dite également appelée planification descendante, est une approche qui vise à passer progressivement du niveau supérieur au niveau inférieur d'une hiérarchie particulière. Dans le cadre d'une planification Top-down, des objectifs globaux sont d'abord définis et les moyens pour les atteindre sont déterminés. Puis, ces objectifs descendent progressivement dans les différentes branches de la hiérarchie pour être développés et précisés. Il s'agit d'une approche divergente.

La direction de l'organisation fournit un cadre de travail avec des objectifs ; il s'agit par exemple de se baser sur le développement du marché et d'indiquer des objectifs de croissance. Ces objectifs sont ensuite décomposés dans des plans d'action subalternes et décrits plus en détail au niveau inférieur de la hiérarchie. Ces plans d'action subalternes servent alors à leur tour à définir des plans d'action et des objectifs pour les couches suivantes dans la hiérarchie

Contrairement à la méthode à ciel ouvert, la méthode TOP-DOWN consiste à entamer les travaux de la structure depuis la surface pour ensuite passer en sous œuvre (dalle et parois) jusqu'au radier.

Certaines stations du système de transport rapide souterrain (Metro) ont été créés par la méthode "top down" comme le cas de notre projet.

Dans cette méthode, les murs de soutènement de l'ouvrage souterrain construit par exécution de paroi moulée ou d'écran de soutènement dans le sol jusqu'à la profondeur comme requis premièrement, excavations successives soutenues par des boutons et pose des parois de revêtement sur les côtés, Il peut descendre jusqu'au niveau de la dalle de base de l'ouvrage souterrain. Lorsque la dalle de base est terminée, les parois latérales sont construites, les butons intermédiaires seront progressivement supprimés. Trappes d'accès au toit Ensuite, la planche est fermée, puis le sol est remblayé.

- **Pourquoi la méthode TOP-DOWN**

Le choix de la méthode TOP-DOWN intervient après avoir constaté que le passage de la machine dite TBM (tunnelier) dans les stations qui, initialement prévu de réaliser par la méthode à ciel ouvert, provoquera fatalement des prolongements de délais de réalisation des gros œuvres de celles-ci.

Effectivement, avec la méthode de ciel ouvert, la réalisation de la structure ne pourrait être entamée qu'une fois les terrassements sont achevés avec la mise en place, soit des tirants d'ancrage, soit des butons, pour soutenir les parois des fondations spéciales, mais surtout, qu'après le passage du tunnelier.

Par ailleurs, l'interruption des travaux après terrassements et le temps de répit pour le passage du tunnelier dans chaque station, pour démarrer les travaux de génie civil, pourrait être considérable, et cela, en dépit des délais contractuels et de la stabilité des soutènements mise en place, à savoir les tirants d'ancrage temporaires qui peuvent relâcher car leur efficacité est limitée dans le temps.

II.8 Conclusion

Afin d'étudier la stabilité du mur de soutènement (paroi moulée) utilisé dans la station lors du creusement, de nouvelles techniques doivent être utilisées et l'utilisation de l'outil informatique pour la simulation et connaître leur comportement. C'est pourquoi, dans notre étude nous avons utilisé le programme Plaxis2D, que nous allons discuter en détail dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III



PRÉSENTATION DE L'OUTIL DE SIMULATION

III.1 Introduction

Le développement technologique qui a aidé dans de nombreux domaines a également aidé dans le domaine du génie civil et des travaux publics, Et ce développement a conduit l'ingénieur vers des projets plus complexes et plus coûteux par simulation avec de logiciel avant l'exécution en réalité pour voir comment ils agissent sous la pression de facteurs externes entourant le projet.

La plupart de ces logiciels utilisent la méthode des éléments finis, qui est plus efficace que les autres méthodes d'approche du résultat.

La MEF consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre finis d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements réels de la structure en tant qu'objet continu. La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées. Elle nécessite un grand nombre de calculs qui, cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique.[21]

Dans ce mémoire et dans ce chapitre, nous parlerons d'un logiciel PLAXIS 2D que nous utiliserons pour simuler et extraire les résultats et la loi de comportement.

III.2 Présentation du logiciel PLAXIS 2D

Le logiciel PLAXIS est le logiciel d'éléments finis en deux dimensions dont le développement commença en 1987 à l'initiative du ministère des travaux publics et d'hydrologie des Pays-Bas. Son but initial était de créer un code éléments finis facilement utilisable en 2D pour analyser l'effet de l'implantation d'une digue fluviale sur les argiles molles des Pays-Bas. Le logiciel PLAXIS spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. En quelques années, PLAXIS a été étendu à plein d'autre domaine de la géotechnique. En 1998, a été produit la première version de PLAXIS pour Windows. Après quelques années développée a plusieurs version par exemple

le logiciel 3D PLAXIS Tunnel en 2001, PlaxFlow en 2003, Version 8.4 et Pla flow v1.4 en 2007 [22]

Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier.

La démarche suivie dans le développement de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un code éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délai raisonnable en utilisant un modèle de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale. Différents modèles de comportement, plus ou moins sophistiqués, ont été implémentés dans Plaxis : élastique linéaire, Mohr-Coulomb, modèles de sol avec écrouissage ou spécifiques aux sols mous.

III.2.1 Les sous-programmes de Plaxis2D

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves).

III.2.1.1 Le programme d'entrée des données (input)



Cette icône représente le 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.

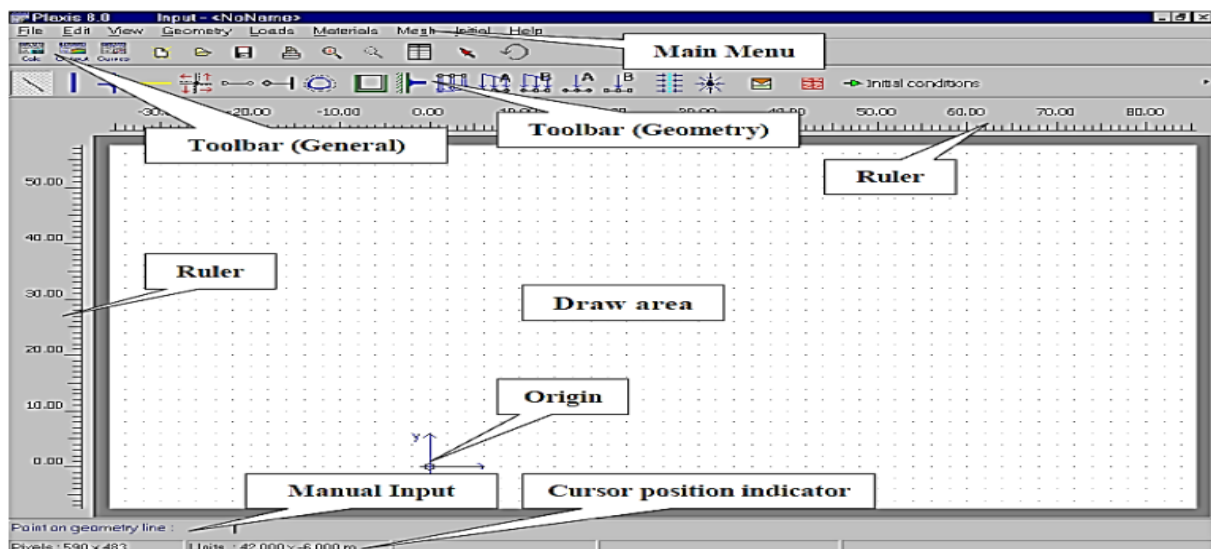


Fig.III.1 Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input).

- ✓ **Le menu d'entrée des données (Main menu) :** Le menu Input contient tous les éléments sur les données et les opérations du programme Input.
- ✓ **La barre d'outils générale (Tool bar général):** La barre d'outils contient les icônes relatives aux actions générales comme les opérations sur le disque, l'impression, les zooms ou le choix d'objets.
- ✓ **La barre d'outils de géométrie (Tool bar géométrie):** Cette barre d'outils contient les icônes pour les actions relatives à la création du modèle géométrique. Ces icônes sont placées dans un ordre tel qu'il permet en général de définir entièrement le modèle en suivant les boutons de la barre d'outils de la gauche vers la droite.
- ✓ **Les règles (Rulers) :** Sur la gauche et la partie supérieure de la planche à dessin, des règles indiquent les coordonnées physiques x et y du modèle géométrique. Ceci permet d'avoir un aperçu immédiat des dimensions.
- **Le menu d'entrée des données (input)**

Le menu principal du programme d'entrée des données contient des menus déroulant relatifs à la plupart des options pour manipuler des fichiers, transférer des données, afficher des graphiques, créer un modèle géométrique, générer des maillages d'éléments finis et entrer des données en général. Une distinction peut être faite entre le menu du mode de création de la géométrie et le menu des conditions initiales. Le premier est composé des menus File, Edit, View, Geometry, Loads, Materials, Mesh, Initial et Help. [21]

Le second est quant à lui composé des menus File, Edit, View, Geometry, Generate et Help.

- ✓ **Le menu File :** Permet de créer un nouveau projet, d'ouvrir un projet existant, de sauver le projet en cours sous le nom existant, d'imprimer le modèle géométrique sur une imprimante choisie et permet de quitter le programme Input....
- ✓ **Le menu Edit :** Permet de restaurer l'état précédent du modèle géométrique et Permet de copier le modèle géométrique dans le presse-papiers de Windows.
- ✓ **Le menu View :** Permet de zoomer sur une zone rectangulaire (Le programme agrandira la surface sélectionnée), de restaurer la vue précédant l'agrandissement le plus récent, de voir le tableau des coordonnées x et y de tous les points de la géométrie et Permet de montrer ou cacher les flèches indiquant les axes x et y.
- ✓ **Le menu Geometry :** Le menu Geometry contient les options de base permettant de fabriquer un modèle géométrique.

- ✓ **Le menu Loads :** Le menu Loads contient les options qui permettent d'ajouter des charges et des conditions aux limites au modèle géométrique.
- ✓ **Le menu Materials :** Le menu Materials est utilisé pour activer la base de données de création et de modification des propriétés des matériaux pour les sols et les interfaces, les plaques, les géo grilles et les ancrages.
- ✓ **Le menu Mesh:** Le menu Mesh contient les options permettant de définir le type d'éléments (6 ou 15 nœuds), générer un maillage d'éléments finis ou appliquer un raffinement local ou global du maillage.
- ✓ **Le menu Initial:** Le menu Initial permet d'accéder au menu des conditions initiales du programme Input.



III.2.1.2 Le programme de calcul (Calculations)

Ce programme 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.

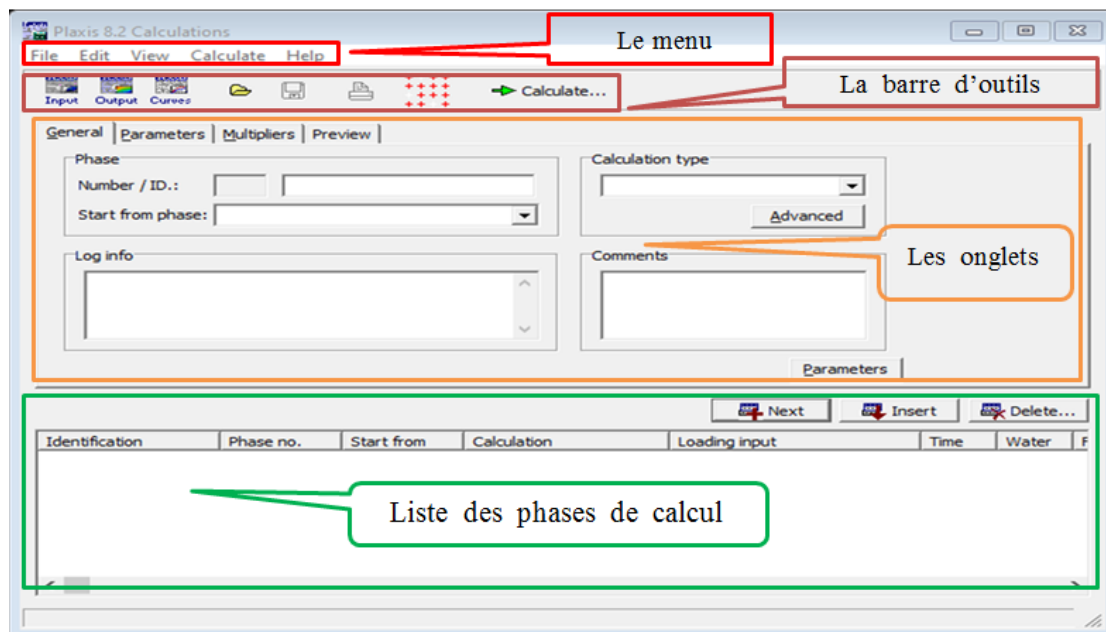


Figure III.2 Fenêtre principale du programme de calcul

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

- ✓ **La barre d'outils:** La barre d'outils contient les icônes qui peuvent être utilisées comme raccourci pour les options du menu.
- ✓ **Les onglets (partie supérieure de la fenêtre):** Les onglets permettent de définir et pré visualiser une phase de calcul.
- ✓ **Liste des phases de calcul (partie inférieure de la fenêtre):** Cette liste donne une vue d'ensemble de toutes les phases de calcul d'un projet. Chaque ligne correspond à une phase particulière.



III.2.1.3 Le programme de résultats (output) :

Ce programme contient tous les éléments qui permettent de voir les résultats des données générées et des calculs d'éléments finis. Au début du programme de résultats, l'utilisateur doit choisir le modèle et la phase de calcul appropriée ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés.

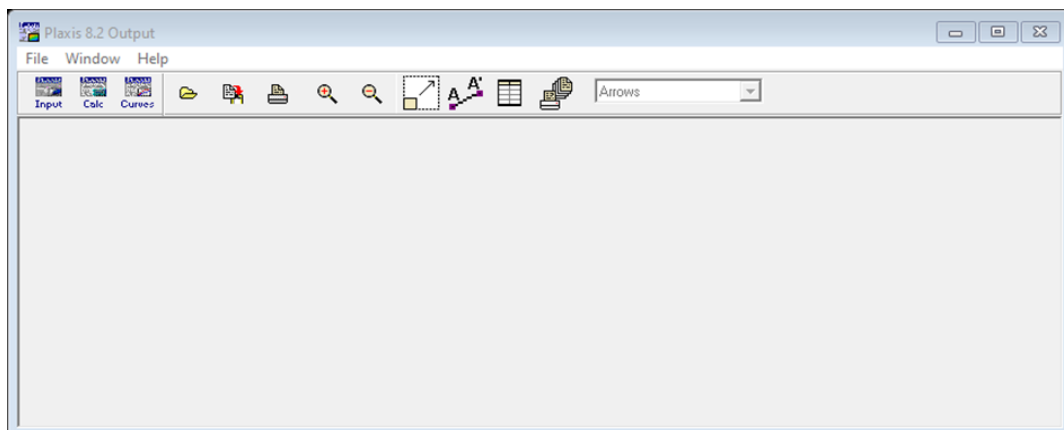


Figure III.3 Fenêtre principale du programme de résultats (output)

La fenêtre principale du programme de résultats(OUTPUT) contient les éléments suivants :

- ✓ **Menu des résultats:** Le menu des résultats contient toutes les opérations et toutes les fonctionnalités du programme de résultats.
- ✓ **Fenêtres de résultats:** Ce sont des fenêtres dans lesquelles des résultats particuliers sont affichés. Les fenêtres de résultats peuvent contenir des représentations du modèle, des représentations spéciales d'éléments du modèle ou des tableaux de résultats.

- ✓ **Barre d'outils** : La barre d'outils contient des boutons qui peuvent servir de raccourcis aux éléments du menu. De plus, une case permet de sélectionner directement le type de représentation pour le résultat à afficher.
- ✓ **Barre d'état** : La barre d'état contient des informations sur le type d'analyse (déformation plane ou axisymétrique) et la position du curseur de la souris dans le modèle.

III.2.1.4 Le programme de courbes (Curves) :



Ce programme contient toutes les options nécessaires pour générer des courbes charge déplacement, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations. Après la sélection d'un projet existant, le graphique correspondant apparaît dans la fenêtre principale.

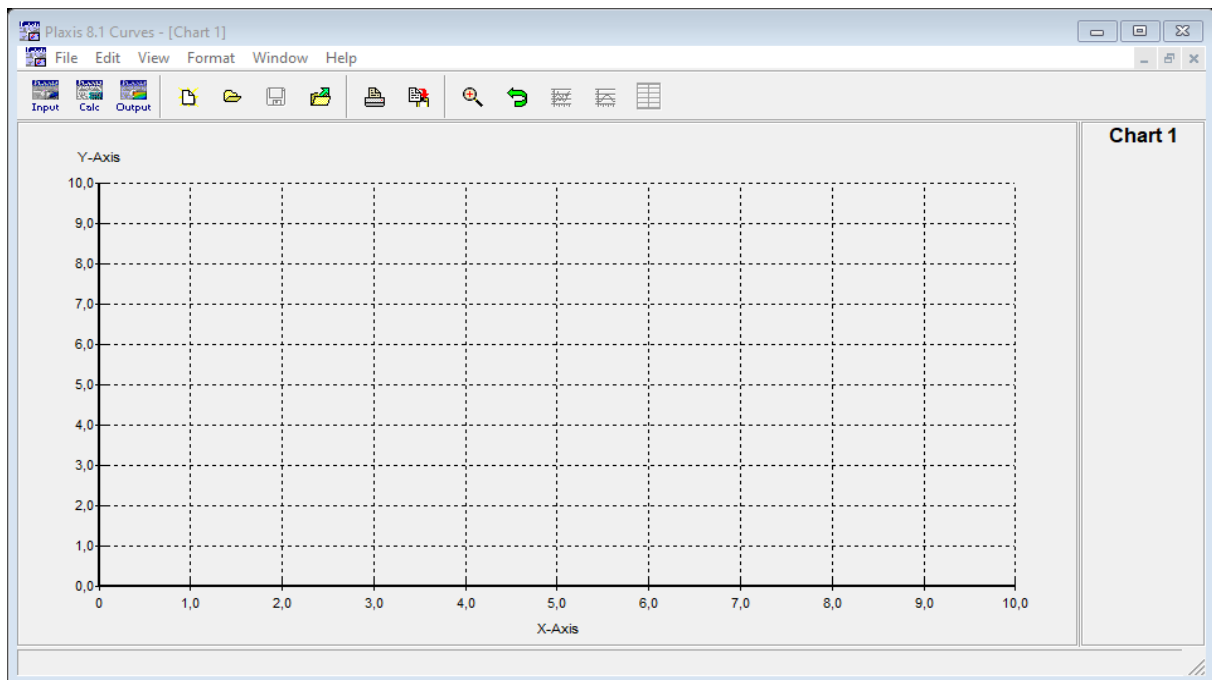


Fig.III.4 La fenêtre principale du programme Curves.

La réalisation d'une modélisation avec Plaxis se traduit en général, par l'enchaînement des étapes suivantes :

- ❖ Utilisation du préprocesseur « Plaxis Input », pour la génération des données (maillage, jeu des données et contraintes initiales).
- ❖ Lancement du code de calcul éléments finis « PLAXIS Calculate », pour effectuer la résolution numérique du problème étudié.

- ❖ Utilisation de post-processeur « Plaxis Output », pour l'interprétation des résultats sur écran graphique.
- ❖ Utilisation de post-processeur « PLAXIS Curve », pour l'interprétation des courbes (courbe de consolidation, chemin des contraintes,...etc.).

La fenêtre principale du programme Curves contient les éléments suivants :

- ❖ **Le menu des courbes** : Le menu des courbes contient toutes les options et les outils du programme Curves. Certaines options sont aussi accessibles par des boutons placés dans la barre d'outils.
- ❖ **Les fenêtres des graphiques** : Ce sont les fenêtres dans lesquelles les graphiques sont affichés. Plusieurs fenêtres de graphiques peuvent être ouvertes simultanément et chaque graphique peut contenir jusqu'à un maximum de dix courbes.
- ❖ **La barre d'outils** : Cette barre contient des boutons qui peuvent être utilisés comme raccourci des options du menu.

III.3 Les étapes nécessaires de la modélisation avec Plaxis2D

Nous présenterons ici le cheminement et principales étapes d'un calcul et modélisation sous PLAXIS.

III.3.1 Géométrie : La première étape sous Plaxis est la définition de la géométrie. Entrez toutes les couches du sol et la construction

- Les lignes géométriques qui sont là pour dessiner l'organisation du sol. L'outil << plates >> permet de dessiner et de définir des structures élancées qui possèdent une résistance en traction compression et une résistance en flexion. Cet outil est principalement utilisé pour modéliser des murs, des poutres, décoquilles, des plaques. Pour modéliser les murs et les zones rigides. (Principalement les éléments ayant une forte extension selon l'axe perpendiculaire au plan de modélisation (ici z).
- L'outil << Anchor >> qui sert à modéliser les liaisons entre les éléments. Ce sont des ressorts, qu'on utilise pour modéliser les batardeaux ou plus exactement la liaison entre les différents éléments d'un batardeau.
- L'outil <<géogrid>> sert à dessiner des structures élancées avec une résistance en compression ou traction mais qui ne possèdent aucune résistance de flexion. Cet outil est généralement utilisé pour modéliser les géogrilles et ancrages. Sur Plaxis, il y a

également un outil tunnel qui permet de modéliser un tunnel prenant en compte les facteurs qui concernent ce type d'ouvrage.

III.3.2 Conditions aux limites : Une fois la géométrie définie, il faut entrer les conditions limites, c'est-à-dire les déplacements et les contraintes imposées aux limites extérieures de la géométrie. Si aucune condition limite n'est fixé sur un tronçon, par défaut le logiciel considère que l'élément n'est soumis à aucune force extérieure et est libre de se déplacer dans toutes les directions.

III.3.3 Définition des paramètres des matériaux : Après l'étape précédente vient l'étape de saisie des informations et des différentes caractéristiques et paramètres de tous les matériaux constitutifs du sol aux éléments structurels.

III.3.4 Maillage : Le maillage est la première étape de la méthode des éléments Un « bon » maillage est donc un maillage qui permet d'avoir des résultats proches de la réalité et permet au calcul de tourner avec les moyens disponibles (capacités du système informatique), et en un temps compatible avec la durée du projet.

Le maillage est gènère automatiquement, ce qui est un point fort de Plaxis. L'operateur peut paramétrer la finesse du maillage entre différentes options (très grossier, grossier, moyen, fin, très fin)

III.3.5 Les conditions initiales : La définition des conditions initiales se fait en deux étapes distinctes tout d'abord, lorsque la fenêtre des conditions initiales s'ouvre, seul le sol est activé, l'opérateur active les éléments constructifs (déplacements et/ou contraintes impose(e)s, ancrage, plaque) qui correspondent à l' instant initial. Il désactive les éléments de sol qui ne correspondent pas à cet instant initial.

Un << Switch bouton >> permet d'accéder a deux fenêtres différentes chacune représentant la géométrie de la modélisation :

- ❖ La première qui s'appelle "initiale pore pressure" permet de définir un niveau de nappe phréatique initial (si besoin), et de générer les pressions interstitielles correspondantes.
- ❖ La deuxième fenêtre permet de générer les contraintes initiales à l'intérieur du massif (poids propre et sous pression).

III.3.6 Phase de calcul : Après avoir effectué toutes ces étapes, les comptes sont accessibles avec bouton poussoir "Calculations ".dans Plaxis input, La première fenêtre se ferme et laisse de la place pour une nouvelle interface : "Calculations ".

À cette étape, toutes les phases de travail sont saisies la phase 0 est déjà calculée, Cette phase correspond à l'état initial de la structure. De nouvelles phases de calcul peuvent être créées basées sur une phase existante. Pour chaque phase on peut modifier la géométrie par l'intermédiaire de la même interface qui a servi à définir les conditions initiales. On peut donc effectuer des changements uniquement en activant ou désactivant des éléments. Le niveau de la nappe phréatique peut être modifié, ainsi que certaines propriétés des matériaux et de sol. Vous pouvez également voir les résultats et les courbes à cet étape, par exemple la courbe de moment, après avoir appuyé sur le bouton Calculer, et cela peut prendre un certain temps en fonction des caractéristiques de l'ordinateur. Pour afficher ce résultat, nous cliquons sur output.

III.3.7 Visualisation des Résultats : À cette étape, le programme vous fournit de nombreux outils pour visualiser et analyser les résultats en relation avec la terre et la construction.

III.4 Les lois de comportements utilisés dans Plaxis2D

De manière très générale, une loi de comportement traduit le comportement et les déformations d'un petit élément de volume macroscopique de matériau soumis à l'action de forces extérieures, les variables mises en jeu dans ce domaine est le tenseur des contraintes et tenseur des déformations. La connaissance de cette loi est indispensable pour rendre complet le système des équations de la mécanique des milieux continus ou du calcul des structures.

La modélisation du sol a pour objectif de déterminer un modèle de comportement qui permet d'étudier l'évolution de ses caractéristiques physiques et mécaniques. Il faudra que celui-ci puisse représenter le plus possible tous les aspects essentiels du comportement mis en évidence par les essais de laboratoire et in situ. Le modèle est ainsi une description complète du comportement du sol. La plupart des matériaux ont un comportement élastoplastique, qui est caractérisé par l'apparition de déformations réversibles élastiques et de déformations irréversibles plastiques. Sur la surface de charge, deux cas de comportement sont possibles : la surface de charge n'évolue pas, on parle de loi élastique parfaitement plastique, c'est le cas du modèle de Mohr-Coulomb ; la surface de charge évolue au cours du chargement, on parle de modèle élastoplastique avec écrouissage dont le modèle Hardening Soli de Plaxis fait partie.

III.4.1 Modèle de Mohr-Coulomb

Le modèle de Mohr-Coulomb est un modèle souvent utilisé pour représenter la rupture par cisaillement dans les sols et les roches tendres. Cette loi se caractérise par une élasticité linéaire isotrope de Hooke, une surface de charge et un potentiel plastique.

Les règles d'écoulement sont non associées, à l'intérieur de la surface de rupture le comportement du matériau est supposé élastique linéaire isotrope ou anisotrope, sur la surface de rupture, le comportement est considéré comme parfaitement plastique, dans l'espace des contraintes principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), la surface de rupture est une pyramide de section hexagonale d'équation : [23]

$$F(\sigma_{ij}) = |\sigma_1 - \sigma_3| - (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \varphi - 2 \times C \cos \varphi = 0 \quad (\text{III.1})$$

Où σ_1 et σ_3 représentent les contraintes extrêmes ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$). Cette pyramide est centrée autour de la trisectrice de l'espace des contraintes principales (1er invariant des contraintes) comme illustré figure suivante :

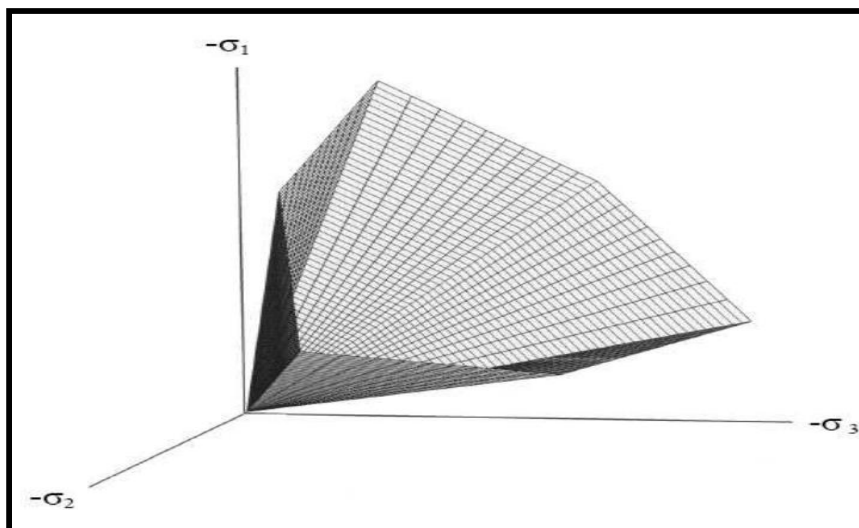


Fig.III.5 Surface de rupture du modèle de Mohr-Coulomb dans l'espace des contraintes principales pour un sol sans cohésion

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

- Le modèle de Mohr-Coulomb nécessite cinq paramètres fondamentaux :
 - Deux paramètres élastiques : le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν ;

- Deux paramètres relatifs aux conditions à la rupture : la cohésion c et l'angle de frottement ϕ
- Un paramètre relatif à la règle d'écoulement plastique, l'angle de dilatance ψ .

Ces paramètres sont facilement identifiables à partir d'essais de laboratoire, essais œdométriques ou triaxiaux, comme le montre la figure suivant :

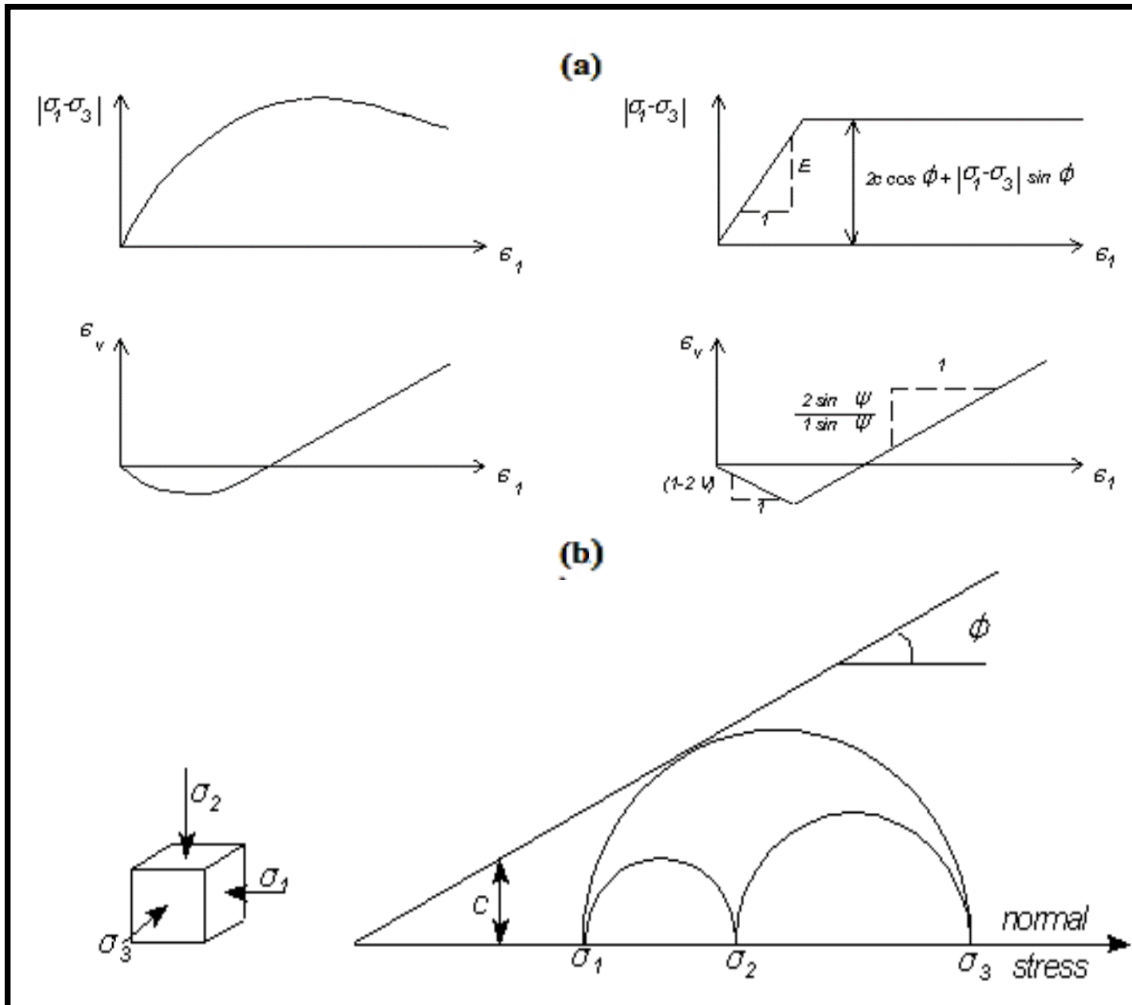


Fig.III.6 Modélisation d'un essai de compression triaxiale avec le modèle de Mohr-Coulomb présentation (a) et (b) présentation des contraintes dans le plan de Mohr

- Les paramètres élastiques

❖ **Le module d'Young E :**

Le module de Young ou module d'élasticité longitudinal est un rapport entre la contrainte détraction appliquée à un matériau, et la déformation qui en résulte (un allongement relatif) est constante, tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte. [24]

Dans le modèle élastique et le modèle de Mohr Coulomb, Plaxis utilise le module d'Young comme module de déformation de référence.

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique, Ce module nécessite des essais spéciaux. Il est conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un niveau de 50 % du déviateur de rupture.

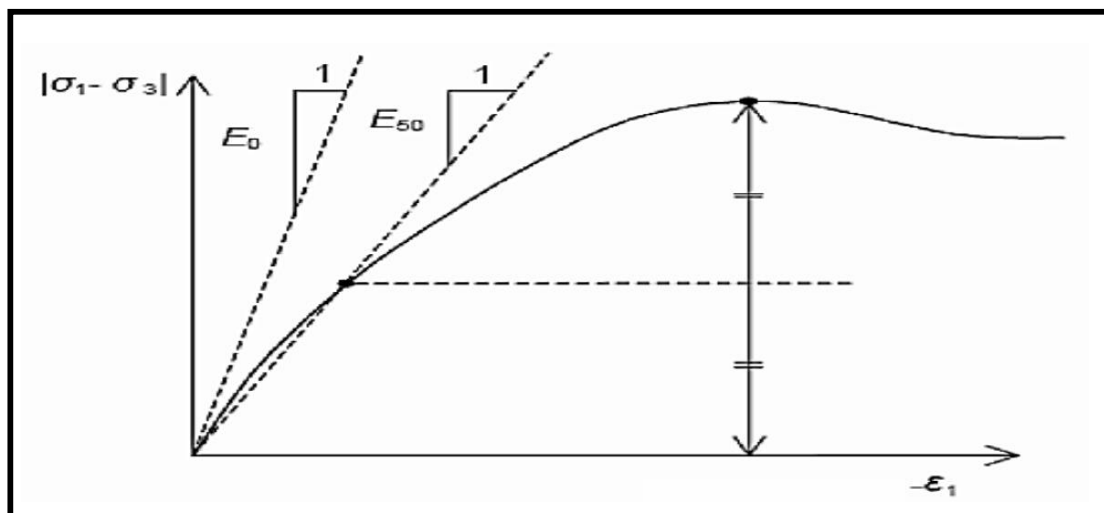


Fig.IV.7 Module d'Yong à 50 % de la rupture

❖ **Le coefficient de Poisson ν :**

Le coefficient de Poisson porte le nom du scientifique Siméon Poisson et est le rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale lorsqu'une contrainte dans les limites élastiques affecte l'échantillon. Habituellement, lorsque la matière est étirée dans une direction, elle a tendance à se contracter dans les deux autres directions, et inversement lorsque la matière est comprimée dans une direction, elle a tendance à se dilater dans les deux autres directions, et le coefficient de Poisson (ν) est la mesure de cette tendance à se dilater et à se contracter.

Le coefficient de Poisson pour toute substance stable ne peut être inférieur à -1,0 ou supérieur à 0,5, et la plupart des matériaux ont un coefficient de Poisson compris entre 0,0 et 0,5.

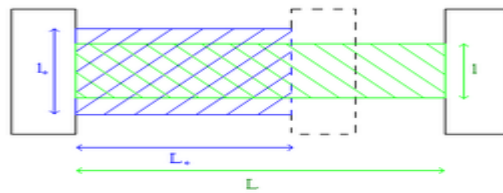


Fig.III.8 Illustration de coefficient de poisson

- les paramètres relatifs aux conditions à la rupture :

❖ **La cohésion c :**

La cohésion d'un sol est la propriété qui permet de s'opposer au glissement des grains qui le composent et de résister à un effort de cisaillement, c'est-à-dire de s'opposer au glissement d'une couche, ceci permettant de limiter l'exposition au danger d'éboulement

❖ **L'angle de frottement φ**

Caractéristique intrinsèque d'un sol, exprimée en degrés, correspondant à l'inclinaison de la droite de Coulomb. Déterminé à partir d'essais en laboratoire, il est utilisé dans les calculs géotechniques (dimensionnement de fondation, stabilité de pente, poussée des terres) [4]

L'angle de frottement interne a la même valeur que le sable soit sec, humide ou saturé. La raison en est que le frottement entre les grains n'est pas altéré ou modifié par la présence d'eau et que la perméabilité des sables est suffisamment grande pour qu'aucune surpression interstitielle ne puisse s'y développer (sauf cas particulier des séismes et des chargements très rapides). Pour les sables, Kérisel a donné la formule : $e \cdot \tan \varphi' = K$ avec $K = 0,55$.

Pour $0,45 < e < 1$ on obtient $29^\circ < \varphi' < 50^\circ$

- paramètre relatif à la règle d'écoulement plastique :

❖ **L'angle de dilatance**

L'angle de dilatance ψ est donné en degrés, il peut se calculer par la règle suivante :

$$\Psi = \varphi - 30^\circ \text{ si } \varphi > 30^\circ$$

La valeur ($\psi = 0^\circ$) correspond généralement aux argiles ou pour les sables de densité faible à moyenne. Pour les sables lâches l'angle de dilatance peut être inférieur à zéro. [25]

III.5 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'initier le lecteur et le chercheur à la méthode numérique. La méthode des éléments finis intégrée dans Plaxis 2D est utilisée en géotechnique, un véritable projet complexe avec une maquette numérique selon la nature du sol, le type de construction et les conditions initiales.

CHAPITRE IV



MODÉLISATION DE
L'OUVRAGE ET ANALYSE DES
RÉSULTATS

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons basé notre étude sur la modélisation par éléments finis réalisée à l'aide du logiciel Plaxis 2D 8.6, le modèle utilisé est celui de Mohr-Coulomb (III.4).

En géotechnique, l'objectif de la modélisation est souvent la recherche d'une réponse, d'une solution à un problème particulier et complexe. Les méthodes numériques ont pour but de décrire, d'expliquer ou de prédire le comportement d'une structure ou un sol naturel ou artificiel sur la base de lois physiques qui relient les variations des contraintes aux déformations et aux déplacements.

IV.2 Présentations de projet

Pour prendre en compte les propriétés asymétriques de la station et de la surface où celle-ci est déployée, l'entreprise de construction de la station Houari Boumediene a mis en œuvre trois sections de calcul en modélisation numérique. Ces sections de calcul sont montrées dans la figure.IV.1, nous basons sur la section de calcul de coté à droite de section 3-3.

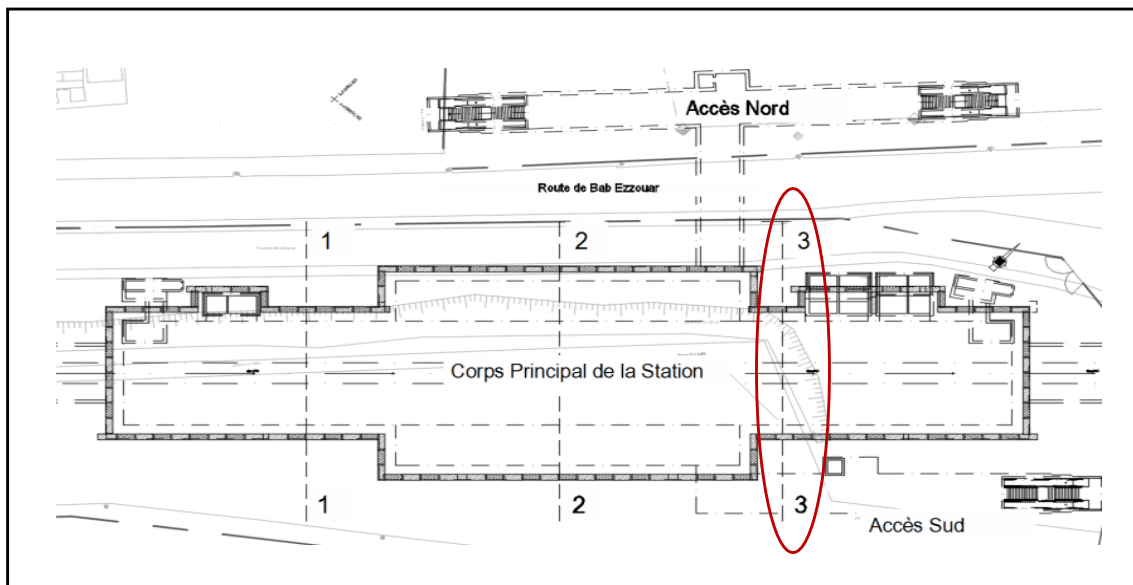


Fig.IV.1 Emplacement des sections de calcul

La section de calcul 3 inclut la modélisation de l'accès Sud, en conséquence de sa proximité au corps principal de la station.

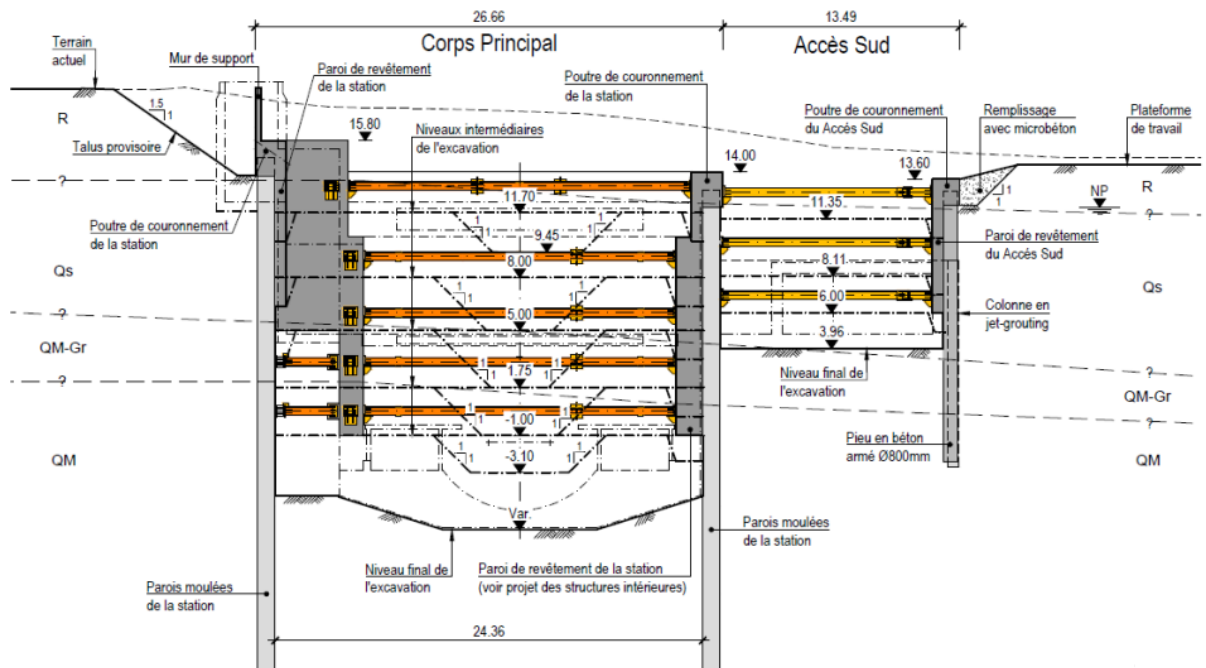


Fig.IV.2 Schéma avec les différents niveaux d'excavation préconisés pour le corps principal et l'accès Sud de la station université Houari Boumediene.

IV.3 Reconnaissance de site

Selon l'information disponible, les sols où la station Université Houari Boumediene sera creusé s'agissent des dépôts quaternaires avec facies lithologiques constitués par des sables limoneux-argileux (Qs) superposés aux formations du pliocène récent et quaternaire ancien constitués, à l'échelle de l'ouvrage, par une couche mince gréseuse (QM-Gr) sous laquelle on trouve les marnes et argiles marneuses dites d'El Harrach (QM).

Les données disponibles ont permis d'établir un zonage en profondeur des sols selon ces caractéristiques géotechniques et de déterminer les paramètres géo-mécaniques caractéristiques de chaque horizon. Le dispositif géologique-géotechnique est constitué, de haut en bas, par des sables limoneux-argileux marron-jaunâtre à rougeâtre, raides, jusqu'aux 10-13m de profondeur, une couche rocheuse constituée par des grés lumachéliques poreux, fracturés et friables, jusqu'aux 15-17m de profondeur, et par des marnes et argiles marneuses, jaunâtres à grisâtres, très raides à dures au-dessous. Ce zonage est résumé dans le tableau suivant :

Tableau .IV.1 - Résumé des profondeurs des facies existantes

Localisation (PK)	Profondeur totale (m)	Horizon géotechnique	Réponse drainée ou non-drainée	Profondeur (m)
4+805	0,0-42,0	Remblais(Re)	Non-drainée	0,0-3,5
		Sables limoneux-argileux (Qs)	Drainée	3,5-12,5
		Grés lumachéliques poreux (QM-Gr)	-	12,5-16,0
		Argiles marneuses (QM)	Non-drainée	>16,0

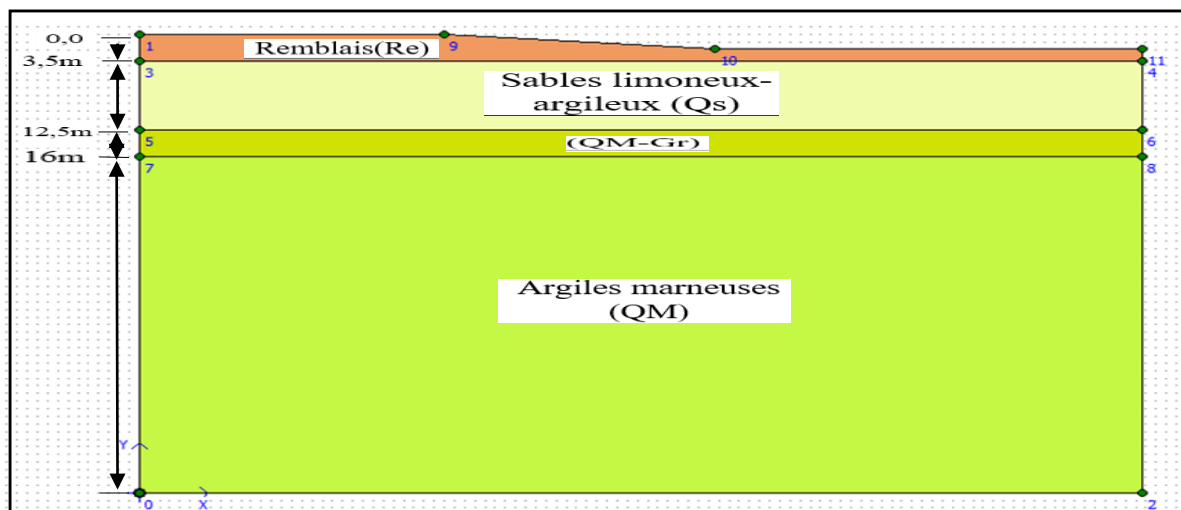


Fig.IV.3. Les différentes couches de sol introduites dans Plaxis .

IV.4 Les paramètres des matériaux utilisés

Les paramètres géotechniques et structuraux utilisés et considérés dans les calculs sont résumés dans les tableaux suivants :

IV.4.1 Paramètres géotechniques

Les paramètres géotechniques de calcul ont été répartis en deux groupes : le premier, pour les sols, tel que présenté dans le Tableau.IV.2 ; et le deuxième pour la roche, présenté dans le Tableau.IV.3 ;

Tableau. IV. 2 – Paramètres géotechniques de calcul - sols (valeurs de référence)

Horizon géotechnique	Remblais (Re)	Sables limoneux-argileux (Qs)	Argiles marneuses (QM)
Poids vol. γ (kN/m ³)	20,0	21,0	21,0
Cohésion non-drainée C_u (kPa)	30,0	-	$C_u = 2,9(z-15) + 149$
Module de déformabilité non-drainé E_u (MPa)	12,0	-	$E_u = 1,8(z - 15) + 89,5$
Angle de frottement effectif ϕ'	20°	30°	22°
Cohésion effective c' (kPa)	0	10	35,0
Module de déformabilité drainé E' (MPa)	10,0	50,0	120
Coefficient K_0	0,5	0,5	0,6

Tableau. IV. 3 – Paramètres géotechniques de calcul – roche

Horizon géotechnique	Grès lumachéliques poreux (QM-Gr)
Poids spécifique γ (kN/m ³)	23,0
Angle de frottement ϕ	40°
Cohésion c (kPa)	40,0
Module de déformabilité E (MPa)	100,0

IV.4.2 Paramètres structurels

Les structures en béton armé qui font partie du blindage ont été modélisées dans le logiciel PLAXIS 2D comme des éléments du type « plate », selon les spécifications du projet et selon les indications des normes applicables, notamment en ce qui concerne la capacité portante et la déformabilité. Nous avons considéré que ces éléments structurels présentent un comportement linéaire élastique. Le tableau. IV. 4 présente les caractéristiques, par mètre de développement, des éléments du type « plate » adoptés pour les modèles de calcul présentés dans le présent document.

Tableau .IV. 4 – Caractéristiques par mètre des éléments du type

« Plate » considérés pour simuler les structures de blindage.

Élément structurel	EA (kN/m) x10 ⁶	EI (kN.m ² /m) x10 ⁶	h équivalent (m)	Poids (kN/m/m)	<i>v</i>
Parois moulées (e=1,00 m)	33	2,75	1,00	14,45	0,2
Parois moulées (e=1,00 m) + paroi de revêtement (e=0,50 m)	49,50	9,28	1,50	16,13	
Parois moulées (e=1,00 m) + paroi de revêtement (e=1,40 m)	79,20	38,02	2,40	34,80	
Rideaux de pieux Ø800//1,10	15,08	603,2	0,69	6,86	
Rideaux de pieux Ø800//1,10 + Parois des accès (e=0,60 m)	34,88	4,79	1,28	15,00	

Tableau .IV.5 Caractéristiques des éléments types « node-to-node Anchor » considérés pour simuler les niveaux de boutonnage matérialisés par des profilés métalliques.

Élément structurel	80% EA (kN)	Éloignement (m)
2x2HEB500	15,300x10 ⁶	Variable pour chaque cas

Tableau. IV.6 Espacement entre appuis pour chaque section de calcul.

Niveau de Butonnage	Espacement entre appuis (m)	
	Corps Principal	Accès Sud
1	8	9
2	6	7
3	7	7
4	7	-
5	7	-

IV.5 Description du modèle géométrique retenu

Le modèle géométrique retenu et adopté dans cette étude en 2D de 98,850 m de largeur et 60 m de profondeur, et d'entraxe de 25,36 m et 12,89 m de corps principale et accée sud respectivement considérant que la profondeur du fond des parois moulées est de 30,20 m et

la profondeur du fond d'excavation du rideau de pieux de l'accès Sud, dans cette section de calcul « section 3-3 », est 19,80 m.

En considérant le type de problème, un calcul en état plan de déformation a été considéré. En ce qui concerne la discrétisation du modèle de calcul, le maillage d'éléments finis (constitué par des éléments triangulaires avec 15 points) est automatiquement généré par le logiciel PLAXIS 2D.

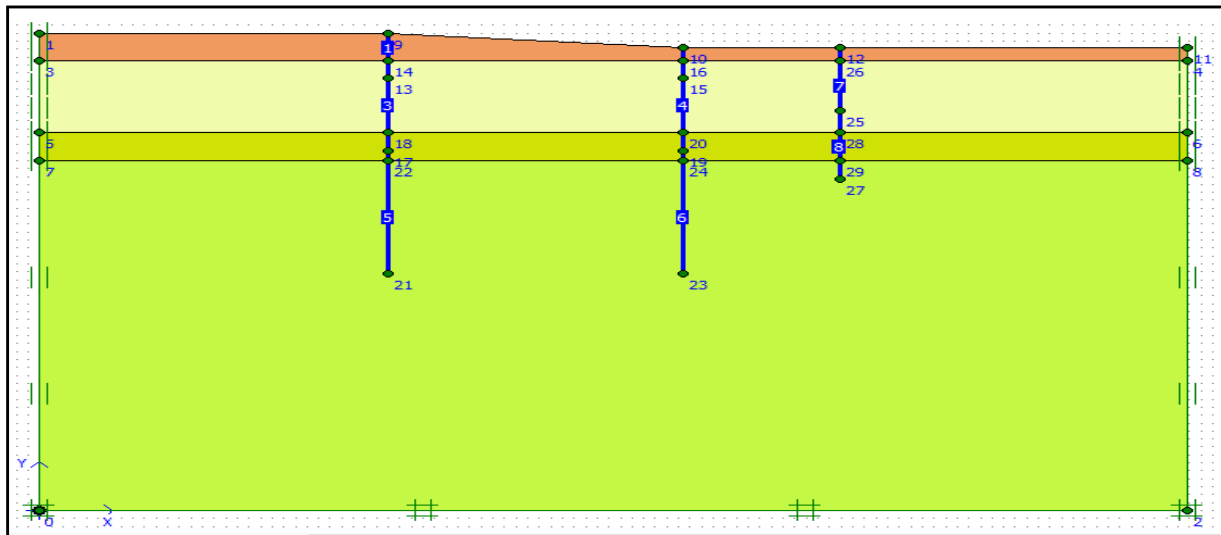
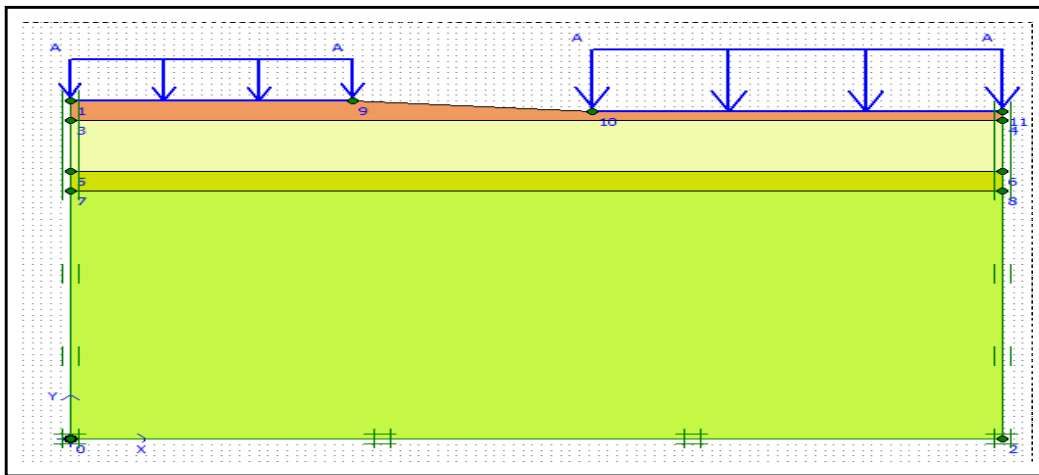


Fig.IV.4 Modèle géométrique du projet

En ce qui concerne des surcharges agissantes sur la surface du terrain pendant la phase de construction et d'exploration de la station, on a considéré une valeur de 11,11 kPa comme surcharge de service. Cette valeur, a été obtenue à partir de la multiplication de valeur de service (10 kPa – surcharge routière) par 1,10 de façon à garantir indirectement l'application du coefficient de sécurité préconisé pour les actions variables (1,50) au moment d'application du coefficient de 1,35 aux efforts obtenus du logiciel ($1,35 \times 1,1 \approx 1,50$). En considérant le plan d'installation prévu pour le chantier et le déploiement de la station, en utilisant la même méthodologie nous avons préconisé la surcharge 16,67 kPa (15 kPa – surcharge de chantier, multiplié par 1,1), dans les zones où des éventuelles stockages puissent survenir. Nous signalons, néanmoins, la limitation que sera imposé dans l'arrière de la paroi de l'accès Sud concernant la possibilité de charges supérieures.



IV.5 Introduction de la surcharge de consolidation.

IV.5.1 Les différents niveaux de l'excavation

Le creusement de la station est réalisé par plusieurs niveaux d'excavations au corps central et de l'accès. La figure suivante résume les différents niveaux d'excavation :

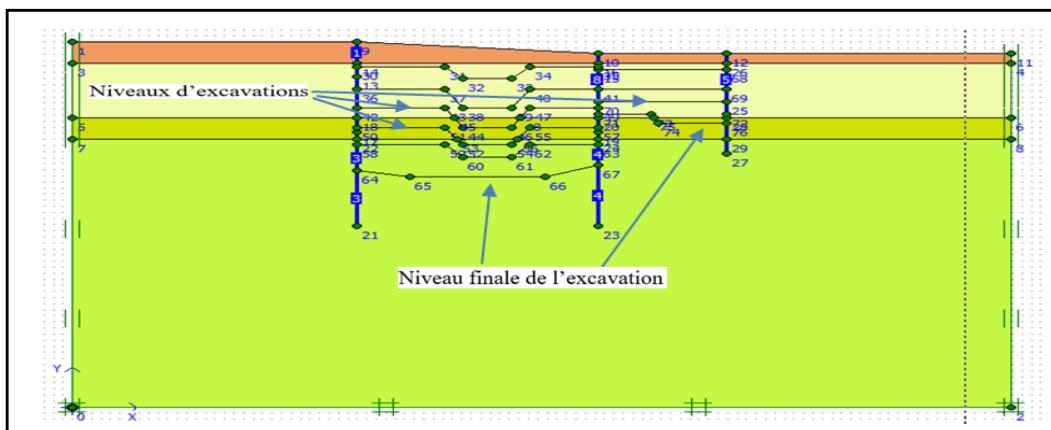


Fig.IV.6 Les différents niveaux d'excavation de la station

IV.5.2 Les différents niveaux de butonnage

Dans la section de calcul 3, le phasage d'excavation et application des supports provisoires proposés, 5 niveaux de butons pour le corps principal et 3 pour l'accès sud, aussi bien que les éléments de la structure définitive, deux dalles et la paroi de revêtement en béton armé, ont été simulés.

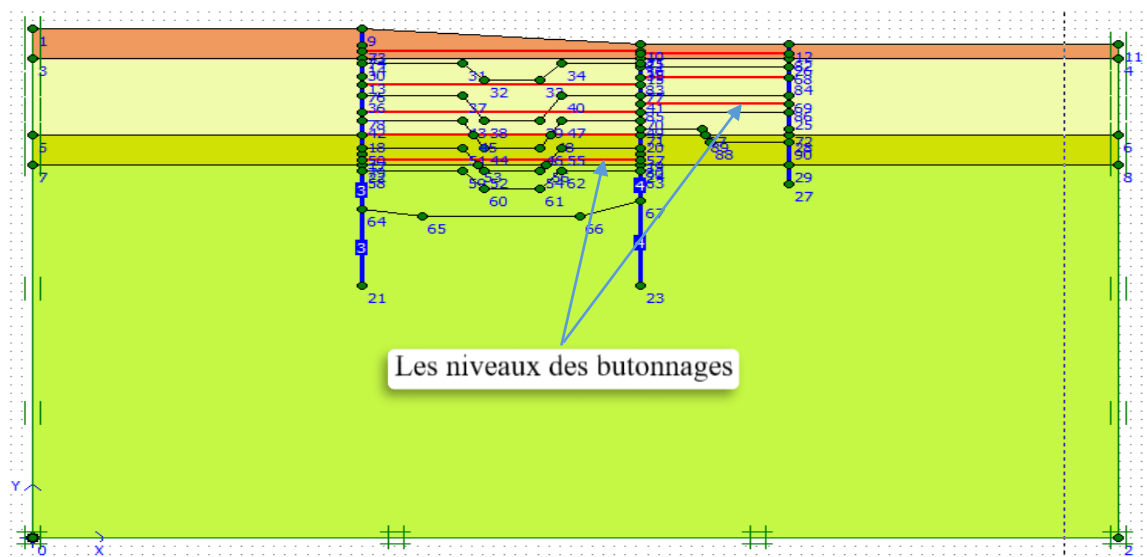


Fig.IV.7 Les différents niveaux des butonnages

IV.6 La modélisation numérique

IV.6.1 Les phasages de section de modélisation

Le phasage admis pour la section de calcul 3 est le suivant :

- **Phase 01**

Génération de l'état de contrainte initial au travers de l'application du K_0 pour une situation à long terme, ça veut dire, en contraintes effectives.

- **Phase 02**

Application, dans la surface du côté gauche du modèle, d'une surcharge de 11,10 kPa, et dans l'autre côté, de 16,66 kPa.

- **Phase 03**

Modification du type de réponse du terrain, de drainé pour non drainé (pour les couches associés aux terrains argileuses et les remblais).

- **Phase 04**

Exécution des parois moulées et paroi des pieux.

- **Phase 05**

Mise à zéro des déformations du modèle de calcul. Première phase d'excavation (située à l'intérieur de la station), avec l'excavation totale du talus et de 1,70 m c'est à dire profondément 2,4 m et avec une excavation additionnelle de 1,95 m dans une tranchée centrale ;

- **Phase 06**

Deuxième phase d'excavation avec 2,65 m de profondeur (située à l'intérieur de l'accès) ;

- **Phase 07**

Augmentation de l'épaisseur des parois et des pieux (dans la station et l'accès, respectivement) dans les tronçons exposés dans la phase précédente en simulant la descente des parois de revêtement, et activation du premier niveau de butonnage dans la côté de la station et de l'accès.

- **Phase 08**

Troisième phase d'excavation avec 7,80 m de profondeur (située à l'intérieur de la station) jusqu'à 1,45 m en-dessous du deuxième niveau de butonnage. Excavation additionnelle de 3,00 m dans une tranchée centrale.

- **Phase 09**

Quatrième phase d'excavation avec 6,00 m de profondeur (située à l'intérieur de l'accès).

- **Phase 10**

Augmentation de l'épaisseur des parois et des pieux (dans la station et l'accès, respectivement) dans les tronçons exposés dans la phase précédente, et activation du deuxième niveau de butonnage de la station et de l'accès.

- **Phase 11**

Cinquième phase d'excavation (située à l'intérieur de la station) avec 3,00 m de profondeur, jusqu'à 1,0 m au-dessous de la cote d'installation du troisième niveau de butonnage. Excavation additionnelle de 3,25 m dans une tranchée centrale.

- **Phase 12**

Augmentation de l'épaisseur des parois dans les tronçons exposés dans la phase précédente, activation du troisième niveau de butonnage de la station du corps central.

- **Phase 13**

Sixième phase d'excavation (située à l'intérieur de la station) avec 3,25 m de profondeur, jusqu'à 1,0 m au-dessous de la cote d'installation du quatrième niveau de butonnage. Excavation additionnelle de 2,75 m dans une tranchée centrale.

- **Phase 14**

Augmentation de l'épaisseur des parois associées à la phase d'excavation précédente, et exécution du quatrième niveau de butonnage.

- **Phase 15**

Septième phase d'excavation avec 2,75 m de profondeur de corps central, jusqu'à 1,0 m au-dessous de la cote d'installation du cinquième niveau de butonnage. Excavation additionnelle de 2,10m dans une tranchée centrale.

- **Phase 16**

Augmentation de l'épaisseur des parois associées à la phase d'excavation précédente, et exécution du cinquième niveau de butonnage.

- **Phase 17**

Huitième phase d'excavation avec 4,15m de profondeur (située à l'intérieur de l'accès).

- **Phase 18**

Augmentation de l'épaisseur des pieux à la phase d'excavation précédente, et activation le troisième niveau du butonnage de l'accès.

- **Phase 19**

Dernière excavation du corps central avec 6,00m de profondeur.

- **Phase 20**

Augmentation de l'épaisseur des parois associées à la phase d'excavation précédente.

- **Phase 21**

Dernière excavation de 2,40m de profondeur (située à l'intérieur de l'accès).

- Phase 22

Augmentation de l'épaisseur des pieux à la phase d'excavation précédente.

IV.6.2 Génération des maillages

Le modèle de référence se fait par des éléments à 15 nœuds. Le nombre d'éléments est 866 éléments et le nombre des nœuds est de 7521 nœuds. On généralise le maillage des éléments avec (global coarseness) au « fine » élément distribution, puis on le raffine local élément au niveau des éléments structuraux, comme indiqué sur la figure suivante :

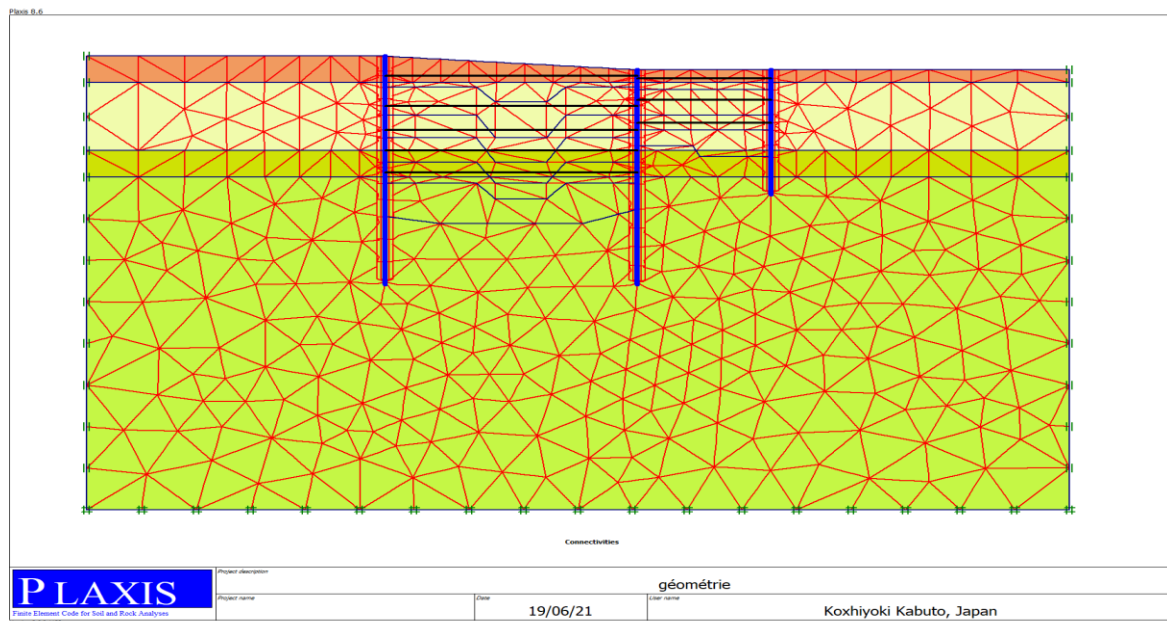


Fig.IV.8 Génération de maillage

IV.6.3 Les conditions hydrauliques

En ce qui concerne la position de la nappe phréatique, nous avons considéré les lectures des piézomètres à tuyau ouvert et du piézomètre à corde vibrante que montrent l'existence d'une nappe phréatique assez superficielle, au niveau 12,0 m, environ (6,50 m de profondeur dans le côté plus haut).

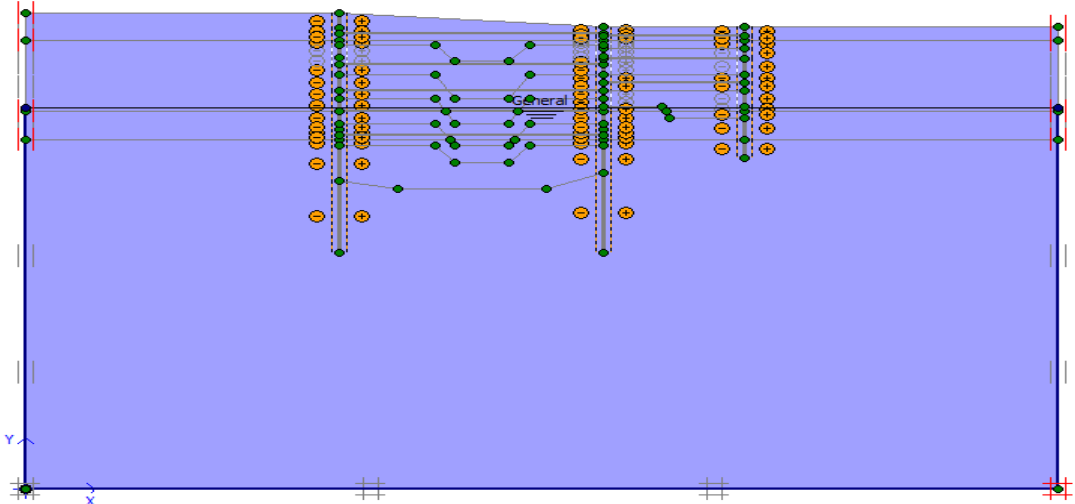


Fig.IV.9 Conditions hydrauliques initiales

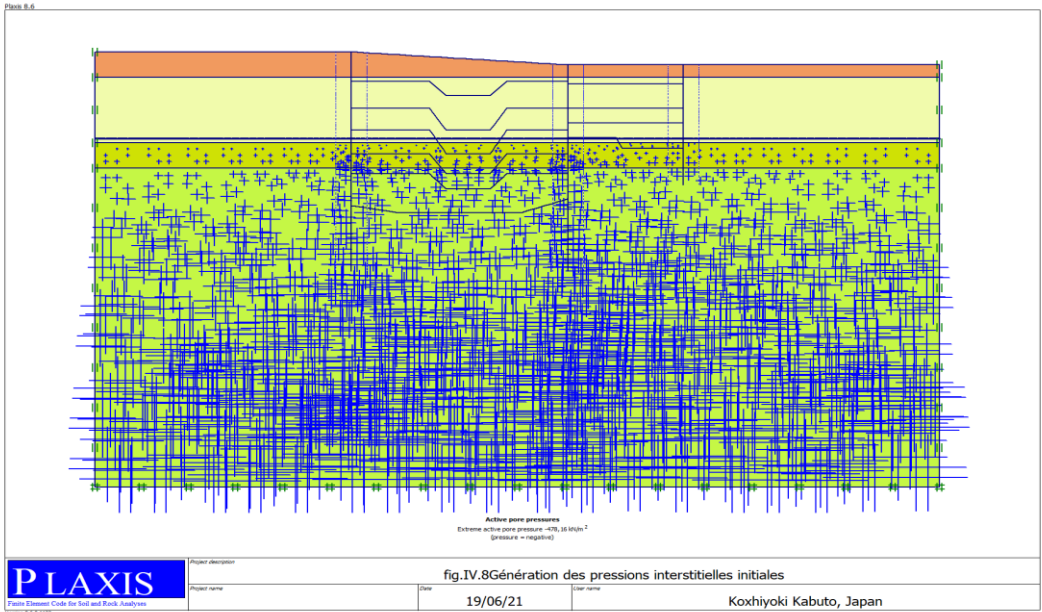


Fig.IV.10 Génération des pressions initiales

IV.6.4 La géométrie de quelques phasages de calculs

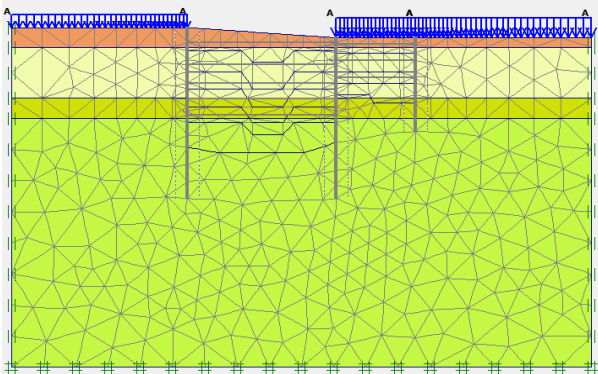


Fig.IV.11 Phase 2

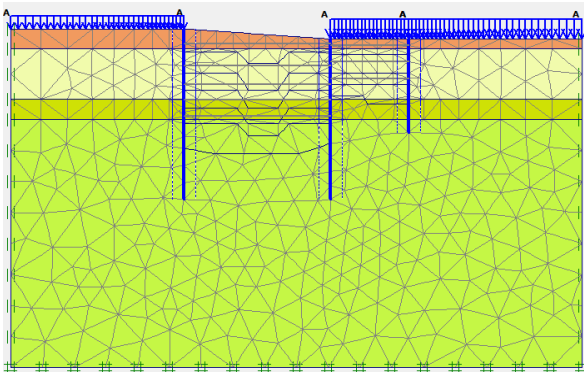


Fig.IV.12 Phase 4

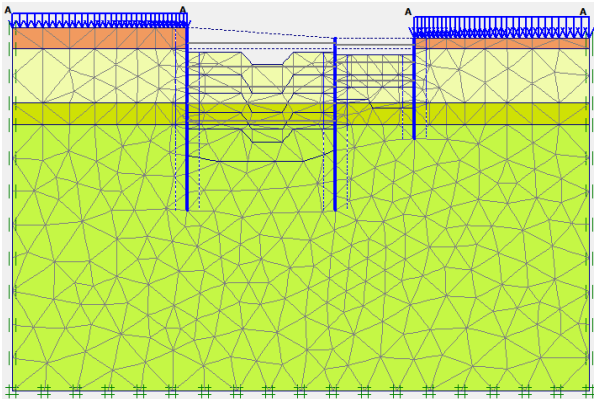


Fig.IV.13 Phase 6

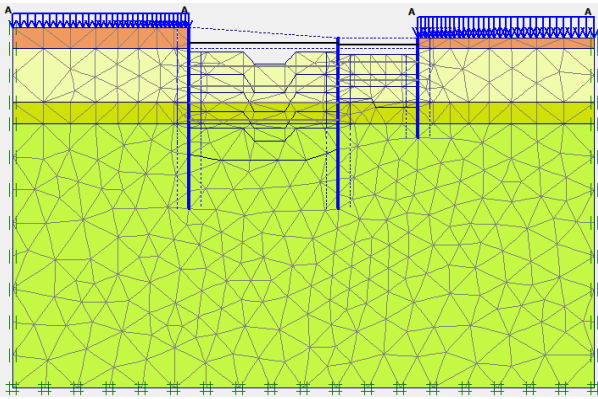


Fig.IV.14 Phase 7

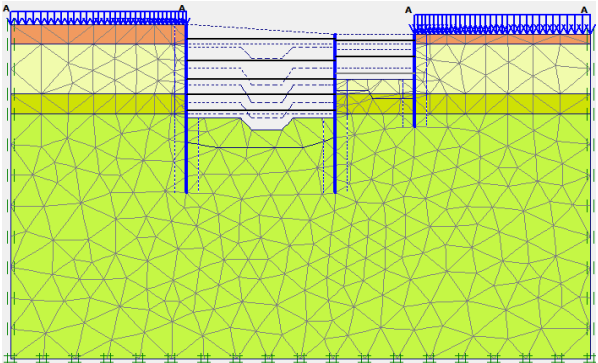


Fig.IV.15 phase 17

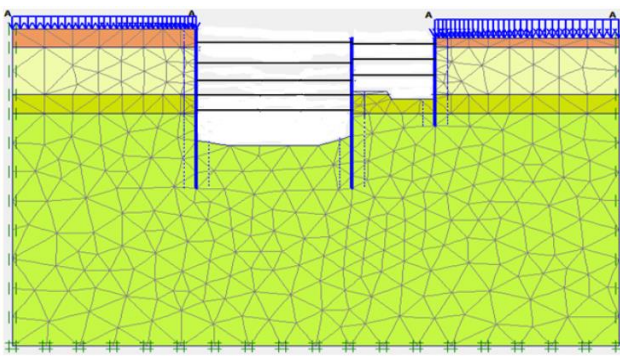


Fig.IV.16 phase 22

IV.7 Les instruments de contrôle

IV.7.1 Exécution de la mesure inclinométrique

Le système de mesure inclinométrique sert à déterminer les déplacements (changements d'inclinaison) perpendiculaires à l'axe d'un forage (tube) au moyen d'un grand nombre de points de mesure situés le long de ce dernier.

En pratique, ce système mesure les déformations du sol/rocher encaissant induites par une instabilité de terrain. La position, l'ampleur, la profondeur, la vitesse et la direction d'une zone de glissement peuvent être ainsi définies. Le contrôle et l'observation de fouilles, versants instables, failles,... sont ainsi facilités.

La sonde est introduite dans un tube inclinométrique, guidée par des rainures. Les valeurs sont enregistrées à intervalles réguliers entre 0,3m et 1m. L'exploitation et l'interprétation des données sont effectuées sous forme d'un polygone avec deux axes perpendiculaires (A et B). La mesure initiale correspond à la position du forage et du tube inclinométrique peu après son installation. La comparaison des mesures suivantes par rapport à la mesure initiale donne la déformation.

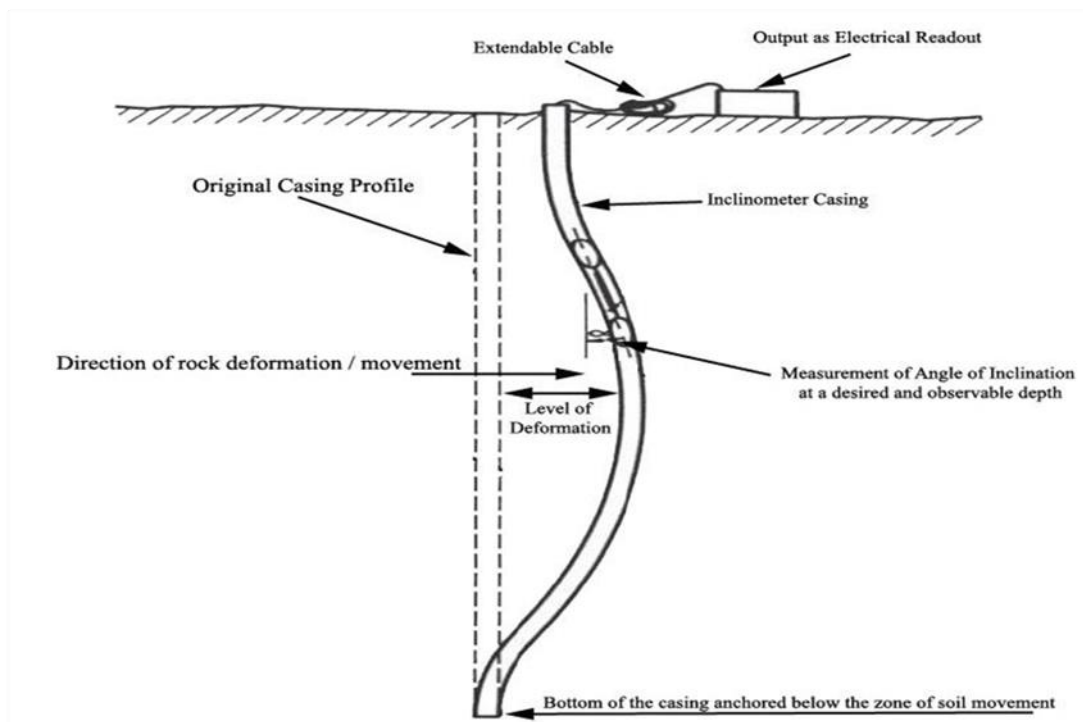


Fig.IV.17 Techniques de mesure inclinométrique

IV.7.2 Interprétation des mesures inclinométriques

Les mesures sont réalisées par des techniciens expérimentés. Les données sont ensuite transférées sur un PC pour interprétation et analyse. Les résultats sont présentés sous forme de graphiques et de tableaux grâce au logiciel TRICAL. Les rotations du tubage et les déplacements aux deux extrémités du tubage, mesurés par exemple avec des instruments géodésiques, sont pris en compte dans l'analyse des données. Les mesures effectuées dans des tubages coupés en deux, entre autres lors du passage du tunnelier, peuvent également être analysées avec le logiciel TRICAL. Les mesures de déplacement peuvent être transférées sous forme de fichier ASCII pour une analyse plus poussée. (Calcul inverse, programme CAD,...)

Le système de mesure comporte une partie installée dans un forage (fixe) et une partie amovible.

La partie fixe comprend : un tube inclinométrique de haute précision en résine synthétique.

La partie amovible est composée de : une sonde, un câble de mesure avec graduation, une construction pour fixer le câble en tête du forage, un appareil d'enregistrement.



Fig.IV.18 Inclinomètre et tubage de mesure

IV.8 Résultats et dissections

Dans cette étude, nous allons nous intéresser à deux types de déformation, la déformation interne et la déformation de forme telle que :

- 1) Déformation du maillage à la dernière phase de calcul.
- 2) Déformation des éléments structuraux (paroi moulée coté à gauche, coté droite et rideaux des pieux) indiquée par :

- Un déplacement horizontal.
- Les courbes des efforts internes (moment fléchissant, effort tranchant, effort normal).

IV.8.1 Déformation du maillage

La déformation du maillage et des éléments structuraux sont représentées sur la figure suivante. Le déplacement total maximum est de l'ordre de $34,73 \times 10^{-3}m$.

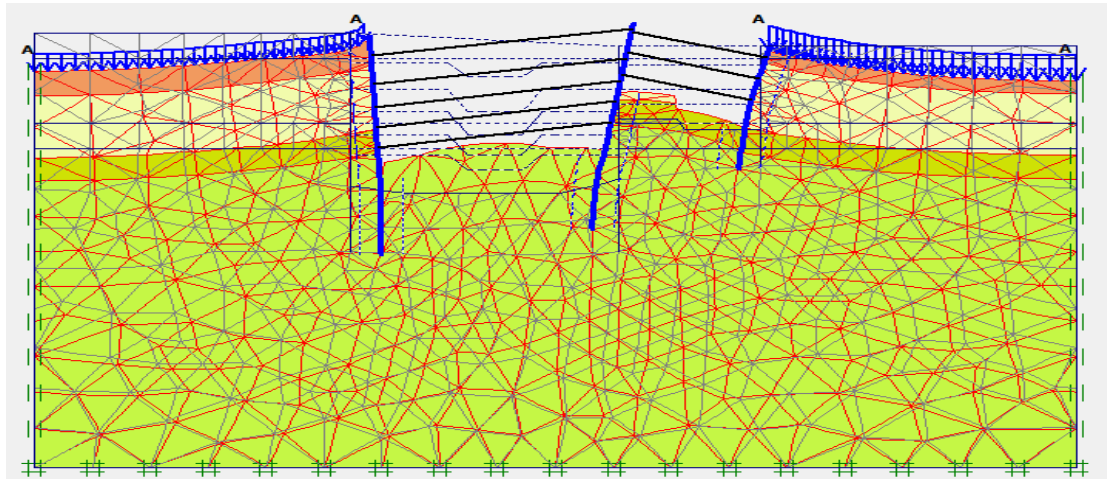


Fig.IV.19 La déformation du maillage

IV.8.2 Déformation des éléments structuraux

IV.8.2.1 Déplacement horizontal

✚ 1^{ère} excavation, profondeur =4.5m / phase 5

Le déplacement horizontal maximum (U_x) est de $5,92 \times 10^{-3}m$

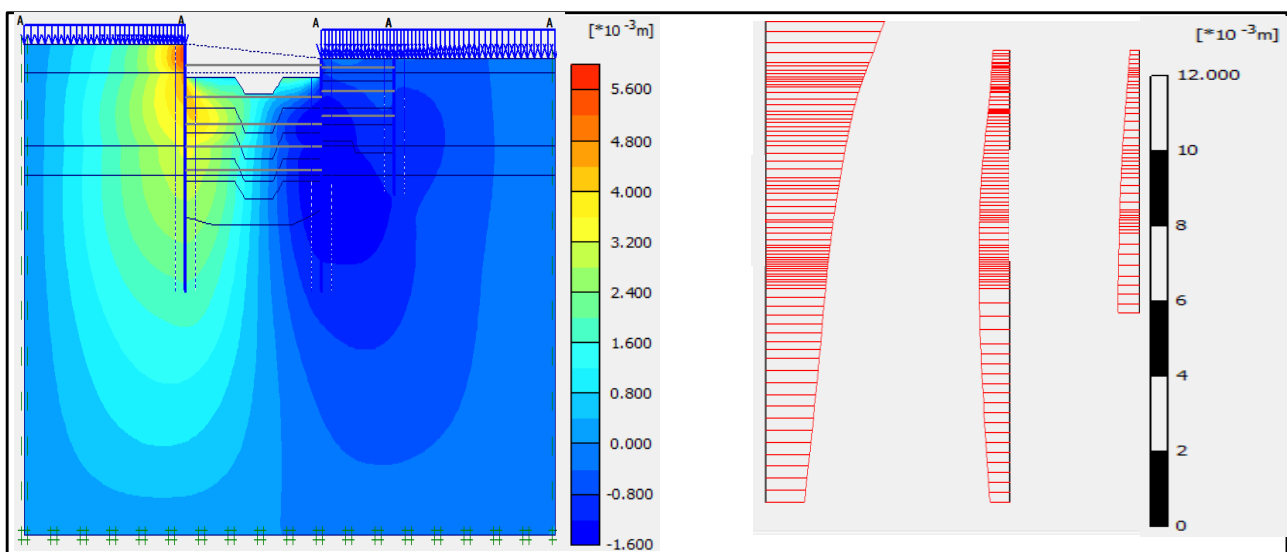


Fig. IV.20 Présentation de déplacement horizontal à excavation de profondeur 4.5m

✚ 2^{ème} excavation, profondeur =16,80 m / phase 15

Le déplacement horizontal maximum (U_x) est de $9,63 \times 10^{-3} \text{m}$

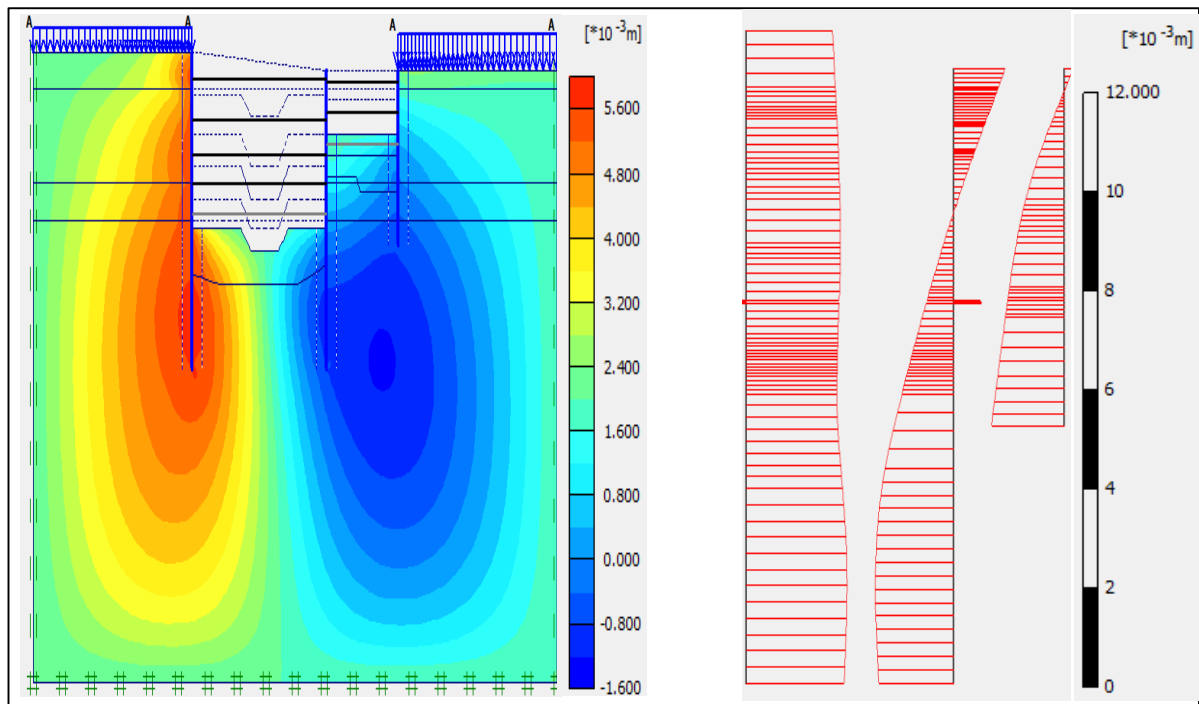


Fig. IV.21 Présentation de déplacement horizontal à excavation de profondeur 16.80m

✚ 3^{ème} excavation, profondeur P =25.15m / phase 19

Le déplacement horizontal maximum (U_x) est de $13,76 \times 10^{-3} \text{m}$

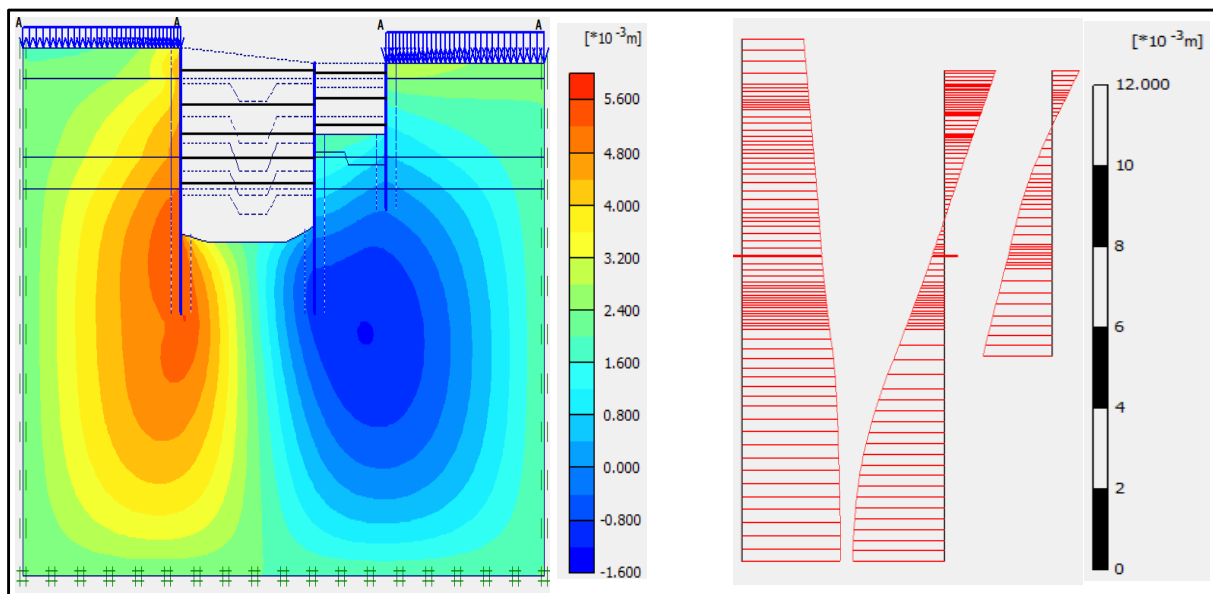


Fig. IV.22 Présentation de déplacement horizontal à excavation de profondeur 25.15m

IV.8.2.2 Effort normal

✚ 1^{ère} excavation, profondeur 4.5m / phase 5

Effort normal max est de -91,56 KN

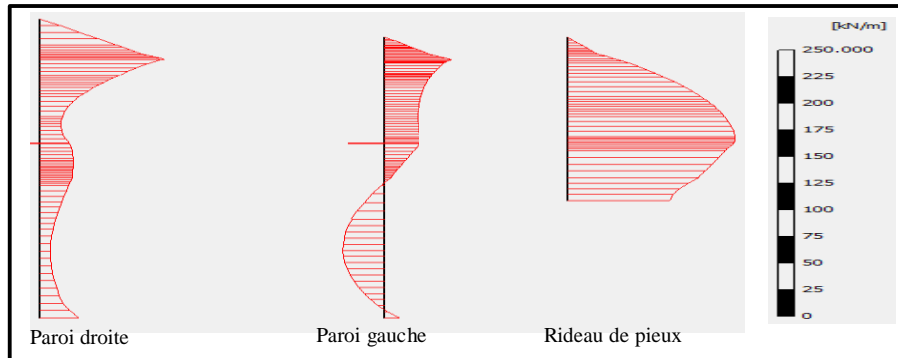


Fig.IV.23 Diagramme de l'effort normal des éléments structuraux (phase 5)

✚ 2^{ème} excavation, profondeur P =16,80 m / phase 15

Effort normal max est de -892,18 KN

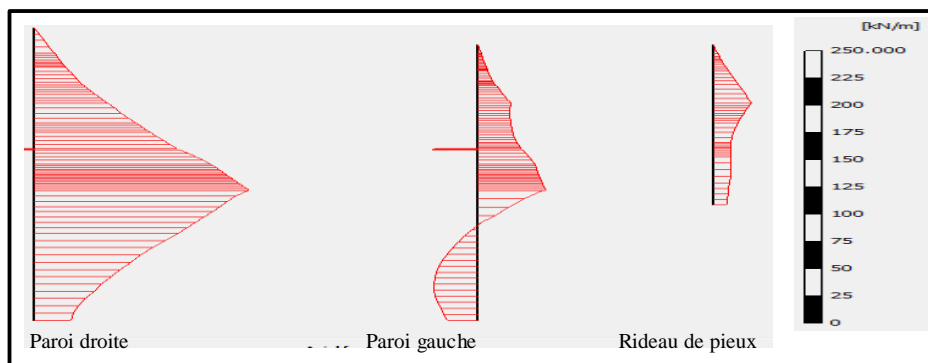


Fig.IV.24 Diagramme de l'effort normal des éléments structuraux (phase 15)

✚ 3^{ème} excavation, profondeur 25.15m / phase 19

Effort normal max est de $-1,25 \times 10^3$ KN

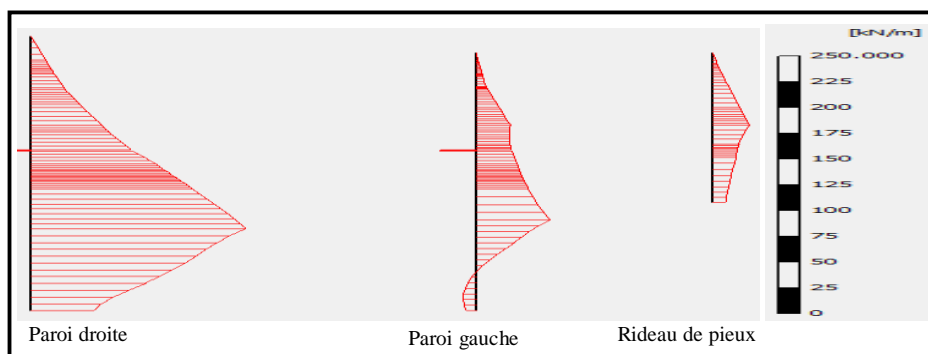


Fig.IV.25 Diagramme de l'effort normal des éléments structuraux (phase 19)

IV.8.2.3 Effort de cisaillement

✚ 1^{ère} excavation, profondeur 4.5m / phase 5

Effort de cisaillement max -61,45 KN

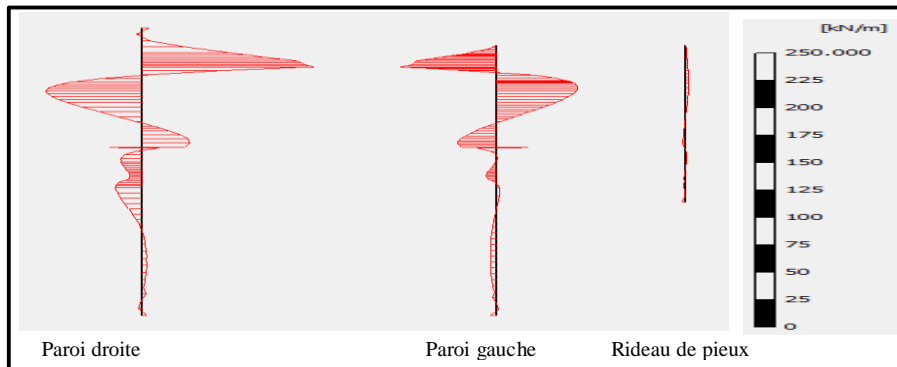


Fig.IV.26 Diagramme de l'effort cisaillement des éléments structuraux (phase 5)

✚ 2^{ème} excavation, profondeur P =16,80 m / phase 15

Effort de cisaillement max -141,36KN

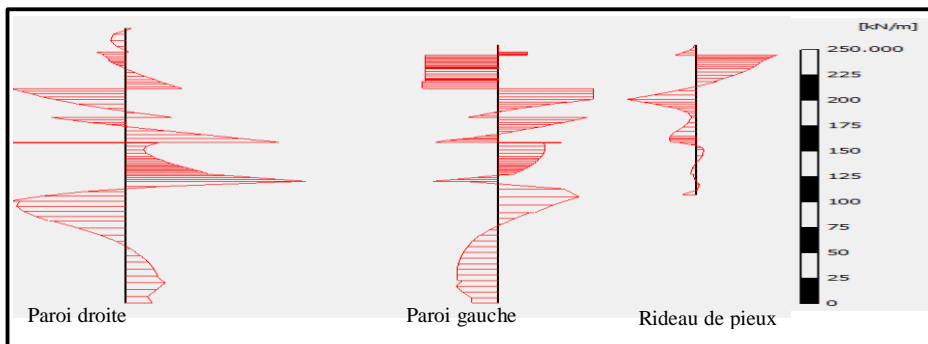


Fig.IV.27 Diagramme de l'effort cisaillement des éléments structuraux (phase 15)

✚ 3^{ème} excavation, profondeur P =25.15m / phase 19

Effort de cisaillement max -445,55 KN

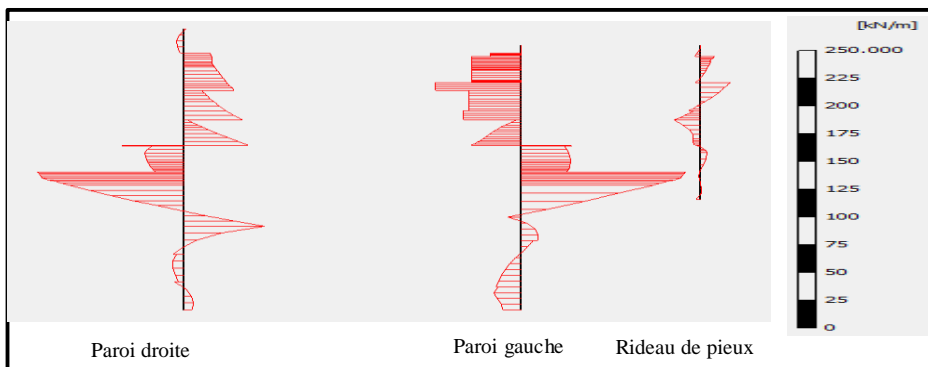


Fig.IV.28 Diagramme de l'effort cisaillement des éléments structuraux (phase 19)

IV.8.2.4 Moment fléchissant

✚ 1^{ère} excavation, profondeur $P = 4.5m$ / phase 5

Moment fléchissant maximal est de $-116,66 \text{ KN.m}$



Fig.IV.29 Diagramme de Moment fléchissant des éléments structuraux (phase 5)

✚ 2^{ème} excavation, profondeur $P = 16,80 m$ / phase 15

Moment fléchissant maximal est de $-211,88 \text{ KN.m}$



Fig.IV.30 Diagramme de Moment fléchissant des éléments structuraux (phase 15)

✚ 3^{ème} excavation profondeur $25.15m$ / phase 19

Moment fléchissant maximum $1,31 \times 10^3 \text{ KN.m}$

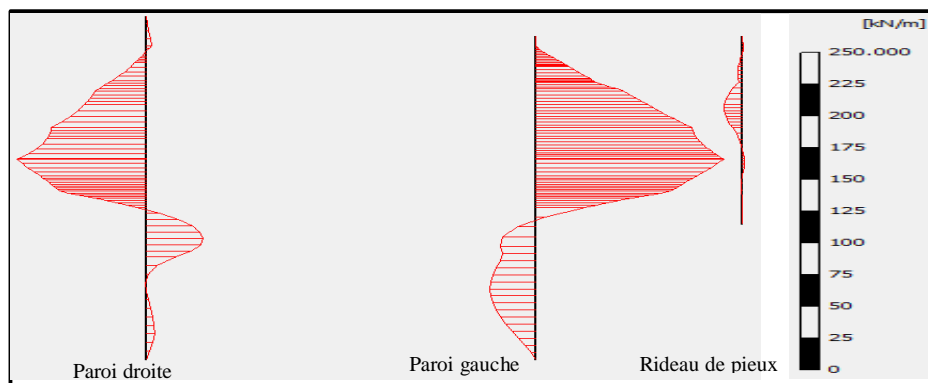


Fig.IV.31 Diagramme de Moment fléchissant des éléments structuraux (phase 19)

Le tableau suivant représente les valeurs maximales de toutes les phases de calcul

Tableau. IV.7 Les valeurs maximales de toutes les phases de calcul

phase	Profondeur (m) D'excavation et butons		Activation du butons	Déplaceme nt horizontal max $\times 10^{-3}$ m	Effort normal Max [KN]	Effort de cisaillement Max [KN]	Moment fléchissant Max [KN. m]
	C- c	A-s					
5	04,10	-	/	5,92	-91,56	-61,45	-116,66
6	-	2,70	/	6,02	191,44	-60,07	-113,55
7	02,6	1,15	Niveau 1	5,36	189,56	-60,20	-114,49
8	7,80	-	/	6,55	253,30	-77,37	-180,35
9	-	06,00	/	7,30	335,15	-77,56	-87,32
10	06,60	05,80	Niveau 2	6,35	335,93	-77,96	-110,45
11	10,80	-	/	7,64	-398,10	-137,45	-173,21
12	09,80	-	Niveau 3	7,40	-455,81	-142,61	177,13
13	14,05	-	/	8,45	-650,72	-165,17	-258,31
14	12,60	-	Niveau 4	8,20	-710,36	-172,28	-251,64
15	16,80	-	/	9,36	-892,18	-141,36	-211,88
16	15,40	-	Niveau 5	9,35	-940,73	-142,90	-213,50
17	-	08,00	/	11,22	-923,84	142,08	-373,35
18	-	07,00	Niveau 3	11,30	-982,83	147,45	393,93
19	25,15	-	/	13,76	$-1,25 \times 10^3$	-445,55	$1,31 \times 10^3$
20	-	-	/	13,89	$-1,31 \times 10^3$	-446,21	$-1,29 \times 10^3$
21	-	12,49	/	14,63	$-1,32 \times 10^3$	-398,47	$-1,33 \times 10^3$
22	-	-	/	14,72	$-1,32 \times 10^3$	-411,37	$-1,41 \times 10^3$

On remarque que la différence entre les résultats inclinométriques et les résultats de calcul numérique est proches, et cela pour les deux profondeurs (16,80 m et 25,15 m). Pour le premier niveau à 16.8m de profondeur le déplacement inclinométrique max marqué entre les deux positions I3 et I4 est égal à 11.2mm et le déplacement numérique marqué 9.36 mm avec un écart de 1,84 mm. Pour le deuxième niveau à 25.15m de profondeur, on trouve les déplacements max entre les deux inclinomètres marqués 11.7mm et le déplacement numérique 13.76 mm avec un écart de 2,06 mm.

IV.9 Conclusion

L'étude numérique de station USTHB au niveau de la section 3-3, et la comparaison des résultats d'étude et inclinométriques montre que la déformation totale horizontale maximale au niveau des inclinomètres de la station est stable par rapport à la mesure d'étude.

Les résultats obtenus dans cette étude (effort normal, effort de cisaillement, moment fléchissant), sont utilisés dans l'investigation de dimensionnement de l'ouvrage et système de soutènement.



CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire porte sur l'étude, par voie de la modélisation numérique, du soutènement d'une section de la station de métro d'Alger (USTHB). L'étude comporte le type d'écran à savoir les parois moulées ainsi que les types de système de butonnage.

Dans un premier temps nous avons décrit les types de soutènement, la méthode de construction et les techniques de réalisation.

Ensuite, une présentation du projet de la station étudiée (USTHB) s'impose, sa géométrie, son emplacement, ces accès, ces niveaux, et ses sections ...etc.

Après cette présentation, on s'est intéressé à développer les points suivants :

- Les matériaux de constructions, les étapes des travaux ;
- Les deux types d'écran et types de butonnage ;
- Les méthodes de contrôle inclinométrique pour contrôler les déplacements horizontaux de la paroi moulée.

Cette partie consacrée au butonnage et suivi par la modélisation numérique de notre profil à l'aide du logiciel PLAXIS 2D ainsi le type de soutènement paroi moulée en utilisant le système d'appuis horizontaux (butons). Dans cette étape on peut voir si les déplacements horizontaux ainsi que les déformations de l'ensemble paroi moulée-sol sont admissibles, en même temps on peut tirer les diagrammes des efforts normaux, efforts tranchants et moments fléchissant.

Suite aux résultats obtenus, une comparaison est faite sur les déformations maximales de la section 3-3, précisément sur les deux inclinomètres I3 et I4.

Vu que les résultats des déplacements maximum obtenus par Plaxis 2D et les mesures maximales des inclinomètres I3 et I4 sont très proche, on peut conclure qu'une bonne stabilité de la paroi est assurée en cours de réalisation du projet.

LISTE DES REFERENCES

- [1] **ARIBI ALIA**, (2019). Etude numérique d'une paroi moulée avec tirant d'ancrage : analyse paramétrique. Mémoire master, Université Badji Mokhtar, Annaba
- [2] Grand guide de construction des murs de soutènements 28/10/2019
[Bruno](#), [John.propitech](#), [Yvan](#)
- [3] **FRONCOIS SCHLOSSER (1991)**, "*Murs de soutènement*", Techniques de l'Ingénieur, Traité Construction Volume C 244, Paris p2
- [4] dictionnaire <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=6173>
- [5] **Mr ZEGGAI Hadj**, (2019).conception et calcul d'un ouvrage de soutènement en terre armée. Mémoire de MASTER, université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem
- [6] **M. Khemoum Imad M, Guidoum Nedjem Eddin**. (2017). Etude paramétrique du comportement d'un mur de soutènement renforcée par la géogrid", mémoire master. Université L'arbi Ben Mhidi, Oum-Iboiki
- [7] **ANNANE Abdallah**. (2013). "Mur de soutènement en zone sismique". Mémoire Magister, Université Hadj Lakhdar, Batna.
- [8] ECOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'ETAT, *cours de mécanique de sol II*, 2006-2007 pages 04
- [9] **HADJ Abderrahmane Saida**. (2011). Etude de l'interaction d'un rideau de palplanches avec le sol de fondation pour les ouvrages portuaires. Mémoire de Magister, université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.
- [10] Livre de cours pratiqué de mécanique de sol OUV002GEO080910 (Cours_pratique_de_mecanique_des_sols_2 calcul des ouvrages) page 104
- [11] Paroi moulée https://fr.wikipedia.org/wiki/Paroi_moul%C3%A9e. 02/07/2021
- [12]**ADJRAD Mahmoud NAILI DOUA OUDA Walid**. (2017). Parois2D : Elaboration d'un programme éléments finis pour modéliser des parois moulées où le sol est considéré comme un matériau élastique et linéaire. Mémoire de master, université Akli Mohand Oulhadje, Bouira
- [13] **ZIANI HINDA**. (2020). Etude de la paroi moulée de la Station de Metro Station Université Houari Boumediene Bab Ezzouar ALGER. Mémoire de master université Moutafa Ben Boulaid, Batna
- [14]**Mohammed Amin Azzi**. (2015) *Influence des paramètres de formulation du béton sur les pathologies des parois moulées*. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May, Bayonne, France. hal-01167733 p2

LISTE DES REFERENCES

- [15] **BOUAFIA ALI. (2018).** *CONCEPTION ET CALCUL DES OUVRAGES GÉOTECHNIQUES FONDATIONS, SOUTÈNEMENTS ET TALUS.* Eurl Pages Bleues Internationales, p282-283
- [16] **SAADI Riadh. (2012).** Modélisation numérique d'une paroi de soutènement en zone urbaines (paramètres caractéristiques d'interaction). Mémoire de Magister. Université E HADJ LAKHDER, BATNA
- [17] **CHOUTER Amar. (2016).** Contribution à l'étude numérique du comportement d'une paroi moulée tirantée. Mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf, M'SILA
- [18] LCPC Laboratoire central des ponts et chaussées guide technique. (2003). *Ouvrages de soutènement recommandation pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des parois moulée et préfabriquées* p20
- [19] **B, Abdelmadjid. C, Tarik. B, Smail. (2017)** *INTERET ET IMPACT DU TRANSPORT DE VOYAGEURS ATOUR DU TRAMWAY D'ALGER.* Cahiers Géographiques de l'Ouest, n°12-13, 2017. Université d'Alger (USTHB) et Batna ENATT p11
- [20] Métro d'Alger. https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9tro_d%27Alger
- [21] **KHALDOUNA HANNANE, LEYI EKANI CHASLES JOCHARD(2018).** Analyse de stabilité et modélisation numérique du talus de la résidence présidentielle de la wilaya d'Annaba. Mémoire de master, Université BADJI MOKHTAR, ANNABA
- [22] **Brinkgereve R.B.J. ET Vermeer P.A.:** « *PLAXIS Version 8 material model manual* », DELFT University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas, 2003
- [23] **LEVASSEUR, S (2007)** Analyse inverse en géotechnique : développement d'une méthode à base d'algorithmes génétiques. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble I
- [24] **BENDJABALLAH Lynda. (2010).** calcul numérique du module d' Young d' un matériau homogène et isotrope base sur la théorie des poutres. Mémoire de Magistère, Université M'entourai, Constantine
- [25] **CHAREF KHODJA KARIM. (2011).** Modélisation de l'interaction sol-structure pour le cas des palplanches (Cas d'un écran de palplanches à AZEFFOUN) Mémoire du master, Université Mouloud Mammeri, Tizi ousou

LISTE DES REFERENCES

[26] Mesures Inclinométrique

https://www.solexperts.com/images/PDF_FRANZ/02_geot_FR/fr_21_geo_mesures_inclino_v1.pdf



ANNEXE

✚ Etapes de calcul du Plaxis2D

- Ouvrir l'application de plaxis 2D et général settings

General settings

Project | Dimensions

Project

Filename <NoName>

Directory ...

Title Analyse d'un paroi moul

General options

Model Plane Strain

Elements 15-Node

Comments

Acceleration

Gravity angle : - 90 ° 1.0 G

x-acceleration : 0,000 G

y-acceleration : 0,000 G

Earth gravity : 9,800 m/s²

Set as default

Next OK Cancel

- Entrer les dimensions et les unités

General settings

Project | Dimensions

Units

Length m

Force kN

Time s

Stress kN/m²

Weights kN/m³

Geometry dimensions

Left : 0,000 m

Right : 100,000 m

Bottom : 0,000 m

Top : 100,000 m

Grid

Spacing : 0,100 m

Number of snap intervals: 1

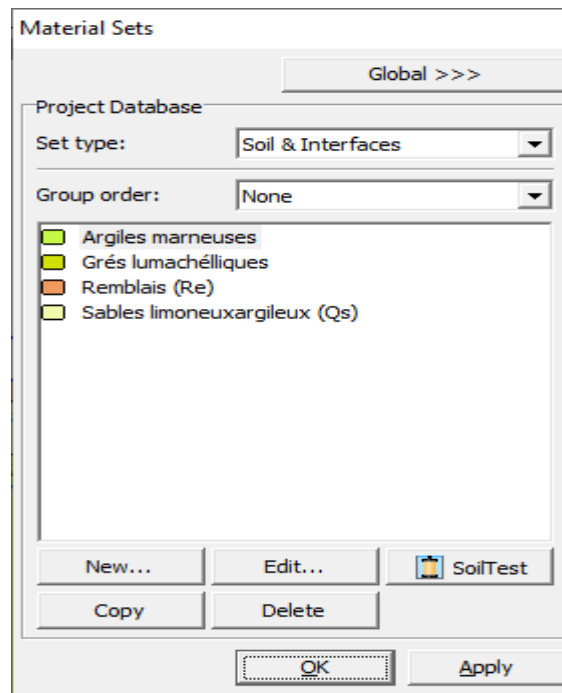
Set as default

Next OK Cancel

➤ Entrer des sols



: (*Material sets*) on fait entraine les caractéristique de notre projet (sols, parois et butons...).

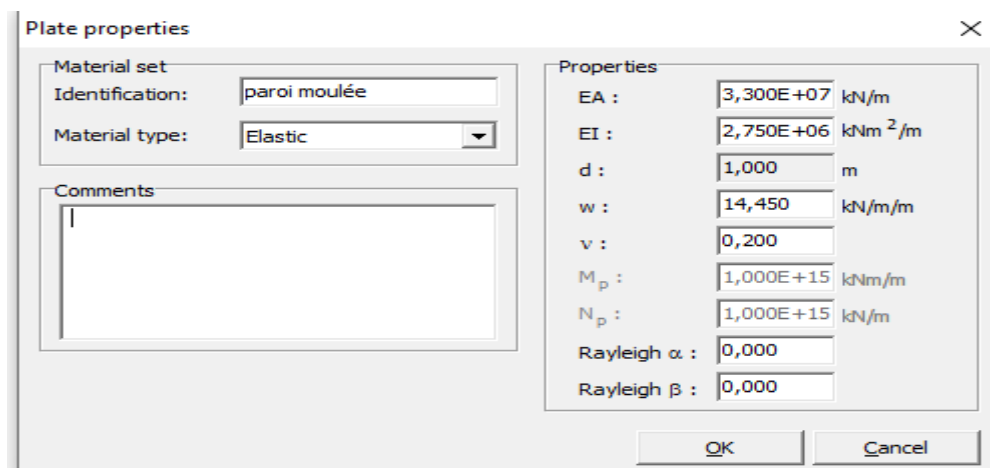


➤ Entrer parois et rideaux des pieux



: Les plaques sont des éléments de structure utilisés pour modéliser des structures élancées placées dans le sol et ayant une rigidité de flexion et une raideur normale significatives. Les plaques peuvent être utilisées pour modéliser l'influence de murs, plaques, coques ou soutènements.

- Paroi moulée



- Parois moulées (e=1,00 m) + paroi de revêtement (e=0,50 m)

Plate properties

Material set
Identification: paroi moulée +0,50 rév
Material type: Elastic

Comments

Properties

EA :	4,950E+07	kN/m
EI :	9,280E+06	kNm ² /m
d :	1,500	m
w :	16,130	kN/m/m
v :	0,200	
M _p :	1,000E+15	kNm/m
N _p :	1,000E+15	kN/m
Rayleigh α :	0,000	
Rayleigh β :	0,000	

OK Cancel

- Parois moulées (e=1,00 m) + paroi de revêtement (e=1,40 m)

Plate properties

Material set
Identification: paroi moulée +1,40 rev
Material type: Elastic

Comments

Properties

EA :	7,920E+07	kN/m
EI :	3,802E+07	kNm ² /m
d :	2,400	m
w :	34,800	kN/m/m
v :	0,200	
M _p :	1,000E+15	kNm/m
N _p :	1,000E+15	kN/m
Rayleigh α :	0,000	
Rayleigh β :	0,000	

OK Cancel

- Rideaux de pieux ø800//1,10

Plate properties

Material set
Identification: Rideaux de pieux
Material type: Elastic

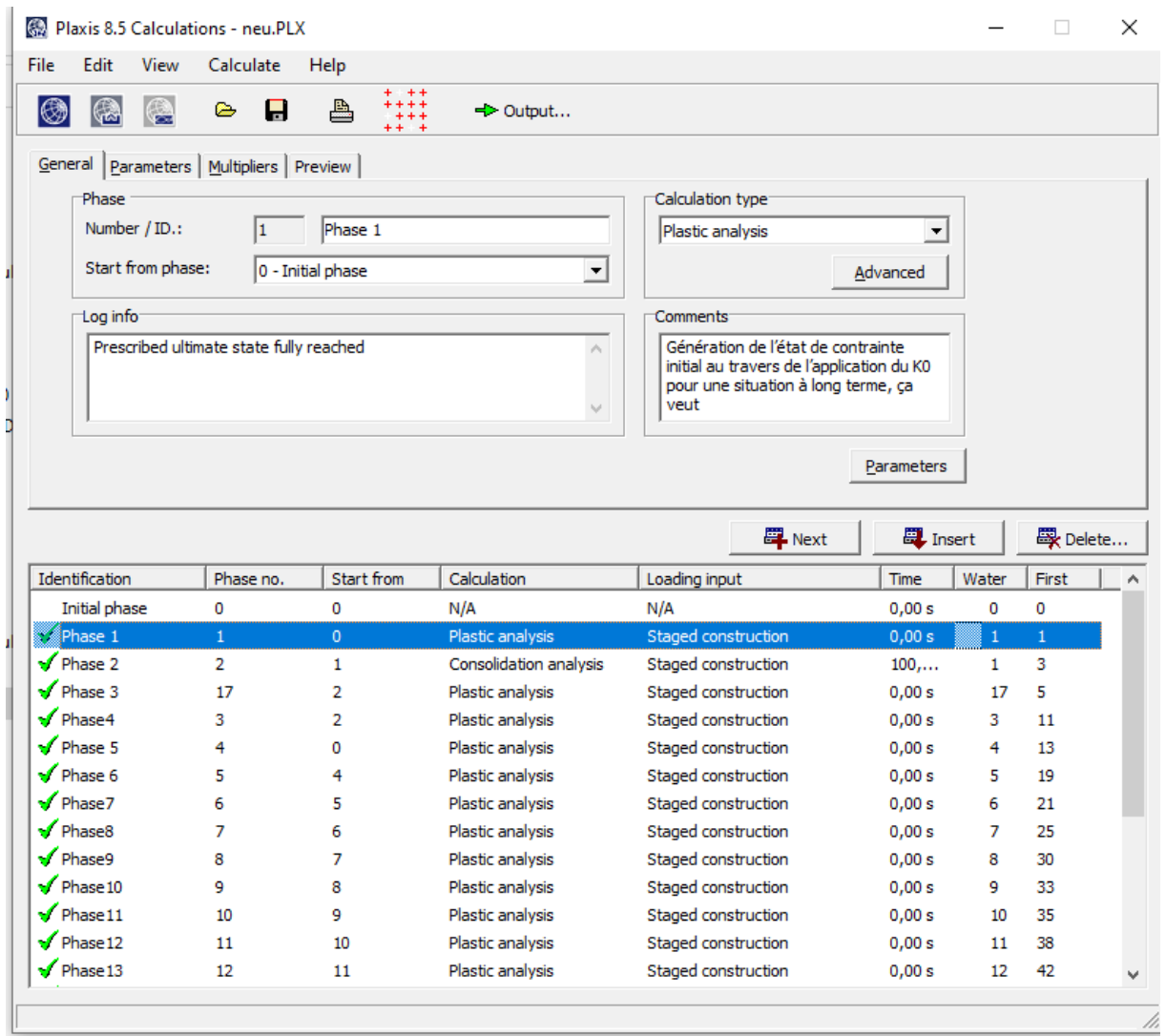
Comments

Properties

EA :	1,508E+07	kN/m
EI :	6,032E+05	kNm ² /m
d :	0,693	m
w :	6,860	kN/m/m
v :	0,200	
M _p :	1,000E+15	kNm/m
N _p :	1,000E+15	kN/m
Rayleigh α :	0,000	
Rayleigh β :	0,000	

OK Cancel

➤ Lancée les calculs



✚ Données géotechniques

- Extensions du Métro d'Alger (lot 1) El Harrach Centre – Bab Ezzouar – Aéroport International d'Alger (station université HOUARI BOUMEDIENE)

1/ Profondeurs des facies existantes

Localisation (PK)	Profondeur (m)	Horizon géotechnique	Réponse drainée ou non-drainée	Profondeurs (m)
4+805	0,0 – 42,0	Remblais (Re)	Non-drainée	0,0 – 3,5
		Sables limoneux-argileux (Qs)	Drainée	3,5 – 12,5
		Grès lumachéliques poreux (QM-Gr)	-	12,5 – 16,0
		Argiles marneuses (QM)	Non-drainée	> 16,0

2/ Paramètres géotechniques de calcul - sols

Horizon géotechnique	Remblais (Re)	Sables limoneux-argileux (Qs)	Argiles marseuses (QM)
Poids vol. γ (kN/m ³)	20,0	21,0	21,0
Cohésion non-drainée s_u (kPa)	30,0	-	$s_u = 2,9(z-15) + 149$
Module de déformabilité non-drainé E_u (MPa)	12,0	-	$E_u = 1,8(z-15) + 89,5$
Angle de frottement effectif ϕ'	20°	30°	22°
Cohésion effective c' (kPa)	0	10	35,0
Module de déformabilité drainé E' (MPa)	10,0	50,0	120
Coefficient K_0	0,5	0,5	0,6

3/ Paramètres géotechniques de calcul - roche

Horizon géotechnique	Grès lumachéliques poreux (QM-Gr)
Poids spécifique γ (kN/m ³)	23,0
Angle de frottement ϕ	40°
Cohésion c (kPa)	40,0
Module de déformabilité E (MPa)	100,0

✚ Données structurales

- Extensions du Métro d'Alger (lot 1) El Harrach Centre – Bab Ezzouar – Aéroport International d'Alger (station université HOUARI BOUMEDIENE)

1/ Caractéristiques par mètre de développement des éléments du type « plate » considérés pour simuler les structures de blindage

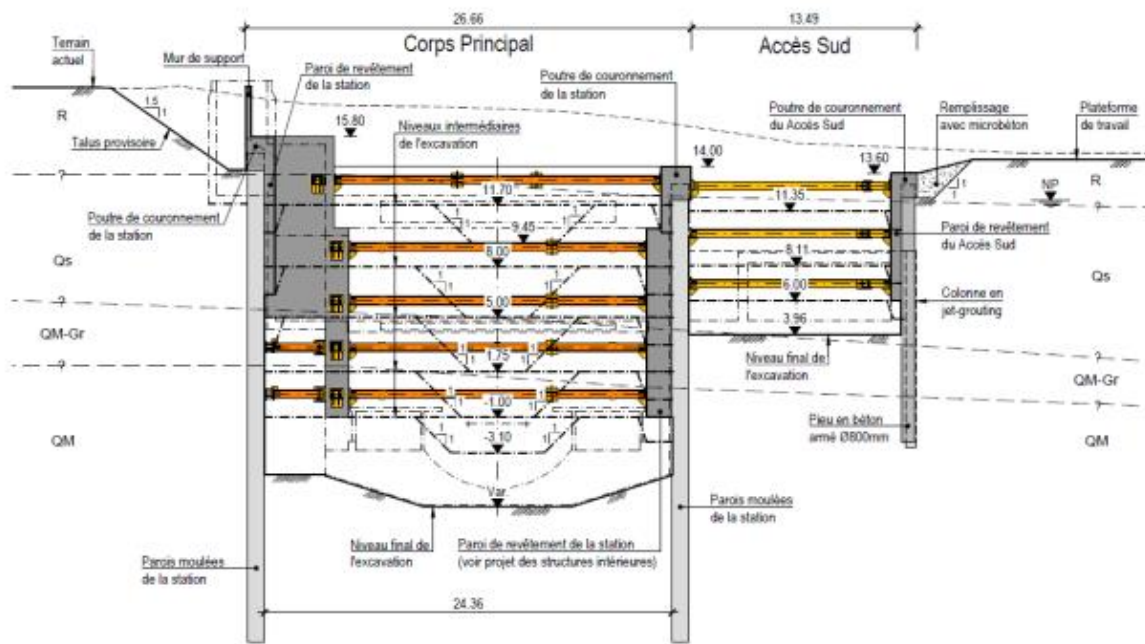
Élément structurel	EA (kN/m)	EI (kN.m ² /m)	hequivalent (m)	Poids (kN/m/m)	v
Parois moulées (e=1,00 m)	33x10 ⁶	2,75x10 ⁶	1,00	14,45	0,2
Parois moulées (e=1,00 m) + paroi de revêtement (e=0,50 m)	49,50x10 ⁶	9,28 x10 ⁶	1,50	16,13	
Parois moulées (e=1,00 m) + paroi de revêtement (e=1,40 m)	79,20x10 ⁶	38,02x10 ⁶	2,40	34,80	
Dalle supérieure de la station (section de calcul 1) (*)	33,97x10 ⁶	7,54x10 ⁶	1,63	25,73	
Dalle supérieure de la station (section de calcul 2) (*)	48,33x10 ⁶	20,14x10 ⁶	2,24	36,62	
Dalles intermédiaire de (*)	18,78x10 ⁶	899,3x10 ³	0,76	14,23	
Rideaux de pieux $\phi 800/1,10$	15,08x10 ⁶	603,2x10 ³	0,69	6,86	
Dalle supérieure des accès (e=0,60 m)	19,80x10 ⁶	594,0x10 ³	0,60	15,00	
Dalle inférieure des accès (e=0,70 m)	23,10x10 ⁶	943,2x10 ³	0,70	17,50	
Parois des accès (e=0,60 m)	19,80x10 ⁶	594,0x10 ³	0,60	15,00	
Rideaux de pieux $\phi 800/1,10$ + Parois des accès (e=0,60 m)	34,88x10 ⁶	4,79x10 ⁶	1,28	15,00	

(*) Plancher allégé en béton (géométrie définie dans le projet des structures intérieures)

3/ Caractéristiques des éléments type « node-to-node anchor » considérés pour simuler les niveaux de boutonnage matérialisés par des profils métalliques

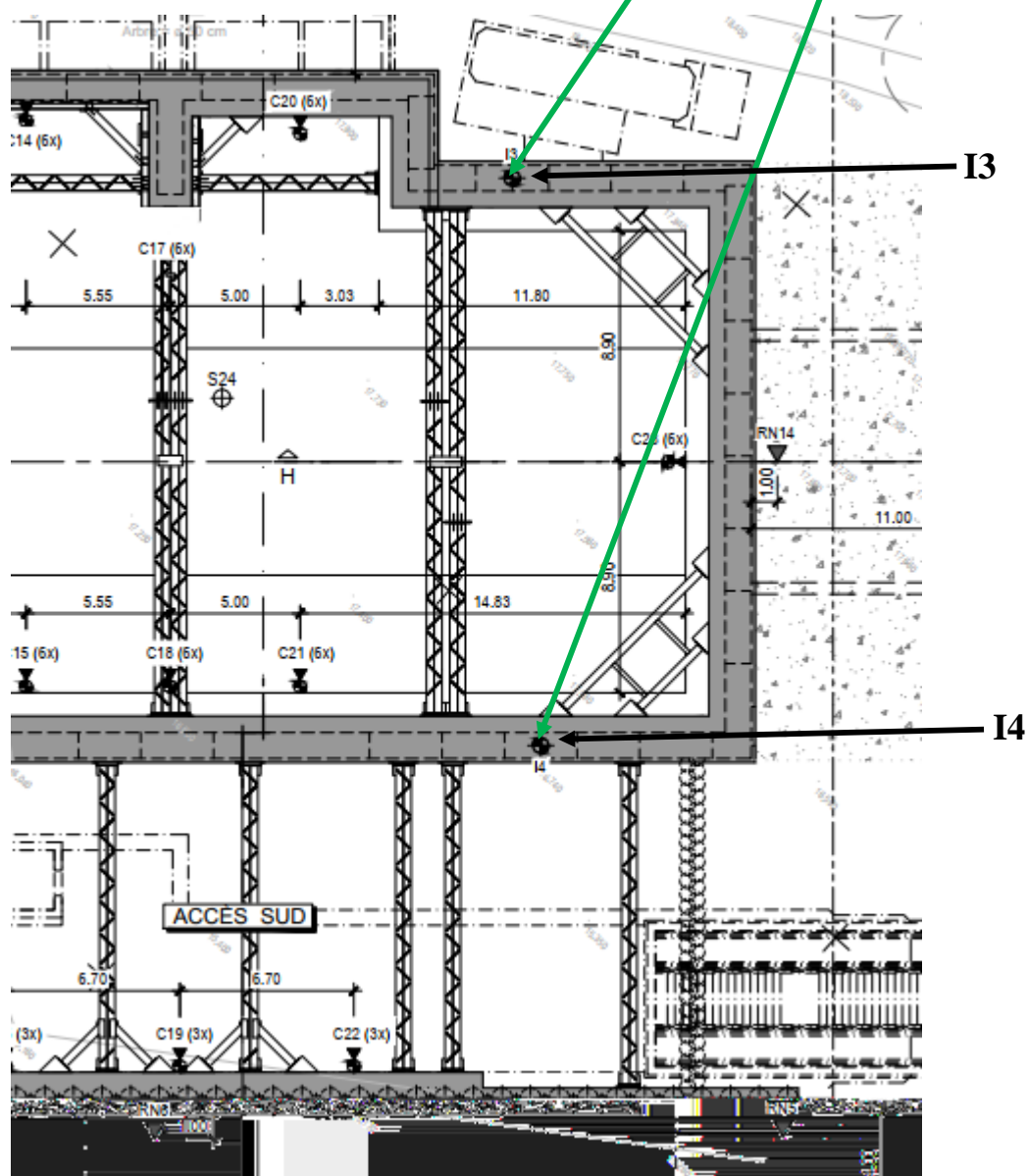
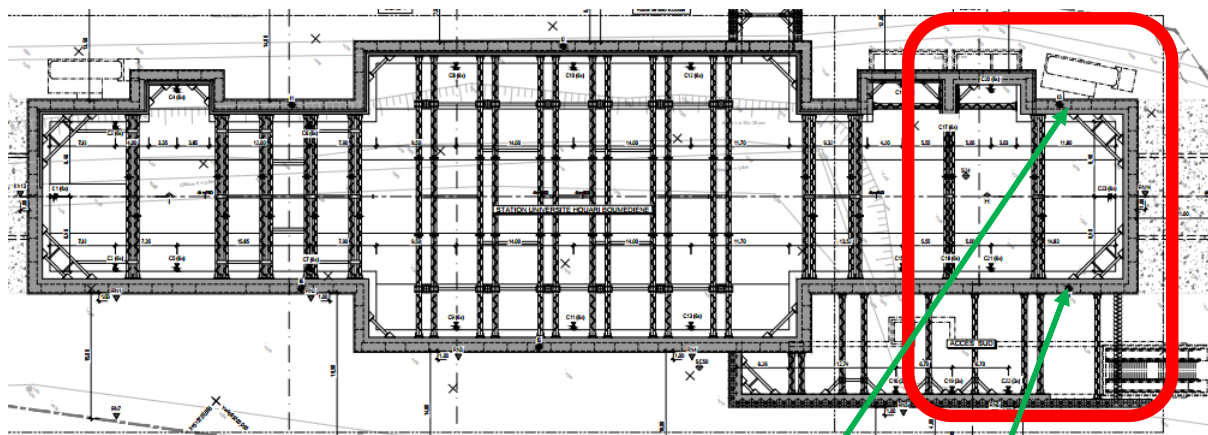
Élément structurel	80% EA (kN)	Éloignement (m)
2HEB500	7,648x10 ⁶	Variable pour chaque cas
2x2HEB500	15,300x10 ⁶	Variable pour chaque cas

3/ Schéma avec les différents niveaux d'excavation préconisés pour le corps principal et l'accès Sud de la Station université Houari Boumediene





Plan des positions inclinométrique



Projet: Harrach Centre-Aeroport

Deformation

Messpegel: M28-USTHB-S54
Série de mesure: USTHB-S54-61 de 14/02/2019
Série-de-mesure-de-référence: USTHB-S54-00 de 28/01/2018

Pas m	Prof. m	A cm	A Ref cm	A Diff cm	SUM A cm	SUM A Ref cm	SUM A Diff cm	B cm	B Ref cm	B Diff cm	SUM B cm	SUM B Ref cm	SUM B Diff cm	AB vitesse mm/d
0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	-6,01	-5,87	-0,13	0,00	0,00	0,00	6,98	6,95	0,03	0,0
0,50	-0,500	1,05	1,07	-0,02	-7,06	-6,94	-0,12	-0,63	-0,60	-0,03	7,61	7,55	0,06	0,0
1,00	-1,000	0,72	0,74	-0,01	-7,78	-7,68	-0,10	-0,39	-0,40	0,00	8,00	7,95	0,05	0,0
1,50	-1,500	0,42	0,43	-0,01	-8,20	-8,11	-0,09	0,08	0,08	0,01	7,92	7,87	0,04	0,0
2,00	-2,000	0,27	0,28	-0,01	-8,47	-8,39	-0,08	0,60	0,58	0,03	7,32	7,30	0,02	0,0
2,50	-2,500	0,13	0,13	-0,01	-8,60	-8,53	-0,07	0,96	0,95	0,01	6,35	6,35	0,00	0,0
3,00	-3,000	-0,04	-0,02	-0,02	-8,56	-8,51	-0,05	1,05	1,10	-0,05	5,30	5,25	0,05	0,0
3,50	-3,499	-0,09	-0,08	-0,01	-8,47	-8,43	-0,04	1,16	1,20	-0,04	4,15	4,05	0,10	0,0
4,00	-3,999	-0,16	-0,14	-0,02	-8,31	-8,29	-0,02	0,94	0,96	-0,03	3,21	3,08	0,12	0,0
4,50	-4,499	-0,18	-0,17	-0,01	-8,14	-8,12	-0,02	0,54	0,58	-0,04	2,67	2,50	0,17	0,0
5,00	-4,999	-0,16	-0,15	0,00	-7,98	-7,97	-0,01	0,13	0,20	-0,07	2,54	2,30	0,24	0,0
5,50	-5,499	-0,16	-0,15	-0,01	-7,82	-7,82	0,00	-0,39	-0,30	-0,09	2,93	2,60	0,33	0,0
6,00	-5,999	-0,19	-0,18	-0,01	-7,63	-7,63	0,01	-0,80	-0,76	-0,04	3,73	3,36	0,37	0,0
6,50	-6,499	-0,19	-0,16	-0,03	-7,43	-7,47	0,04	-1,31	-1,21	-0,10	5,04	4,57	0,47	0,0
7,00	-6,999	-0,23	-0,21	-0,02	-7,21	-7,26	0,06	-1,45	-1,41	-0,04	6,49	5,98	0,51	0,0
7,50	-7,499	-0,36	-0,30	-0,06	-6,85	-6,96	0,11	-1,37	-1,41	0,05	7,85	7,39	0,46	0,0
8,00	-7,998	-0,52	-0,47	-0,05	-6,33	-6,48	0,16	-1,11	-1,18	0,07	8,96	8,57	0,38	0,0
8,50	-8,498	-0,63	-0,60	-0,03	-5,70	-5,88	0,19	-0,83	-0,90	0,08	9,78	9,48	0,30	0,0
9,00	-8,998	-0,65	-0,65	0,01	-5,05	-5,23	0,18	-0,59	-0,67	0,08	10,37	10,15	0,22	0,0
9,50	-9,498	-0,55	-0,53	-0,01	-4,51	-4,70	0,19	-0,29	-0,34	0,05	10,66	10,49	0,17	0,0
10,00	-9,998	-0,50	-0,49	-0,01	-4,01	-4,21	0,20	-0,22	-0,25	0,03	10,88	10,74	0,14	0,0
10,50	-10,498	-0,46	-0,45	-0,01	-3,55	-3,75	0,20	-0,15	-0,16	0,01	11,03	10,90	0,13	0,0
11,00	-10,998	-0,39	-0,39	0,00	-3,16	-3,36	0,20	-0,07	-0,09	0,02	11,11	10,99	0,12	0,0
11,50	-11,498	-0,29	-0,30	0,01	-2,87	-3,06	0,20	-0,12	-0,09	-0,03	11,23	11,08	0,15	0,0
12,00	-11,998	-0,24	-0,19	-0,05	-2,63	-2,87	0,25	-0,33	-0,22	-0,11	11,56	11,29	0,26	0,0
12,50	-12,498	-0,14	-0,19	0,05	-2,49	-2,68	0,19	-0,63	-0,59	-0,04	12,18	11,88	0,30	0,0
13,00	-12,998	0,13	0,05	0,07	-2,62	-2,73	0,12	-0,70	-0,70	0,00	12,88	12,58	0,30	0,0
13,50	-13,498	0,39	0,33	0,06	-3,00	-3,06	0,06	-0,60	-0,65	0,05	13,48	13,23	0,25	0,0
14,00	-13,998	0,63	0,57	0,05	-3,63	-3,63	0,00	-0,37	-0,47	0,10	13,84	13,69	0,15	0,0
14,50	-14,498	0,83	0,78	0,04	-4,46	-4,41	-0,04	-0,16	-0,23	0,07	14,00	13,92	0,08	0,0
15,00	-14,998	0,97	0,93	0,04	-5,43	-5,34	-0,08	-0,01	-0,08	0,07	14,01	14,00	0,01	0,0
15,50	-15,498	0,92	1,05	-0,14	-6,34	-6,40	0,06	0,17	0,14	0,04	13,84	13,87	-0,03	0,0
16,00	-15,998	0,58	0,77	-0,18	-6,93	-7,17	0,24	0,31	0,25	0,06	13,53	13,62	-0,09	0,0
16,50	-16,498	0,24	0,41	-0,17	-7,16	-7,58	0,41	0,49	0,42	0,07	13,05	13,20	-0,16	0,0
17,00	-16,998	-0,08	0,09	-0,17	-7,08	-7,66	0,58	0,67	0,61	0,06	12,38	12,59	-0,22	0,0
17,50	-17,497	-0,36	-0,20	-0,16	-6,72	-7,47	0,75	0,83	0,75	0,07	11,55	11,84	-0,29	0,0
18,00	-17,997	-0,64	-0,51	-0,14	-6,08	-6,96	0,88	0,96	0,92	0,04	10,59	10,92	-0,33	0,0
18,50	-18,497	-0,80	-0,73	-0,06	-5,28	-6,23	0,95	0,99	0,98	0,01	9,60	9,95	-0,35	0,0
19,00	-18,997	-0,87	-0,82	-0,05	-4,41	-5,41	1,00	0,94	0,97	-0,03	8,67	8,98	-0,31	0,0
19,50	-19,497	-0,93	-0,89	-0,04	-3,49	-4,52	1,03	0,92	0,94	-0,02	7,75	8,05	-0,30	0,0
20,00	-19,997	-0,96	-0,96	0,00	-2,53	-3,55	1,03	0,87	0,90	-0,04	6,89	7,15	-0,26	0,0
20,50	-20,497	-0,92	-0,97	0,05	-1,61	-2,58	0,98	0,74	0,83	-0,09	6,15	6,32	-0,17	0,0
21,00	-20,996	-0,81	-0,93	0,13	-0,80	-1,65	0,85	0,55	0,63	-0,08	5,60	5,68	-0,08	0,0
21,50	-21,496	-0,46	-0,60	0,14	-0,35	-1,05	0,71	0,29	0,41	-0,13	5,31	5,27	0,05	0,0
22,00	-21,996	-0,34	-0,43	0,09	-0,01	-0,62	0,62	0,07	0,16	-0,10	5,25	5,11	0,14	0,0
22,50	-22,496	-0,19	-0,29	0,09	0,19	-0,33	0,52	-0,03	0,00	-0,03	5,28	5,11	0,17	0,0
23,00	-22,996	-0,07	-0,16	0,09	0,26	-0,17	0,43	-0,06	-0,04	-0,02	5,34	5,15	0,19	0,0
23,50	-23,496	0,01	-0,03	0,04	0,25	-0,14	0,39	-0,10	-0,08	-0,02	5,44	5,22	0,22	0,0
24,00	-23,996	0,03	0,00	0,02	0,23	-0,14	0,37	-0,12	-0,17	0,05	5,56	5,39	0,17	0,0
24,50	-24,496	-0,11	-0,08	-0,02	0,33	-0,06	0,39	0,06	-0,01	0,07	5,51	5,40	0,10	0,0
25,00	-24,996	-0,05	-0,11	0,05	0,38	0,05	0,34	0,16	0,15	0,01	5,35	5,26	0,09	0,0
25,50	-25,496	-0,04	-0,06	0,01	0,43	0,10	0,32	0,16	0,14	0,01	5,19	5,11	0,08	0,0
26,00	-25,996	-0,10	-0,10	0,00	0,52	0,20	0,32	0,18	0,17	0,01	5,01	4,94	0,07	0,0
26,50	-26,496	-0,11	-0,14	0,03	0,63	0,34	0,29	0,22	0,18	0,03	4,80	4,76	0,03	0,0
27,00	-26,996	-0,08	-0,10	0,02	0,72	0,44	0,27	0,30	0,28	0,01	4,50	4,48	0,02	0,0
27,50	-27,496	-0,07	-0,10	0,04	0,78	0,55	0,23	0,27	0,26	0,01	4,23	4,21	0,02	0,0
28,00	-27,996	-0,03	-0,07	0,04	0,81	0,61	0,19	0,26	0,26	0,00	3,97	3,96	0,02	0,0
28,50	-28,496	0,04	0,02	0,02	0,77	0,59	0,18	0,29	0,29	0,00	3,69	3,67	0,01	0,0
29,00	-28,996	0,06	0,04	0,02	0,72	0,56	0,16	0,36	0,34	0,02	3,32	3,33	-0,01	0,0
29,50	-29,496	0,08	0,06	0,02	0,64	0,50	0,14	0,47	0,44	0,02	2,86	2,89	-0,04	0,0
30,00	-29,996	0,09	0,09	0,00	0,55	0,41	0,14	0,50	0,54	-0,03	2,35	2,35	0,00	0,0
30,50	-30,496	0,06	0,05	0,01	0,49	0,37	0,12	0,34	0,37	-0,03	2,02	1,99	0,03	0,0
31,00	-30,996	0,07	0,06	0,01	0,43	0,31	0,11	0,35	0,32	0,03	1,67	1,66	0,00	0,0
31,50	-31,496	0,08	0,06	0,02	0,35	0,25	0,09	0,39	0,39	0,00	1,28	1,28	0,00	0,0
32,00	-31,996	0,11	0,08	0,03	0,23	0,17	0,07	0,43	0,43	0,00	0,85	0,85	0,00	0,0
32,50	-32,496	0,12	0,08	0,03	0,12	0,08	0,03	0,43	0,43	0,00	0,43	0,42	0,00	0,0

Résumé :

En raison des changements qui ont eu lieu dans les villes et capitales des pays du monde, dont l'Algérie, qui souffre de la congestion du trafic, on s'est mis en face du problème de transport, ce qui nous a obligé à établir et élargir un réseau pour les stations de métro et en parallèle assurer la sécurité des chantiers de réalisation et des constructions qui lui sont proches. La paroi moulée est l'ouvrage le plus utilisé actuellement pour atteindre ce but.

Parmi ces stations se trouve la station Houari Boumediene, que nous avons choisis pour étude au moyen du logiciel de calcul Plaxis 2D, et dont nous avons étudié la déformation du mur de soutènement lors de l'excavation de station, sur la base des données paramétriques géotechniques et données structurales que nous avons obtenues.

Les résultats obtenus comparés aux résultats inclinométriques réelles, nous permettent de poursuivre l'étude par tout ce qui s'y rapporte (pré-dimensionnement, ferrailage, boutonnage,.....)

Mots-Clefs :

Paroi moulée, cohésion, déplacement, excavation.

Abstract:

Due to the changes that have taken place in the cities and capitals of the world, including Algeria, which suffers from traffic congestion, we are faced with the problem of transport, which has forced us to establish and expand a network for the metro stations and in parallel ensure the safety of the construction sites and buildings near it. The diaphragm wall is the most used structure to achieve this goal.

Among these stations is the Houari Boumediene station, which we have chosen for study by means of the calculation software Plaxis 2D, and of which we have studied the deformation of the retaining wall during the excavation of the station, on the basis of the geotechnical parametric data and structural data that we have obtained.

The results obtained compared to the real inclinometric results; allow us to continue the study with everything related to it (pre-dimensioning, reinforcement, buttoning,)

Key-Words:

Diaphragm wall, cohesion, displacement, excavation.

ملخص:

بسبب التغيرات التي طرأت على مدن وعواصم دول العالم ومنها الجزائر التي تعاني من الازدحام المروري، اضطرت الجهات الوصية لإنشاء مشروع شبكة لمحطة المترو.

من بين هذه المحطات محطة هواري بومدين (الجزائر العاصمة)، والتي قمنا بدراستها في هذا البحث بواسطة كود الحساب Plaxis 2D ، وتطرقنا خلالها لتشوه جدار الحجاب الحاجز أثناء عملية حفر المحطة ، على أساس البيانات و المعلومات الجيوتقنية المتحصل عليها من طرف شركة الإنجاز .

بناء على النتائج التي توصلنا إليها رقمياً مقارنة بنتائج سلوك الميل الفعلية ، تمكنا من دراسة كل ما يتعلق بـ : تحديد الأبعاد ، التسليح ، الدعامات التي تستعمل أثناء الحفر ،إلخ.....

الكلمات المفتاحية:

جدار الحجاب الحاجز ، معامل التماسك ؛ التشوه ، سلوك الميل .