

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**

**Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique**



**Université Kasdi Merbah Ouargla**



**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**

**Département de génie civil et hydraulique**

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de  
Master, Filière: Travaux publics**

**Spécialité : VOIES ET OUVRAGES D'ART (V.O.A)**

**Thème**

**Etude et modélisation d'une paroi de soutènement (étude de  
cas de l'excavation de la station de métro d'Alger)**

**Présenté par :**

- ❖ Zidouri Imad Eddine
- ❖ Dendougui brahim el khalil

**Soumis au jury composé de :**

Djoughri Mohamed	MCA	UKMO	Président
Lokmane abdeldjouad	MAB	UKMO	Examineur
Hacini Slimane	MAA	UKMO	Encadreur

Année Universitaire: 2021 / 2022

## Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*Nous remercions notre Encadreur Mr : hacini slimane pour ses conseils, ses orientations et pour ses aides durant la réalisation de ce modeste travail.*

*Nous remercions les membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail.*

*Nous remercions aussi tous les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin.*

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mes très chers parents que dieu les protège contre tout mal, qui m'ont escorté durant les moments les plus pénibles de ce long chemin.*

*A Ma sœur: soumia*

*A mes frères : soufiane - zakaria - selimane*

*A toute ma famille.*

*A mon binôme : Zidouri Imad Eddine*

*A tous mes amis : khaled.s - youcef. h - walid.l*

*Et mes collègues surtout : mohammed .t -ibrahim.b-  
lamine.k - zakaria ahmed .c*

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mes très chers parents que dieu les protège contre tout mal, qui m'ont escorté durant les moments les plus pénibles de ce long chemin.*

*A Ma sœur: ritaj*

*A mes frères : abed razzak - abedelkader*

*A toute ma famille.*

*A mon binôme : dendougui brahim el khalil*

*A tous mes amis : youcef.b - ismael. b - riyad.m*

*Et mes collègues surtout : mohammed .t -ibrahim.b-  
lamine.k - zakaria ahmed .c*

**Résumé:**

Le développement des grands centres urbains nécessite de nos jours la maîtrise des études et réalisation des ouvrages géotechniques nécessaires à la sécurité des chantiers de réalisation et des constructions qui leurs sont proches. La paroi moulée est l'ouvrage le plus utilisé actuellement pour atteindre ce but.

Le présent travail s'intéresse à l'étude de cas de l'excavation de la station de métro d'Alger. Dans le projet El Harrach centre – bab Ezzouar – Aéroport international Nous étudions spécifiquement les chargements et les déformations que se précuisent sur les parois moulées pendant l'excavation.

La modélisation numérique est réalisée à l'aide du code d'éléments finis Plaxis.

**Mots clé :** excavation, station de métro, parois moulée, paramètre géotechnique, éléments finis.

**ملخص :**

يتطلب تطوير المراكز الحضرية الكبيرة في الوقت الحاضر التمكن من الدراسات وإنجاز الأعمال الجيوتقنية اللازمة لسلامة مواقع البناء والمنشآت القريبة منها. يعتبر جدار الحاجز هو الهيكل الأكثر استخدامًا حاليًا لتحقيق هذا الهدف. في إطار نيل شهادة الماستر تخصص طرق ومنشآت فنية اهتمنا بدراسة جدران الحاجز لدعم محطة مترو الجزائر العاصمة يركز هذا العمل على دراسة حالة الجدران الحاجزة محطة مترو الجزائر في مشروع مركز الحراش - باب الزوار - المطار الدولي .

نقوم بدراسة الأحمال والتشوهات التي تحدث على جدران الحاجز أثناء الحفر من خلال دراسة الأحمال الساكنة يتم تنفيذ النمذجة العددية باستخدام برنامج Plaxis

**الكلمات المفتاحية:** الحفر، محطة المترو، الجدران الحاجزة، المعطيات الجيوتقنية، العناصر المتناهية.

**ABSTRACT:**

The development of large urban centers nowadays requires the mastery of the studies and realization of the geotechnical works necessary for the safety of the construction sites and the constructions, which are close to them. The diaphragm wall is the structure currently most used to achieve this goal.

This work focuses on the case study of the excavation of the Algiers metro station. in the project El harrach center – bab ezzouar – International Airport We specifically study the loads and deformations that occur on the diaphragm walls during excavation .

Numerical modeling is carried out using the finite element code Plaxis.

**Keywords:** excavation, subway, diaphragm walls, geotechnical parameter, finite elements.

---

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : Etude bibliographique sur les différents types de paroi	
I .1. Généralité .....	3
I .2. Différents types de parois moulées .....	3
I .2.1. Paroi d'étanchéité .....	3
I .2.2. Paroi de soutènement simple .....	4
1.2.3 Les parois moulées classiques .....	6
1.2.3.1.la paroi de tranchée couverte .....	6
1.2.3.2 Les "jambes de pantalon" .....	7
I .2.4. Les parois caissons .....	7
I .2.5 Les parois préfabriquées .....	8
I.3 Technique de réalisation des parois moulées .....	11
I.3.1 Introduction .....	11
I.3.2 Méthode d'exécution de la paroi moulée .....	12
I.3.2.1 Perforation .....	12
I.3.2.2 Méthodes de forage .....	13
I.3.2.3 Les cages d'armatures .....	14
I.3.2.4 Le béton et le bétonnage .....	14
I.3.2.5 Les joints entre panneaux .....	15
I .4. Interaction sol-soutènement .....	17
1.4.1 point de vue de la structure et point de vue du sol .....	18
I.4.2 Mouvement du sol autour d'une excavation .....	18
I.5 Conclusion .....	19
Chapitre II : présentation de l'ouvrage	
II .1. Introduction .....	20
II .2. Présentation de l'extension El Harrach Centre – Bab Ezzouar – Aéroport International d'Alger Houari Boumediene .....	21
II .3. Présentation de la station de Hacén Badi (encadrement et contraintes géologiques, géotechniques et hydrologiques) .....	22
Chapitre III : Méthode d'excavation	
III.1. Description des solutions adoptées .....	27

---

III .1.1. Considerations generales .....	27
III .1.2. Excavation à ciel ouvert .....	28
III .2. Actions et combinaisons applicables .....	33
III 2.1. Les actions et leurs effets .....	33
III .2.2 Combinaisons pour les états limites ultimes (elu) de résistance .....	34
III .2.3. Etats limites de service (els) .....	36
III .2.4. utilisation de modeles d'interaction sol/structure .....	36
III .3. Matériaux.....	36
III .3.1 Béton .....	36
III .3.2 Acier .....	36
III .3.3 JET-GROUTING .....	37
III .4. Analyse de la stabilite du fond de l'excavation : .....	37
<b>chapitre IV: Présentation du logiciel plaxis</b>	
IV.1. Introduction .....	39
IV.2. La méthode des éléments finis .....	39
IV.3. Code de calcul Plaxis .....	40
IV.4. Options par défaut et solutions approchées .....	40
IV.5. les sous-programmes de plaxis .....	41
IV.6. etapes de modélisation avec plaxis .....	43
IV.7. lois de comportement dans plaxis .....	46
IV.7.1. modèle élastique linéaire .....	46
IV.7.2. Modèle de Mohr-Coulomb .....	47
IV.8. Conclusion .....	50
<b>Chapitre V: Modélisation numérique</b>	
V .1. Introduction .....	51
V .2. Modélisation .....	51
V.3. Les phases d excavation .....	55
V.4. Les résultats .....	56
V.4.1 Avant l excavation .....	57
V.4.2. pendant l'excavation .....	58
V.4.2.1. Phase 01 .....	59

---

V.4.2.2.Phase 02 .....	59
V.4.2.3.Phase 03 .....	60
V.4.2.4.Phase 04 .....	60
V.4.2.5.Phase 05 .....	61
V.4.2.6.Phase 06 .....	61
V.4.2.7.Phase 07 .....	62
V.4.2.8.Phase 08 .....	62
V.4.2.9.Phase 09 .....	63
V.5. Conclusion .....	65
Conclusion générale.....	66
Références Bibliographiques .....	67



## Liste des tableaux et figures

### 1- Liste des tableaux :

	Intitulé	
N <sup>o</sup> Tableau	<b>Chapitre II : présentation de l'ouvrage</b>	N <sup>o</sup> page
Tableau II .1	Résumé des profondeurs des horizons géotechniques existantes	24
Tableau II .2	Paramètres géotechniques de calcul considérés	26
	<b>chapitre IV : Présentation du logiciel plaxis</b>	
Tableau IV.1	Les paramètres intégrés dans le modèle de Mohr Coulomb.	47
	<b>Chapitre V: modélisation numérique</b>	
Tableau V.1	Paramètres géotechniques de calcul considérés	53
Tableau V.2	les déplacements	58

### 2- Liste des Figures :

	Intitulé	
N <sup>o</sup> Figure	<b>Chapitre I : Etude bibliographique sur les différents types de paroi moulée.</b>	N <sup>o</sup> page
Figure I .1	schéma de principe parois moulée d'étanchéité (présentation du N.N.P.)	3

Figure I .2	Schéma de principe d'une paroi moulée en place avec une nappe de tirants	5
Figure I .3	Schéma montre les parois moulées de tranchée couverte avec planché qui sert à buter les parois	6
Figure I .4	Montre la différence entre paroi moulée jambe de pantalon et paroi simple	7
Figure I .5	Les parois préfabriquées	9
Figure I .6	Préparation de l'assise	10
Figure I .7	Mauvaise disposition des blocs	10
Figure I .8	Le bétonnage	11
Figure I .9	Mise en place des parois préfabriqués	11
Figure I .10	Composition schématique d'un atelier hydrofraise	13
Figure I .11	Schéma de réalisation du panneau	14
Figure I .12	Cage d'armature	14
Figure I .13	Bétonnage	15
Figure I .14	Analyse du comportement d'un écran de soutènement	18
	<b>Chapitre II : présentation de l'ouvrage</b>	
Figure II .1	Extensions du Métro d'Alger El Harrach Centre – Bab Ezzouar – Aéroport International d'Alger	22
Figure II .2	Vue générale de la zone d'implantation de la Station Hacén Badi (Google Maps, date 30/12/2017	23

<b>Chapitre III : méthode d'excavation</b>		
Figure III.1	Exemple d'une hydrofraise	28
Figure III.2	Murettes-guide pour l'exécution des parois moulées. Définition géométrique et exemple	29
Figure III.3	Mode d'exécution des panneaux considéré pour la Station Hacén Badi (situation courante)	30
Figure III.4	Panneaux primaires: Définition géométrique type. Écarteurs en PVC et en béton (dimensions en centimètres)	31
Figure III.5	Solution de blindage et de soutènement des puits d'extrémité de la Station Hacén Badi. Section concernant le puits d'extrémité Ouest	33
Figure III.6	Mécanisme de rupture de la fondation d'une excavation	38
<b>chapitre IV : Présentation du logiciel plaxis</b>		
Figure IV.1	Organigramme des sous-programmes de code Plaxis	41
Figure IV.2	Fenêtre principale du programme d'entrée des données	42
Figure IV.3	Fenêtre de calcul	42
Figure IV.4	Organigramme de modélisation avec PLAXIS	45
Figure IV.5	Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire	46
Figure IV.6	Fenêtre des paramètres du modèle mohr-coulomb	47
Figure IV.7	Courbe enveloppe du modèle de Mohr-Coulomb	48
Figure IV.8	Définition du module à 50 % de la rupture	48
<b>Chapitre V: Modélisation numérique</b>		
Figure V.1	Le maillage	52
Figure V.2	Les couche de sol	53
Figure V.3	Les parois après la phase de prise du béton	54
Figure V.4	Les dimensionnements des parois	54
Figure V.5	L'ouvrage complet	55
Figure V.6	Excavation niv 01	56

Figure V.7	Excavation niv 02	56
Figure V.8	Excavation niv 03	56
Figure V.9	Excavation niv 04	56
Figure V.10	Excavation niv 05	56
Figure V.11	Excavation niv 06	56
Figure V.12	Excavation niv 07	56
Figure V.13	Excavation niv 08	56
Figure V.14	Excavation niv 09	56
Figure V.15	le maillage	57
Figure V.16	Courbe de déformation des parois avant l'excavation	57
Figure V.17	Les Contrainte avant l'excavation	58
Figure V.18	courbe de déplacement phase 01	59
Figure V.19	courbe de déplacement phase 02	59
Figure V.20	courbe de déplacement phase 03	60
Figure V.21	courbe de déplacement phase 04	60
Figure V.22	courbe de déplacement phase 05	61
Figure V.23	courbe de déplacement phase 06	61
Figure V.24	courbe de déplacement phase 07	62
Figure V.25	courbe de déplacement phase 08	62
Figure V.26	courbe de déplacement phase 09	63
Figure V.27	le maillage 3D	63
Figure V.28	Les contrainte dans la phase final	64
Figure V.29	Les courbes de déformations pendant l'excavation	64

## INTRODUCTION GENERALE

Durant les dernières décennies, les problèmes économiques et sécuritaires en Algérie et la recherche d'une vie meilleure ont poussés les gens à se déplacer vers les grandes villes provoquant ainsi une concentration sans précédent de la population dans ces milieux urbains. L'utilisation du sous-sol est devenue alors une nécessité pour palier à la demande croissante en espace constructible. Ceci à engendrer de multiples problèmes liés aux excavations de plus en plus profondes et leurs effets sur les ouvrages adjacents. Le projet du métro et ces excavations vastes et profondes accentue la problématique davantage.

Lors de l'examen de profondes excavations étant prises en charge par parois moulées, il est bien connu qu'il est d'une grande importance de considérer les effets du processus de la construction. La réalisation des excavations profondes dans les zones urbaines suppose l'utilisation des structures de soutènement afin de protéger les constructions existantes avoisinantes. Même si ces structures sont souvent utilisées en génie civil ; le calcul et le dimensionnement ne sont pas simples ; les interactions entre le sol, la paroi et les structures avoisinantes étant importantes, ainsi leur prise en compte étant difficile.

- Pourquoi une paroi moulée ?

Pour le choix des parois moulées, on ne peut pas vraiment parler d'avantage mais de nécessité. 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 de figure 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.

Le présent travail s'intéresse à l'étude de cas de l'excavation de la station de métro d'Alger. dans le projet El Harrach centre – bab Ezzouar – Aéroport international Nous étudions spécifiquement les chargements et les déformation que se précuissent sur les parois moulées pendant l'excavation .

Pour cela, nous avons organisé notre travail sur plusieurs chapitres :

Dans le premier chapitre , nous avons traite les Différents types de parois moulées , Technique de réalisation , Méthode d'exécution et dans le deuxième chapitre nous avons présenté l'ouvrage ( la station de Hacen Badi ).Dans le troisième chapitre on a parlé sur méthode d'excavation , le quatrième chapitre explique La méthode des éléments finis qui fonctionne avec logiciel de plaxis 3d et dans le cinquième et dernier chapitre , qui représente le cœur de notre projet nous l'avons fait la Modélisation numérique et l'interprétation des résultats .

*Chapitre I : Etude  
bibliographique sur les  
différents types de  
paroi moulée*

## I.1. Généralité :

La paroi moulée en béton armé consiste en un voile coulé dans les terres, comme une sorte de pieu continu, ceinturant l'emprise des sous-sols futurs (parking souterrain à plusieurs niveaux par exemple).

Le terrassement se fait ensuite à l'intérieur de l'enceinte ainsi délimitée, pratiquement sans interruption, sauf le temps d'exécuter des tirants d'ancrage à différents niveaux. Aucun étaieement n'encombre le volume de l'excavation pendant les travaux (à part des butons dans les angles : voir plus loin). La paroi moulée permet la réalisation, en site construit dans la nappe phréatique, de terrassements profonds et étendus. Des profondeurs de plus de 20 m sont de pratique courante. Le procédé n'est en principe rentable qu'à partir de deux niveaux de sous-sol.

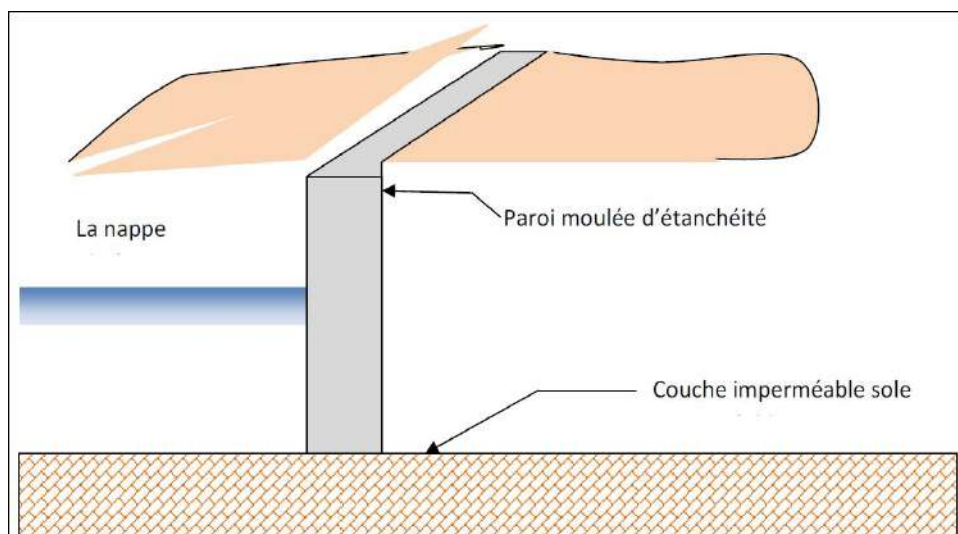
La paroi moulée sert :

- ✓ de fondation : lorsqu'elle est descendue jusqu'aux couches porteuses profondes
- ✓ de soutènement : en maintenant les terres et les surcharges sur la périphérie
- ✓ de paroi étanche : en protégeant de l'eau extérieure le volume enclos ; sa base est ancrée dans les couches imperméables assez profondément pour isoler de la nappe la plate-forme inférieure du terrassement. De ce fait il y a différents type de parois moulées .

## I.2. Différents types de parois moulées .

### I.2.1. Paroi d'étanchéité :

Destiné à créer une barrière étanche dans l'épaisseur du sol (par exemple pour protéger une nappe), ce type de paroi ne comporte pas de terrassement après son exécution. [01]



**Figure I.1** : schéma de principe parois moulée d'étanchéité (présentation du N.N.P.) .

[01]



N'étant pas armée, la paroi est coulée soit avec un mélange de boue de bentonite et de graviers (épaisseur importante, d'au moins 1,50 m). Soit en béton de ciment plastique à dosage de ciment réduit, introduit au tube plongeur sous boue de bentonite (épaisseur variable de quelques centimètres à une soixantaine, suivant le dosage) ; soit avec un mélange de bentonite, de ciment et d'adjuvants assurant son auto durcissement (épaisseur 50 à 60 cm).

Les parois d'étanchéité à base d'un liant spécial offrent une solution idéale pour maîtriser les fluctuations de la nappe phréatique. Les parois peuvent être placées à la verticale et à l'horizontale. Elles assurent une résistance durable à l'eau. Les applications possibles sont:

- ✓ excavations .
- ✓ digues, tunnels et parkings souterrains .
- ✓ chemins creux .
- ✓ sites pollués .

Mise en oeuvre :

Pour mettre en place une paroi en ciment-bentonite, une tranchée est creusée sans vibrations et de façon insonore, jusqu'à la couche imperméable. Les tranchées jusque 100 m de profondeur sont réalisables. Le mélange à base de liant spécial, d'eau et de terre, assure la stabilité de la tranchée. Après durcissement, il forme une paroi étanche et suffisamment résistante. Pour mettre en place une paroi d'étanchéité par injection de coulis sous pression, le coulis à base d'un liant spécial et d'eau est introduit à la profondeur souhaitée, au moyen d'un tube d'injection. La tête d'injection tournante permet de recouper le sol sous pression de l'injection de coulis. Lors de la remontée de la tête d'injection tournante, une paroi étanche est créée sous forme d'une colonne de terre et de Ciment.

### **I .2.2. Paroi de soutènement simple :**

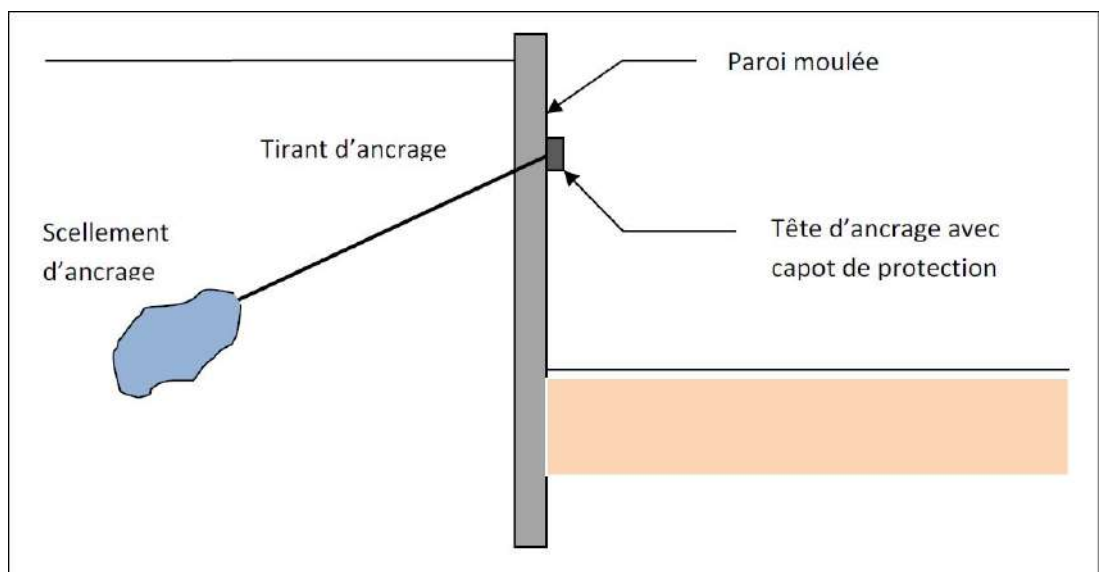
Cas où il n'est pas prévu de construction dans l'excavation après terrassement.

La paroi, en béton armé, est alors maintenue par des tirants d'ancrage permanents, ou par des contreforts, intérieurs ou extérieurs, réalisés par le même procédé que la paroi proprement dite. Le fonctionnement des parois Paroi moulée classique est celui d'une structure chargée par la poussée des terre et de l'eau soutenue et résistant en flexion pour mobiliser des appuis constitués, d'une part, par le sol en face et d'autre part par des tirants ou butons disposés dans la partie libre de l'écran. [01]

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 cette appuis 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 écran très rigide, ancrés en partie supérieur et dont la fiche est courte tandis que pour des écrans ne possédant pas d'appuis en partie supérieur l'encastrement en fiche devra être totale. Dans le cas générale l'écorant se trouve partiellement encastré dans le terrain . [01]

La nature de cette appuis 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 écran très rigide, ancrés en partie supérieur et dont la fiche est courte tandis que pour des écrans ne possédant pas d'appuis en partie supérieur l'encastrement en fiche devra être totale. Dans le cas générale l'écorant se trouve partiellement encastré dans le terrain . [01]

Les appuis en partie supérieur de l'écran sont présents dès que la hauteur libre dépasse environ 5m, de façon à limité les déplacements de renvoyer les efforts d'appuis suffisamment loin en arrière de l'écran, au sein d'une partie stable de massif de sol. il peut également s'agir de butons, dans le cas ou l'effort être renvoyé à une structure faisant face à l'écran (cas des tranchées c ouvert, par exemple) . [01]



**Figure I 2:** Schéma de principe d'une paroi moulée en place avec une nappe de tirants. [01]

La répartition des appuis pour chaque niveau est variable suivant la nature des appuis et l'intensité des efforts à reprendre. L'espacement horizontal est plus important dans le cas des butons que dans celui des tirants . [01]

Domaine d'emplois :

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 proximité de la fouille.

### 1.2.3 Les parois moulées classiques :

À côté de la technique classique déjà décrite, à triple fonction (fondation, soutènement, écran étanche) , on trouve aussi.

#### 1.2.3.1. la paroi de tranchée couverte :

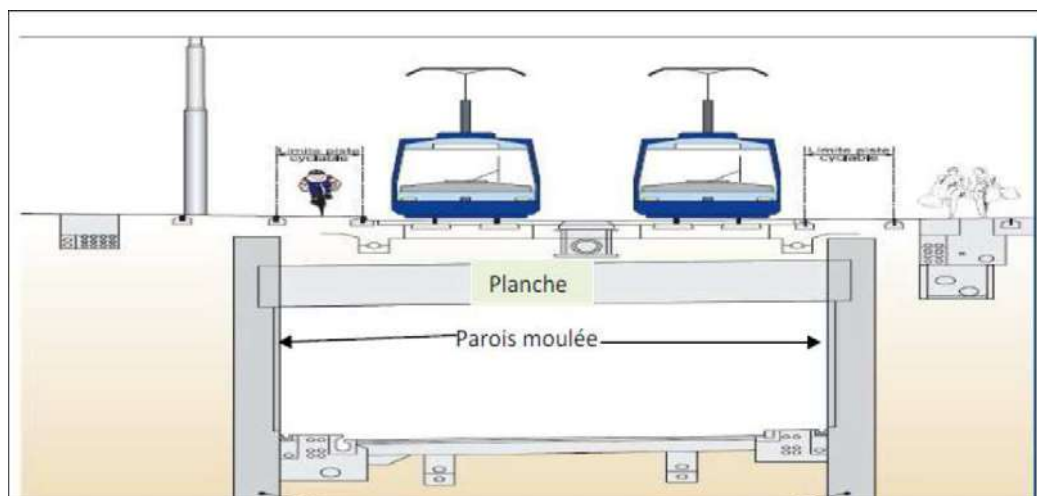
Surtout utilisée en travaux publics pour les voies de circulation : routes, chemins de fer, métro, canaux souterrains, parkings à niveaux multiples.

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. [01]

Le terrassement est ensuite effectué en souterrain, sous ce plancher sur la hauteur du premier soussol. Plusieurs planchers successifs peuvent être coulés au cours du terrassement.

Cette technique a deux avantages :

libération immédiate de la surface pour la circulation au niveau du sol existant suppression des tirants et des butons. [01]



**Figure I .3 :** Schéma montre les parois moulées de tranchée couverte avec planché qui sert à buter les parois. [01]

La méthode de "tranchée couverte" est généralement choisie pour procéder à la réalisation d'un ouvrage dans un environnement urbanisé et sous faible couverture. [01]

**La méthode consiste à créer :**

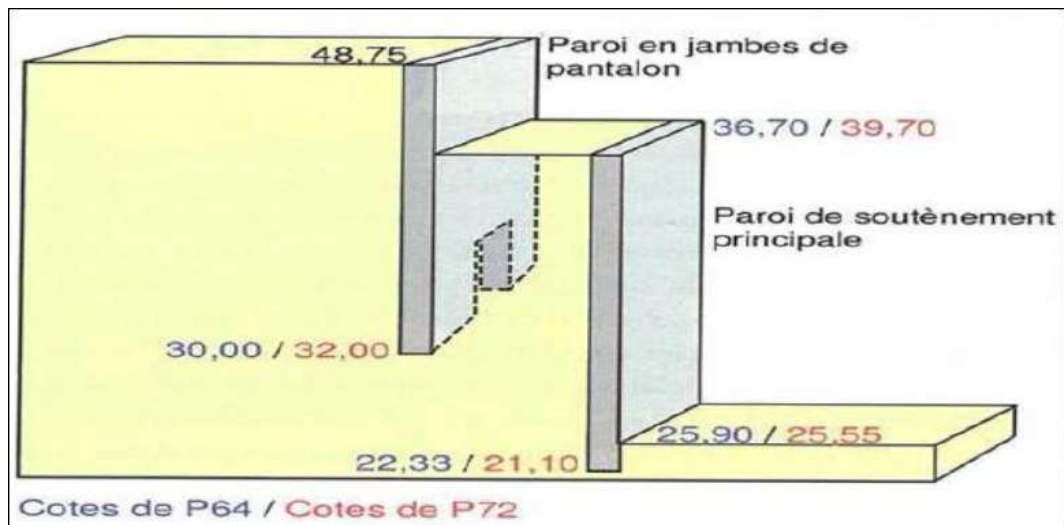
deux murs de soutènements parallèles en parois moulées : parois en béton armé moulées dans le sol ; une dalle de couverture reposant sur ces parois.

**1.2.3.2 Les "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. [01]

On la prolonge seulement sous une partie des panneaux de la paroi. On obtient ainsi une disposition dite "en 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 . [01]



**Figure I .4 :** Montre la différence entre paroi moulée jambe de pantalon et paroi simple. [01]

**I .2.4. Les parois caissons :**

Autre mode d'utilisation de la technique de la paroi moulée, la paroi caisson consiste en une enveloppe, en béton armé, que l'on remplit de béton cyclopéen après avoir retiré les terres contenues à l'intérieur. [01]

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.

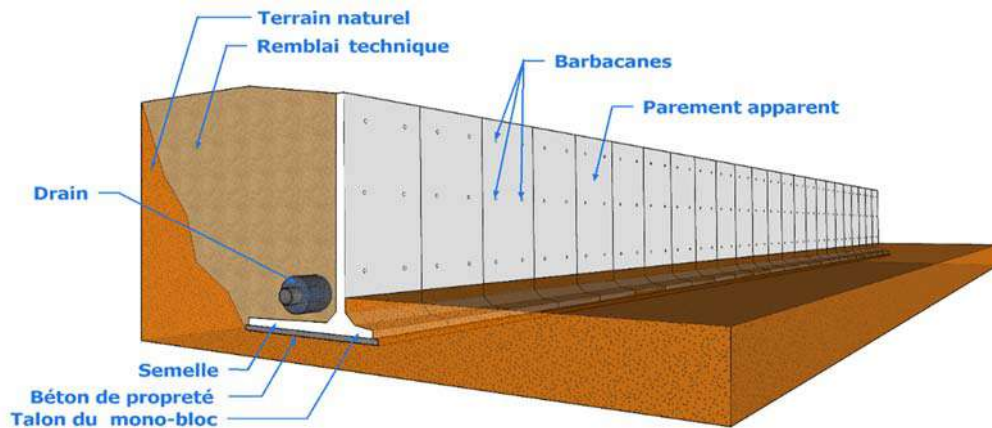
### **I .2.5 Les parois préfabriquées :**

On emploie souvent les éléments préfabriqués pour la réalisation des murs de soutènement. Ces éléments sont confectionnés dans des usines spécialisées. Ils peuvent être faits en béton armé ou non. Ils peuvent prendre différentes formes selon le besoin et le désir du client (caissons, poutrelles, ou parois). [01]

La réalisation de ce type de mur de soutènement présente plusieurs avantages. En effet, son exécution est rapide et très économique car sa réalisation ne nécessite pas beaucoup de matériaux. De plus, les murs en paroi préfabriquée sont bien soignés architecturalement. Néanmoins, sa réalisation exige l'utilisation d'engins lourds et une vaste emprise du chantier.

#### **Matériels et outillages :**

- Engin de levage (Grue par exemple) .
- Étais avec tiré-poussé .
- Engin de compactage .
- Bétonnière .
- Pelle et bêche .
- Connes de balisage .
- Panneau de signalisation .
- Outillage et matériel sécuritaire .

**Terminologie :**

**Figure I .5 :** Les parois préfabriquées. [02]

Un mur de soutènement en paroi préfabriqué comprend :

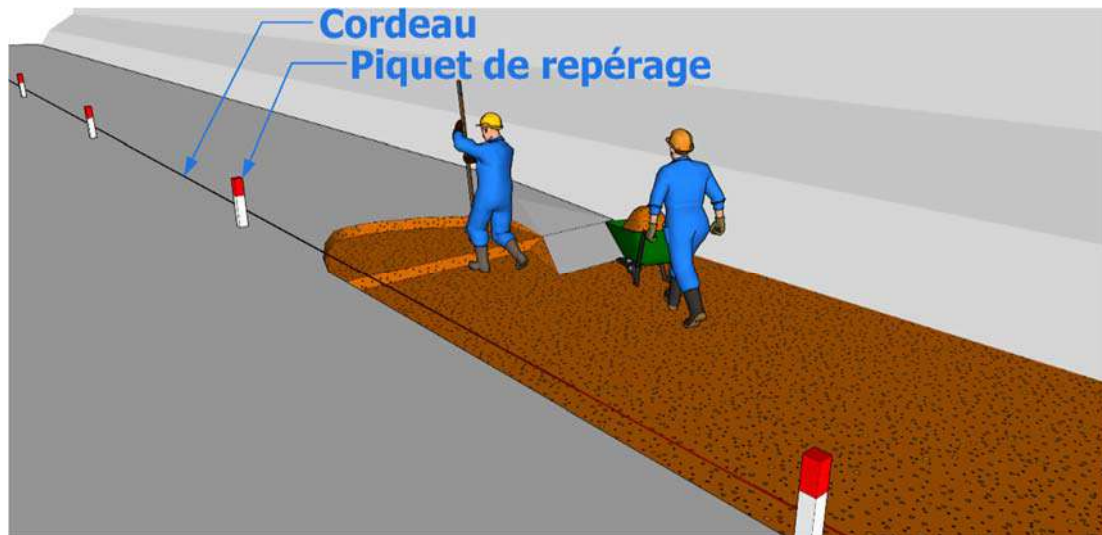
- Les éléments préfabriqués qui sont de diverses formes soit en T renversé comme sur l'image, soit en L. Ils peuvent également prendre la forme de caissons empilés.
- Le béton de propreté (voir le dosage)
- Un système de drainage comprenant généralement des barbacanes, des couches de granulats de finesse (caillou, gravillon, sable) qui recouvriront un buse en béton poreux évacuant les eaux vers un puits ou un système d'évacuation d'eau pluvial.
- Le remblai technique (Les matériaux granulaires recommandés, conformes à la norme NFP 11-300 [11], ou éventuellement aux classes de difficultés de compactage au sens de la norme NFP 98-231.2 [23]) [2]

**Mise en œuvre :**

Préparation de l'assise :

Cette étape consiste à préparer le sol de fondation afin de recevoir le béton de propreté. Elle comprend les tâches comme l'excavation, le nivellement et le déblaiement. Ceux-ci peuvent être effectués manuellement ou à l'aide d'engins adéquats. Elle est très importante dans la mesure où elle permet de délimiter l'emplacement exact de l'ouvrage grâce à l'implantation.

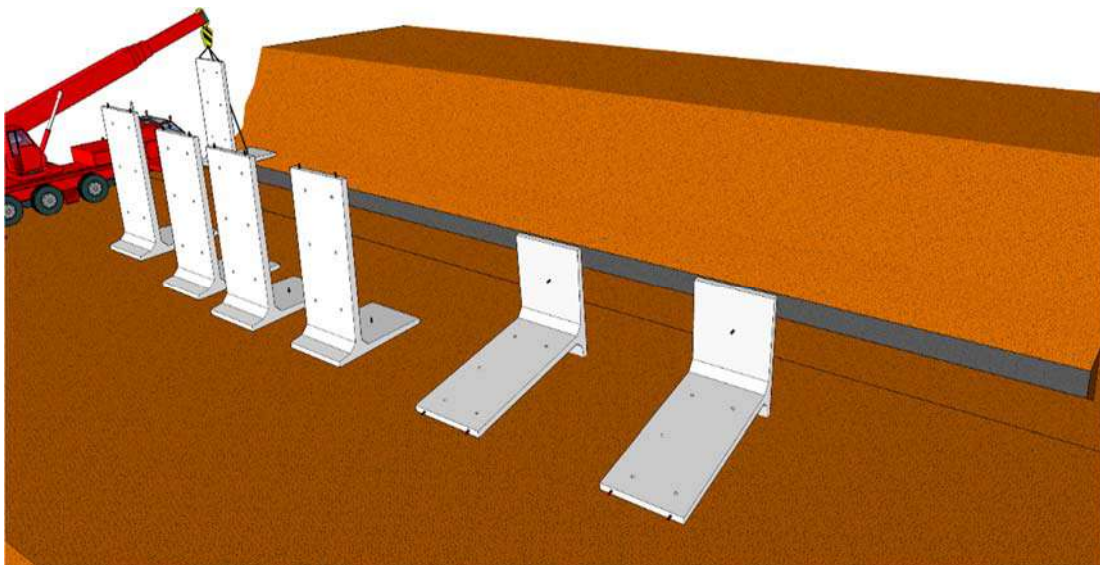
Nous vous invitons à consulter l'article sur la mise en œuvre pour plus de détail. [2]



**Figure I. 6 :** Préparation de l'assise. [02]

Mauvaise disposition des blocs :

Sur l'image la difficulté est le déplacement latéral de l'engin. Il y a également risque de fissure sur les talons des blocs mal positionnés sur le sol. [2]



**Figure I.7 :** Mauvaise disposition des blocs. [02]

Le bétonnage (béton de propreté) :

Une fois que le sol d'assise a été bien nivelé, on passe à l'étape du bétonnage (voir dosage du béton ordinaire). Le béton de propreté assure la propreté mais renforce également la stabilité du terrain ou le sol. Il sera coulé sur une épaisseur variable, selon les recommandations du bureau d'études (10 à 20 cm). [2]

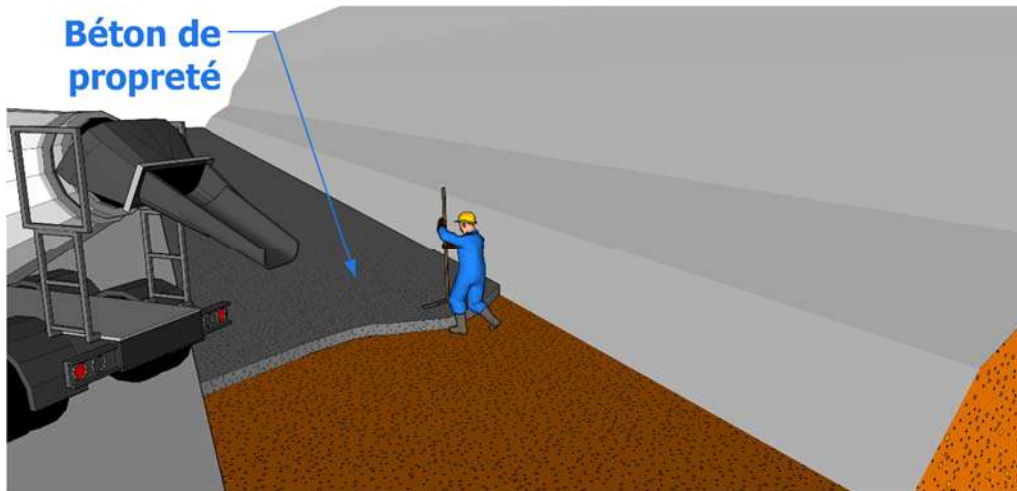


Figure I.8 : Le bétonnage. [02]

Mise en place des parois préfabriqués :

Les parois sont posées directement sur le béton de propreté avec une couche de mortier frais. Elles seront posées à l'aide d'un engin de levage d'où la nécessité de l'intervention d'un professionnel. Il convient aussi de connaître les règles de sécurité en la matière. [2]

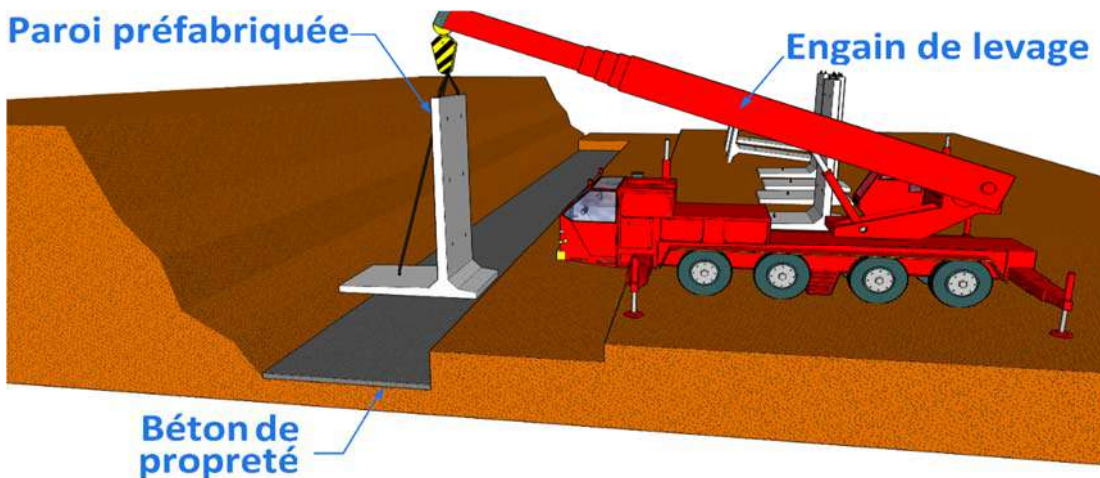


Figure I.9 : Mise en place des parois préfabriqués. [02]

### I.3 Technique de réalisation des parois moulées :

#### I.3.1 Introduction :

Avant d'exécuter la paroi moulée nous sommes confrontés de résoudre le problème de la stabilité de la tranchée lors de l'excavation. En effet, si on exécute sans précaution particulière d'une fouille verticale à grande profondeur, des effondrements de paroi se produisent inévitablement. Le miracle de la paroi moulée c'est que le tranché est stable sans blindage grâce à une simple boue à bentonites on peut facilement après l'achèvement de l'excavation,



remplacer la boue par le béton à l'aide d'un tube plongeur il est ainsi possible de couler un béton en la moule exactement dans :

le volume excavé dans le sol la boue étant récupérée au fur et à mesure de l'introduction du béton . [2]

### **I.3.2 Méthode d'exécution de la paroi moulée :**

Les méthodes d'exécution nécessitent d'être rappelées, car elles sont la cause de nombreux défauts.

#### **I.3.2.1 Perforation :**

Outre la fonction de la boue comme soutènement des parois de l'excavation, les principaux problèmes liés à l'exécution de fouille concernant sa verticalité et la traversée des horizons durs. Le maintien de verticalité est obtenu en réalisant des murettes guide en béton armé, guidant l'engin de perforation qui s'ajuste entre elles durant sa descente dans les sols meubles, l'excavation est traditionnellement réalisée à l'aide d'un outil travaillant en rotation ou en rotoperçusion, en association avec une circulation inverse de la boue permettant la remontée des sédiments ; au besoin un trépan peut être à ce dispositif. L'hydro fraise (ou hydro haveuse). Technique datant de 1975 et constamment améliorée, permet une plus grande précision et le passage des horizons durs épais.

Cette technique est par contre sensible à certains sols et à la présence de gros blocs qui bloquent les tambours de l'engin. Les grandeurs d'outils varient de 0,52m à 1,52m ; dans le génie civil routier, les épaisseurs courantes varient de 0,52m à 0,80m des profondeurs de 35 à 50 m sont atteintes couramment et peuvent exceptionnellement atteindre 100 m avec une hydro fraise.

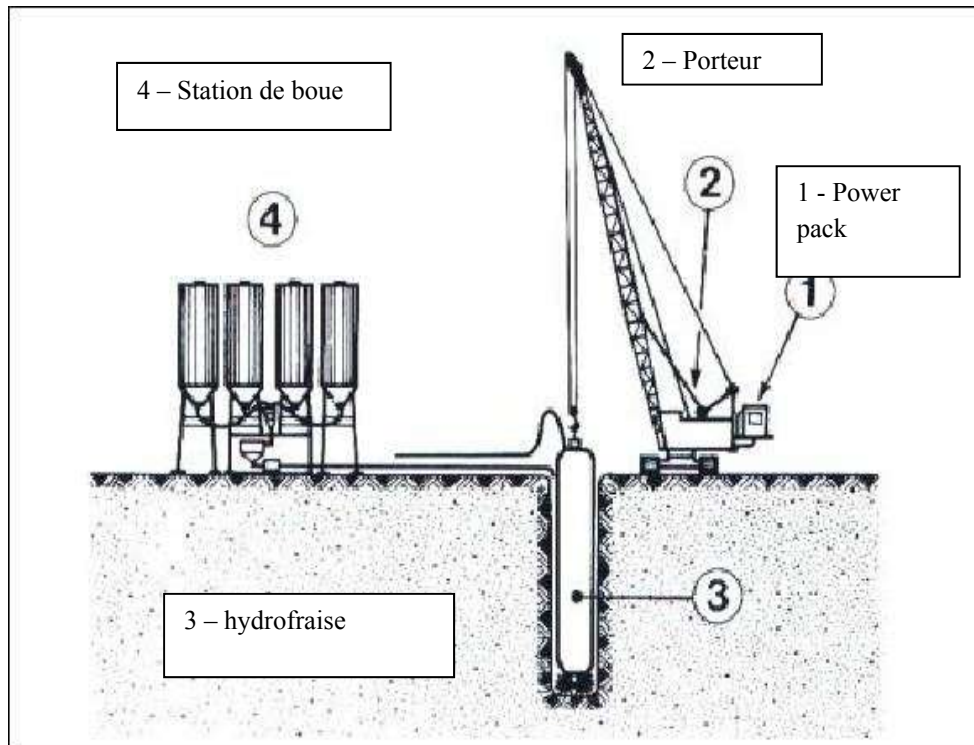
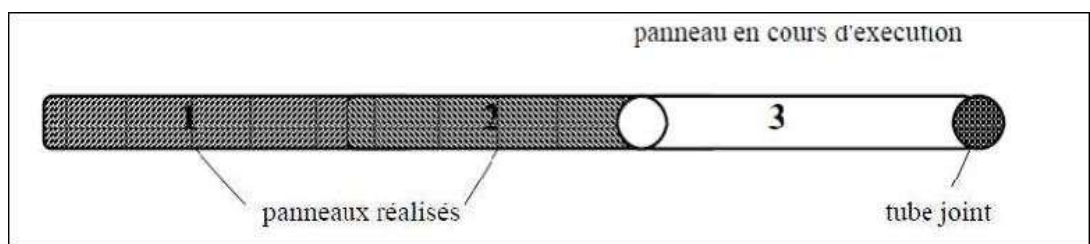


Figure I.10 : Composition schématique d'un atelier hydrofraise. [01]

### I.3.2.2 Méthodes de forage :

Le forage est réalisé par panneaux de longueur limitée, en tenant compte de la cohésion du terrain en place et des contraintes extérieures au voisinage de la paroi (mur mitoyen, surcharges, ...). Il se fait soit en continu ou soit par panneaux alternés (méthode des panneaux primaires et secondaires). [04]

a) Forage en continu:



b) Forage par panneaux alternés:

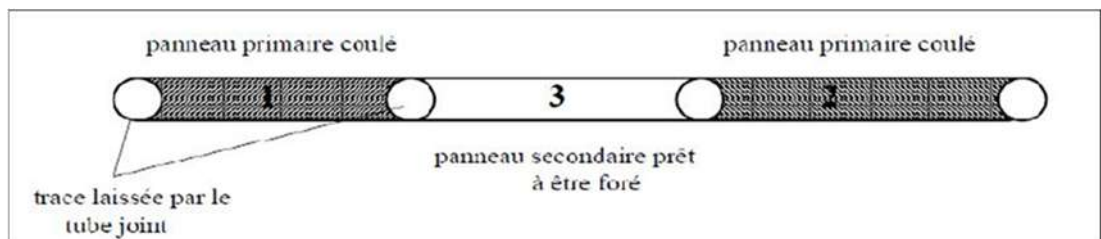


Figure I.11 : Schéma de réalisation du panneau. [01]

Suivant la méthode en continu, un seul tube joint suffit à l'extrémité de chaque panneau foré, tandis que suivant la méthode en alterné, deux tubes joints sont nécessaires dans chaque panneau primaire foré. Le tube joint peut être remplacé par un profilé spécial comportant un dispositif de maintien du joint water-stop . [04]

### I.3.2.3 Les cages d'armatures :

Les cages d'armatures, pour les parois moulées, sont mises en place dans la tranchée pleine de boue, avant le bétonnage. Elles doivent être suffisamment rigides pour ne pas se déformer durant les phases de manutention. L'espacement des aciers doit être suffisant pour que le béton qui arrive puisse être correctement mis en oeuvre (20 cm sont recommandés). D'autre part, les cages sont soumises à une pression importante du béton lors des phases de bétonnage et doivent donc comporter beaucoup d'aciers horizontaux. Compte tenu de la présence du cake de bentonite et des incertitudes sur le positionnement des cages (équipées de cales), l'enrobage de projet des aciers est supérieur à celui en vigueur pour les autres ouvrages en béton. Toutes les réservations diverses, pour les dispositifs d'auscultation des parois ou les passages de tirants, doivent être disposées à l'avance dans les éléments de cages d'armatures. De même, un renforcement de la cage est prévu au niveau des tirants dans le cas des parois ancrées, pour assurer la répartition des efforts d'ancrage. En cas de mise en oeuvre de la cage en plusieurs éléments verticaux, la continuité du ferrailage est assurée généralement par recouvrement des éléments et, dans certains cas particuliers, par ancrage .

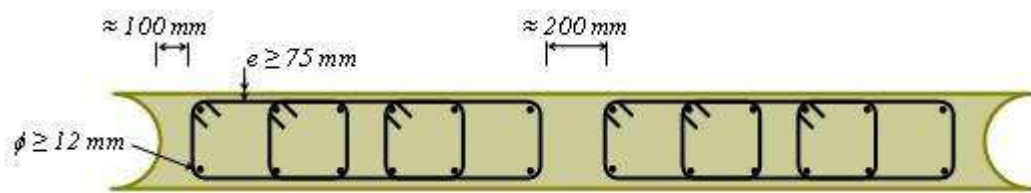


Figure I .12 : Cage d'armature. [01]

### I.3.2.4 Le béton et le bétonnage :

Le béton de paroi moulée n'est jamais vibré. Le bétonnage s'effectue au tube plongeur, depuis le bas de la fouille jusqu'en haut. C'est une opération délicate :

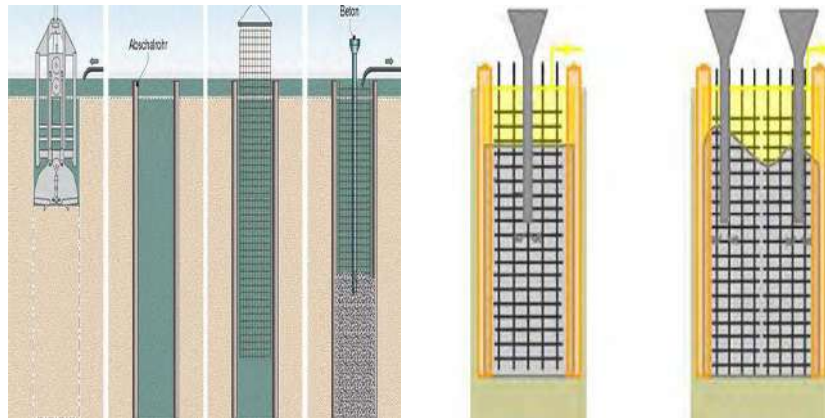
le bétonnage doit s'effectuer régulièrement de façon à ce que la boue et les éléments dont elle s'est chargée soient correctement chassés par le béton .

Le tube plongeur doit rester engagé de plusieurs mètres dans le béton frais, trois mètres étant considéré comme un minimum . [01]

Des retardateurs de prise sont incorporés au béton afin que la prise du béton mis en oeuvre en premier n'intervienne pas avant la fin du bétonnage de l'ensemble du panneau .

le béton doit être suffisamment liquide et non ségrégeable pour occuper correctement tout le volume de la fouille ; il doit cependant être suffisamment compact par simple mise en œuvre gravitaire. Le béton doit faire l'objet d'une étude au niveau de sa formulation et de sa maniabilité. [2]

Le béton doit répondre aux spécifications réglementaires avec des caractéristiques néanmoins légèrement inférieures à celles des ouvrages en élévation. La composition du ciment retenu doit être conditionnée par le niveau d'agressivité du milieu. La protection des armatures contre la corrosion est assurée à la fois par la qualité du béton et par une épaisseur d'enrobage adaptée. [2]



**Figure I .13. :Bétonnage. [01]**

### **I.3.2.5 Les joints entre panneaux :**

Les joints sont des points délicats de jonction entre panneaux qui, s'ils n'ont pas dans le cas général de fonction structurelle proprement dite, sont par contre très souvent amenés à assurer une continuité vis-à-vis des aspects hydrauliques. La technologie de coffrage des joints a été sans cesse améliorée ; l'époque de construction d'un ouvrage et la connaissance de l'entreprise qui en a assuré la construction peuvent utilement renseigner sur le type de joint On cite, ci-après les principaux types qui ont été ou sont encore utilisés, les techniques actuelles se limitant à deux ou trois procédés. [01]

#### **I.3.2.5.1 Utilisation de tubes joints :**

C'est la première technologie employée.

Chaque extrémité libre des panneaux est équipée avant bétonnage d'un tube circulaire de diamètre égal à l'épaisseur de la paroi (Fig1.8). Ce tube sert de coffrage et permet d'obtenir une surface d'arrêt de bétonnage semi-circulaire assurant une bonne reprise avec le panneau suivant. Les tubes sont extraits dès que le béton a atteint une rigidité suffisante. [3]

L'avantage de l'exécution par panneaux successifs est de ne nécessiter qu'un seul tube par panneau ; par contre, elle présente le risque que l'excavation d'un panneau soit exécutée avant durcissement suffisant du panneau précédent et ne dégrade l'extrémité de celui-ci. L'exécution par panneaux alternés nécessite deux tubes par panneau primaire mais permet d'éviter le risque précédent. [3]

#### **I.3.2.5.2 Joints en polystyrène :**

Le polystyrène a été utilisé pour donner au joint un profil en V. Ce système, s'il a présenté globalement un avantage en ce qui concerne sa facilité d'extraction, a entraîné plus d'inconvénients liés à la fragilité du matériau, à sa faible densité et à la difficulté de le dégager correctement du fond de joint à la fin du forage du panneau adjacent. Il n'est plus utilisé. [3]

#### **I.3.2.5.3 Tubes à ailettes :**

Ce procédé a pour but d'éviter le contournement du tube-joint par le béton. Le tube-joint a alors un diamètre réduit par rapport à l'épaisseur de la paroi et deux ailettes soudées diamétralement opposées constituent une barrière pour le béton. Il n'est plus utilisé. [3]

#### **I.3.2.5.4 Joints à clavettes :**

Ce système utilisé en complément du tube-joint consiste à réserver au bétonnage un vide dans le plan du joint entre deux panneaux et à « claveter » le joint en injectant dans ce vide un coulis renforçant l'étanchéité. Le vide est réalisé par un tube de réservation ou par un tube en plastique servant de guide à une perforation ultérieure. Plusieurs variantes existent :

- ✓ clavette simple constituée d'un tube mis en place le long du joint du premier panneau coulé.
- ✓ clavette double constituée de la juxtaposition d'un tube fixé au tube-joint et d'un tube tangent au précédent mis en place avant le coulage du deuxième panneau,
- ✓ clavette simple ou double complétée par un joint water stop.

#### **I.3.2.5.5 Joints à l'hydro fraise :**

Il ne s'agit pas à proprement parler d'une technique de réalisation des joints mais d'un procédé d'exécution des parois moulées assurant à la fois la perforation, l'extraction des matériaux et la réalisation des joints entre panneaux. Le joint est réalisé par fraisage du béton déjà durci à

l'extrémité du panneau en place, créant une surface de reprise crénelée assurant en principe un excellent contact avec le béton du panneau adjacent. Cette technique a subi des améliorations qui augmentent les performances obtenues au niveau des joints. [3]

#### **I.3.2.5.6 Coffrage joint :**

Il est constitué par une poutre caisson en acier haute résistance, mise en place, une fois l'excavation terminée . Il n'est pas extrait comme un coffrage glissant avant la prise complète du béton mais laissé en place jusqu'à l'excavation du panneau suivant. Il est ensuite décoffré latéralement par l'outil même d'excavation spécialement équipé.

Le joint étant maintenu en place pendant toute l'excavation d'un panneau suivant, il peut être utilisé comme guidage de l'outil d'excavation, apportant ainsi la garantie de la continuité géométrique de la paroi. Le décoffrage latéral permet en outre la mise en place courante dans le joint d'organes d'étanchéité complémentaires tels que des lames (ou bandes) d'arrêt d'eau .

Le coffrage joint comporte à cet effet un caisson auxiliaire rainuré dans lequel peuvent être insérés, sur leur demi-largeur, à frottement doux en jouant sur l'élasticité de leur tube central, une ou plusieurs lames d'arrêt d'eau en élastomère ou en PVC. La demi-largeur libre de ces lames se trouve enrobée par le béton au moment du bétonnage du panneau. Le décoffrage latéral libère la partie des lames protégée par le caisson qui pourra ainsi être enrobée par le béton du panneau suivant. Le dispositif comportant une lame double constitue la configuration normalement utilisée . [3]

#### **I .4. Interaction sol-soutènement :**

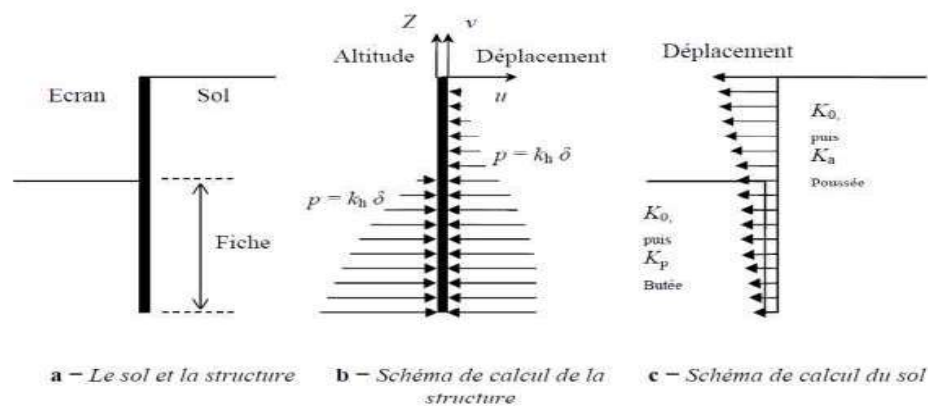
On peut faire des commentaires analogues sur le calcul des ouvrages de soutènement et, de façon générale, sur tous les calculs où du béton ou du métal sont en contact avec le sol. Ainsi, pour les rideaux de palplanches ou parois moulées devant lesquels une excavation est réalisée (figure14.a), coexistent une approche de type calcul des structures et une approche de type mécanique des sols. Pour le calcul des structures, le sol en contact avec l'écran est réduit à un coefficient de réaction  $k$  (et, dans certains cas, une pression limite) (figure 14.b), ce qui permet de calculer les efforts (effort tranchant, effort normal et moment fléchissant) dans la structure en fonction de  $k$  et des coefficients aux limites du problème. Le calcul se réduit alors à la résolution d'une équation différentielle du quatrième ordre du déplacement  $u(z)$ , de la forme :

$$\frac{d^4 u}{dz^4} = k \cdot u(z) \quad (I.1)$$

que l'on résout pour des conditions aux limites adaptées (point fixe imposé par un tirant ou un butons, encastrement à la base ou en tête, ... etc.). Cette fois aussi, la pression de contact, dont on peut choisir l'inclinaison, peut être limitée aux pressions limites de poussée ou de butée, qui résultent de l'analyse du fonctionnement mécanique du massif de sol. [04]

Si l'on aborde le calcul des écrans de soutènement du point de vue du sol, l'écran lui-même est traité comme une condition à la limite, qui se réduit en fait à une hypothèse sur le sens de déplacement de l'écran par rapport au sol (figure 14.c). Cette hypothèse permet de définir les parties du sol en état de butée et en état de poussée et, moyennant une hypothèse sur l'inclinaison des forces de contact, de calculer les efforts appliqués à l'écran par le sol. [04]

Ce calcul sert à vérifier l'équilibre général de l'écran, indépendamment de son dimensionnement interne, à déterminer sa fiche et, si nécessaire, à calculer la répartition des efforts dans l'écran. [04]



**Figure I. 14 :** Analyse du comportement d'un écran de soutènement. [03]

#### 1.4.1 point de vue de la structure et point de vue du sol :

L'idéal serait bien sûr de calculer simultanément les efforts et les déformations dans le sol et dans l'écran, sous les charges de service, en recourant le moins possible aux coefficients de réaction, qui ne sert pas des caractéristiques mécaniques intrinsèques des sols. Néanmoins, cette perspective reste éloignée et les deux approches de l'interaction sol-structure devront encore coexister en respectant les caractéristiques essentielles de chacun des matériaux en contact. [03]

#### 1.4.2 Mouvement du sol autour d'une excavation :

la diminution des contraintes totales pendant une excavation et la mise en place du soutènement entraînent des mouvements du sol vers la fouille (déplacements latéraux généralement

confinés par l'ouvrage), des tassements en surface derrière le soutènement, une déformation du soutènement et un soulèvement du fond de fouille. [03]

Les principaux facteurs qui affectent les mouvements d'un sol et de son système de soutènement sont, d'après Clough et Schmidt (1977) :

- ✓ la nature et les propriétés des sols .
- ✓ la forme et la profondeur de l'excavation .
- ✓ le type de soutènement, sa rigidité et son degré d'encastrement .
- ✓ la méthode de construction du soutènement, la durée et le phasage des travaux .
- ✓ l'intensité des surcharges d'exploitation et la présence de structures voisines .
- ✓ les conditions météorologiques.

### **I.5 Conclusion :**

La paroi moulée est un ouvrage onéreux et qui demande un besoin en inventaire conséquent ainsi qu'une grande installation de chantier. Cependant elle a de grand avantages pour tous les travaux en milieu urbain où il n'est pas tolérable d'avoir d'importance déformations en tête de paroi et également lors de l'exécution de celle-ci comparé à l'exécution de palplanche qui entraîne de grosse vibration aux alentours. Elle peut également être utilisée en mur définitif comme des murs de sous-sol par exemple.

Lors de l'exécution de la paroi, nous n'avons pas besoin d'effectuer d'étape au niveau de la hauteur contrairement aux parois clouées et berlinoises. De ce fait, il est possible de faire une paroi moulée dans un sol gorgé d'eau, de plus la paroi moulée peut être rendu presque complètement étanche.



*Chapitre II :*  
*présentation de*  
*l'ouvrage*

## II .1. Introduction :

Le projet du métro d'Alger prévoyait un réseau de 64 km. Les travaux furent officiellement inaugurés en 1982, les études techniques achevées en 1985. Il faudra attendre quatre ans pour que soit entamée sa réalisation en 1989.

Depuis son lancement, le projet du métro a été confronté à de multiples difficultés qui se sont traduites par des dérives importantes des plannings de réalisation arrêtés. Parmi les principaux obstacles ayant retardé ce projet, on note :

- ✓ Le sous-sol algérois s'est avéré difficile à creuser en raison d'une topographie irrégulière, d'une géologie difficile, de l'existence de pentes de 10 %, de la présence de nombreux bâtiments vétustes et fragiles, etc.
- ✓ Le problème du financement posé à maintes reprises, notamment lors de la crise économique de 1986.
- ✓ Les expropriations pour cause d'utilité publique furent plus difficiles que prévues.
- ✓ L'approvisionnement irrégulier en matériaux de construction.
- ✓ L'interruption de l'usage des explosifs entre 1993 et 1999.

Le chantier du métro d'Alger a été réactivé en 2003, à la faveur des programmes d'investissements publics engagés par les pouvoirs publics dans le cadre du Plan de Soutien à la Relance Economique 2000-2005 et du Plan Complémentaire de Soutien à la Croissance 2005-2009.

Dans le cadre de l'Étude d'Exécution inséré dans le Projet de l'Extension E – El Harrach Centre – Bab Ezzouar – Aéroport International d'Alger du Métro d'Alger, nous présentons dans le présent chapitre les « Hypothèses et Modes Opératoires » correspondant aux travaux de blindage et d'excavation de la Station Hacén Badi.

Ce chapitre a comme principal objectif présentation de l'ouvrage et la définition des méthodologies générales et des approches de calcul à suivre dans la vérification de la sécurité des travaux d'excavation à ciel ouvert et en souterrain prévus réaliser et dans le dimensionnement des structures de soutènement à mettre en œuvre, soit provisoires, soit définitives.

Il faut noter que la technologie d'exécution adoptée pour le blindage de la station dans les deux corps excavés à ciel ouvert, qui seront placés dans les extrémités, est celle des parois moulées. Les parois moulées seront multi-appuies sur des butons métallique qui seront mettre en œuvre au fur et à mesure de l'avance d'excavation.

À son tour, l'excavation de la galerie souterraine qui fera la liaison entre des deux puits à ciel ouvert sera matérialisée selon la méthode traditionnelle de creusement de tunnels, aussi appelé de Nouvelle Méthode Autrichienne de Construction de Tunnels (NATM).

D'une façon générale, et en complément des éventuels pré-soutènements à définir en fonction des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques particulières effectivement trouvées, le support provisoire à appliquer dans la galerie consistera dans une couche de béton projeté, en intégrant deux couches de treillis soudées et des cintres métalliques HEB.

Les considérations concernant le dimensionnement du revêtement définitif et des structures internes seront présentées dans un document spécifique.

## **II .2. Présentation de l'extension El Harrach Centre – Bab Ezzouar – Aéroport International d'Alger Houari Boumediene :**

Cosider Travaux Publics est chargé du projet de l'extension de la ligne 1 du métro d'Alger reliant le Centre-ville d'El Harrach à l'Aéroport International Houari Boumediene depuis Juin 2015. Sur un linéaire de 10 km, l'extension comporte 10 puits de ventilation et 9 stations. Cette ligne desservira des quartiers denses en population tel que : Beaulieu, Oued Smar, Cite 5 juillet, Bab Ezzouar, le pôle universitaire d'El Harrach, le Centre des Affaires de Bab-Ezzouar et l'université Houari Boumediene. Elle relira le Tramway au carrefour de l'université Houari Boumediene et Offrira une multi modalité au niveau de cette station. [05]

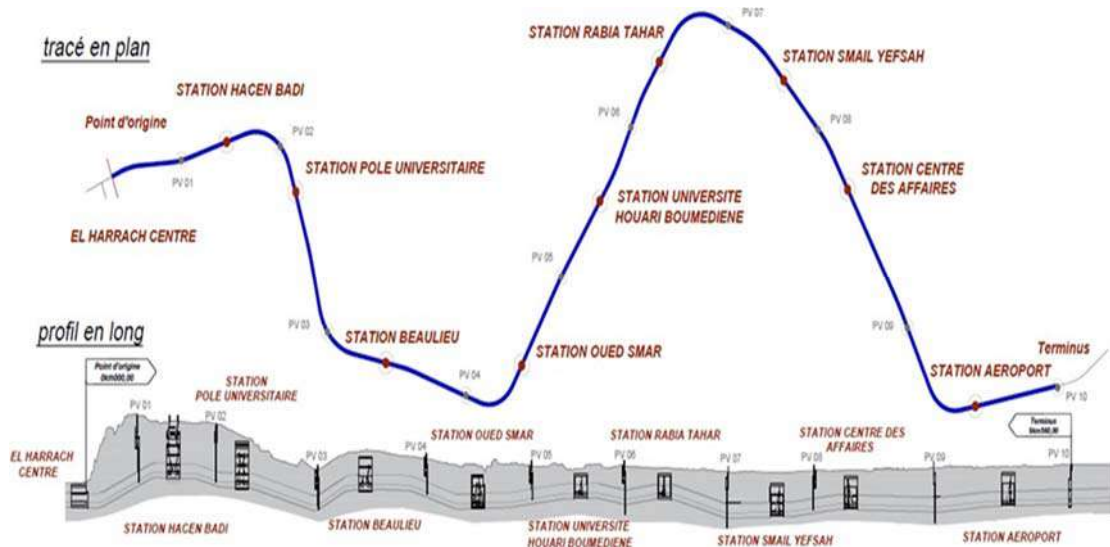
✓ Cette extension comprend :

- Nombre de tube : 01.
- Nombre de voies : 02.
- Nombre de puits de ventilation : 10.
- Nombre de stations : 09.
- Extension réalisée en deux tranches.
- Maitre d'ouvrage : Entreprise Métro d'Alger (EMA).
- Maitrise d'œuvre : DES (DONGMYEONG, Euro studios, SAETI).
- Entreprise : COSIDER TP – M28.

✓ Les stations de cette extension sont :

- Station Hassan Badi.
- Station pôle universitaire.
- Station Beaulieu.
- Station Oued Smar.

- Station Université Houari Boumediene.
- Station RabiaTahar.
- Station SmailYefsah.
- Station Centre des Affaires.
- Station Aéroport.



**Figure II .1 :** Extensions du Métro d'Alger El Harrach Centre – Bab Ezzouar – Aéroport International d'Alger. [05]

### **II .3. Présentation de la station de Hacem Badi (encadrement et contraintes géologiques, géotechniques et hydrologiques) :**

La Station Hacem Badi sera située dans le quartier Belfort, dans une surface topographiquement plane et dans la confluence de la Rue Ahmed Aouane (à Est) avec la Rue des Frères Oudek (à Ouest) et la Rue Slimane Hanafi (à Sud). La grande concentration de petit commerce dans cette zone de la ville d'Alger, dont grand partie est effectué en utilisant la vie publique, conjugué avec le trafic serré et les rues très exigües, font que l'aire d'implantation de la station soit marquée par une grande densité populationnelle pendant le jour et par la présence très proche de plusieurs types de bâtiments.

En effet, il est noté l'existence de quelques bâtiments qui sont placés dans l'avoisinante proche de l'aire d'implantation de la station, des quels se démarquent la Direction des Impôts (R+3) à

Nord, l'Hôpital Hocine Badi (R+2) et une Clinique (R+0) à Sud et un bâtiment mixte (commerciale et d'habitation) (R+4) dans l'extrémité Sud-Ouest. [05]

À cet égard, dans la Figure 2 est présenté la vue générale de la zone d'implantation de la Station Hacén Badi, notamment des deux puits d'extrémité à exécuter à ciel ouvert et de la galerie souterraine à matérialiser, comme déjà mentionnée, en suivant la méthodologie NATM, ainsi que des bâtiments placés dans les alentours. La zone



**Figure II .2 :** Vue générale de la zone d'implantation de la Station Hacén Badi (Google Maps, date 30/12/2017. [05]

d'implantation de la station correspond à une surface totale d'environ 3325 m<sup>2</sup>, dont d'environ 2223 m<sup>2</sup> concerne aux deux puits d'extrémité. [05]

L'excavation associée à l'exécution des puits d'extrémité aura une longueur d'environ 31,50 m et 36,00 m, respectivement, pour les extrémités Ouest et Est, tandis que le largeur courant d'excavation est d'environ 20,90 m. La profondeur moyenne d'excavation des puits est d'environ 40,20 m. Nous signalons que dans le puits d'extrémité Est est prévu un puits de pompage d'eau sous la dalle de fond, lequel implique que le niveau d'excavation, dans cette zone, soit d'environ 5,25 m plus profonde. [05]

À son tour, la galerie souterraine aura 56,72 m d'extension et une aire d'excavation avec d'environ 338 m<sup>2</sup>. Le recouvrement sera d'environ 20 m, qui correspond à un diamètre de la galerie à excaver.

Selon l'information disponible, les sols où la Station Hacén Badi sera creusé s'agissent des dépôts quaternaires avec facies lithologiques constitués par des sables limoneux-argileux

superposés aux formations du pliocène récent et quaternaire ancien constitués, à l'échelle de l'ouvrage, par les marnes et argiles marneuses dites d'El Harrach et matériaux du Tertiaire constitués par sables fins, moyennes à grossiers, jaunâtre avec présence de grés sous-forme de fragments et marnes verdâtres à grisâtres.

La décision de considérer pour chaque horizon si, pendant les essais SPT et PMT, il y a eu dissipation de la pression d'eau interstitielle (comportement drainé) ou non (comportement non-drainé), a été pris en se basant sur l'observation visuelle de la quantité de fins dans la matrice du sol et les résultats de la caractérisation physique, ainsi que sur les données piézométriques et de la variation du niveau d'eau au cours de la perforation, lesquelles apportent une idée de la perméabilité des matériaux creusés.

Dans le Tableau 1 est présenté le résumé des profondeurs des horizons géotechniques existantes bien que le type de réponse considérée pour chaque formation face à des modifications de cet état de contrainte. [05]

Localisation (PK)	Horizon géotechnique	Symboles utilisés dans les dessins	Réponse drainée ou non-drainée	Profondeurs moyennes (m)
PK0+84 8	Remblais	R	Non-drainée	0,0 – 5,5
	Argiles limoneuses	Qa	Non-drainée	5,5 – 9,5
	Sables limoneux-argileux parfois mêlés de cailloux	Qs	Drainée	5,5 – 29,5
	Argiles marneuses	QM	Non-drainée	11,3 – 28,50 (SC 08)
	Sables fins, moyennes à grossiers, jaunâtre avec présence de grés sous-forme de fragments	TS	Drainée	30,5 – 34,0
	Marnes verdâtres à grisâtres	TM	Non-drainée	60,0 – 63,5 (SC 08)

**Tableau II.1** – Résumé des profondeurs des horizons géotechniques existantes. [05]

En outre, selon les études et le paramétrage présentés dans le document « Hypothèses Géotechniques », les paramètres géotechniques à utiliser pour chaque formation dans les calculs pour le dimensionnement des structures sont ceux présentés dans le Tableau 2. Il faut noter que les paramètres géotechniques ensuite présentés ont été obtenus sur la base d'une révision au document « Hypothèses Géotechniques » qui sera bientôt livrée.

En outre, à la lumière des données obtenus sur la base des lectures effectués aux piézomètres installés dans la zone d'implantation de la station, nous avons considéré que la nappe phréatique est placée à d'environ la cote 0,00, ça veut dire, 6,50 m sous le niveau final d'excavation de la station. Il faut souligner que dans le document « Hypothèses Géotechniques » ce postulat est dument justifiée et documentée avec des lectures aux piézomètres. [05]

Horizon géotechnique	Remblais(R)	Argiles limoneuses (Qa)	Sables limoneux-argileux parfois mêlés de cailloux (Qs)	Sables fins, moyennes à grossiers, jaunâtre avec présence de grès sous-forme de fragments (TS)	Marnes verdâtres à grisâtres (TM)
Profondeurs moyennes (m)	0,0 – 5,5	5,5 – 9,5	5,5 – 29,5	30,5 – 34,0	60,0 – 63,5
Poids vol. humide $\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	20,0	20,0	20,0	21,0	20,0
Poids vol. sec $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,0	17,0	17,0	18,0	17,0
Cohésion non-drainée $c_u$ (kPa)	30	$48 + 5,6 \cdot (z - 2,5)$	-	-	$220 + 2,4 \cdot (z - 56,6)$
Module de déformabilité non-drainé $E_u$ (MPa)	12	$29 + 3,3 \cdot (z - 2,5)$	-	-	$132 + 1,7 \cdot (z - 56,6)$
Angle de frottement effectif $\phi'$	20	21	32	34	22
Cohésion effective $c'$ (kPa)	5	25	10	10	35
Module de déformabilité drainé $E'$ (MPa)	10	32	35	100	104
Coefficient $K_0$	0,65	0,65	0,5	0,5	0,6

**Tableau 2** – Paramètres géotechniques de calcul considérés. [05]



*Chapitre III :*  
*méthode d'excavation*

### III.1. Description des solutions adoptées

#### III .1.1. Considerations generales :

Dans la conception des solutions de blindage, de soutènement provisoire et d'excavation à adopter pour les différents corps de la station, nous avons essayé de respecter les principes de base suivants:

- ✓ Recourir à des solutions constructives qui s'adaptent facilement en termes d'évolution de la construction aux solutions prévues dans les différents projets, et qui permettent, de façon suffisamment prudente, de procéder aux excavations jusqu'à la cote de fond définie ;
- ✓ Adapter les solutions de construction en fonction du type de travaux en question, de sa dimension et des contraintes qui l'entourent .
- ✓ Contrôler effectivement les déplacements des structures de blindage au fur et à mesure de l'avance de l'excavation, en considérant la proximité des bâtiments avec une hauteur considérable .
- ✓ Garantir la possibilité de la moindre interférence à la surface, en considérant le fait que la Station est située dans une voie publique routière dans un quartier avec une grande densité populationnelle .
- ✓ Contrôler l'affluence d'eau à l'intérieur de l'excavation de façon à éviter soit un abaissement significatif de la nappe phréatique ou des nappes phréatiques installées, soit des phénomènes d'instabilité hydraulique .
- ✓ Recourir aux solutions reconnues en conditions géologiques similaires et à des ouvrages du même type .
- ✓ Intégrer la structure de blindage le plus possible dans la structure finale de la station, en évitant ainsi des travaux postérieurs de démolition dans les zones où il puisse y avoir une interférence entre les structures ;
- ✓ Promouvoir la facilité et la rapidité d'exécution .
- ✓ Minimiser autant que possible le coût associé.

Dans les chapitres suivants, des solutions de blindage et de soutènement préconisées pour la Station Hacén Badi seront présentées en fonction de la nature de l'excavation, ça veut dire, pour les excavations à ciel ouvert dans les puits d'extrémité et pour l'excavation en souterraine dans la galerie de liaison

### III .1.2. Excavation à ciel ouvert :

En tenant compte des principes précédemment annoncés, la profondeur d'excavation nécessaire pour arriver à la cote final d'excavation des puits et les faibles caractéristiques mécaniques des terrains à excaver, la solution de blindage recourant à des parois moulées pour les puits d'extrémités de la Station Hacen Badi se présente comme la solution la plus appropriée.

L'excavation de la paroi dans le terrain sera réalisée par une hydrofraise (voir exemple dans la Figure 2), utilisant au fur et à mesure de l'avance de l'excavation des boues stabilisantes (boues de bentonite ou de polymères). Il est important que les boues de bentonite (mélange d'eau et d'argile sous forme colloïdale) ne dépassent pas la densité de 1,10 (kg/l).

Cette boue est indispensable, une fois qu'elle évite l'éboulement des parois des panneaux d'excavation, en faisant remonter en surface les débris de l'excavation, en limitant aussi les infiltrations d'eau et en réduisant le frottement entre les roues de coupe et les parois de l'excavation. Dans le présent projet, il a été considéré que l'équipement d'excavation produisait des panneaux avec 2,80 m de long et 1,20 m de large .



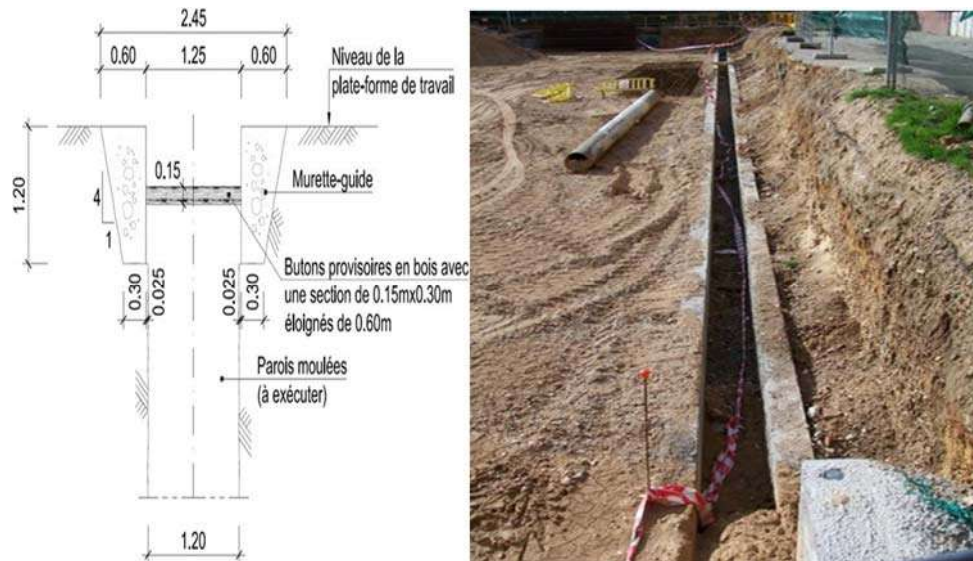
**Figure III.1** : Exemple d'une hydrofraise. [05]

Dans le cas de la Station Hacen Badi, la profondeur prévue pour les parois moulées est d'environ 50,0 m.

Avant le début des activités, une plate-forme de travail horizontal et avec des bonnes conditions de circulation devra être réalisée pour soutenir tous les équipements à utiliser dans la réalisation des parois moulées, laquelle devra être proposé par l'exécutant (le bureau d'études suggère l'exécution de la plate-forme sur la cote 45,7). Nous soulignons que la plate-forme devra être

maintenue en bonnes conditions au fur et à mesure des travaux pour éviter des accidents et pour garantir une bonne exécution des parois moulées.

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. Dans la Figure 4 est présentée la définition géométrique des murettes-guides préconisée dans le projet, ainsi qu'un exemple de murettes-guides typiques .



**Figure III.2 :** Murettes-guide pour l'exécution des parois moulées. Définition géométrique et exemple. [05]

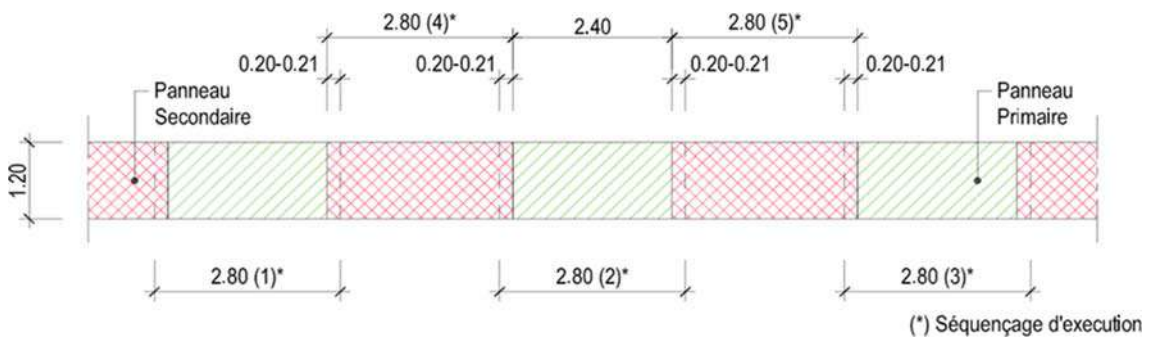
Cette structure est constituée par deux murettes parallèles en béton armé, partiellement bétonnées contre le terrain, et la distance entre eux correspondre à l'épaisseur de la paroi (1,20 m) additionné de 5 cm. La distance finale correspond à l'espace libre nécessaire au passage de l'équipement d'excavation.

Nous soulignons encore que l'implantation de ces murettes et, par conséquent, de l'axe des parois moulées doit prendre en considération une tolérance de déviation verticale des parois minimale de 0,5% de la hauteur à creuser. Ainsi, dans le cas de cette station, nous avons prévu une tolérance de 20 cm.

La matérialisation du blindage dans le contour de l'aire d'implantation des deux puits est faite par la conjugaison de panneaux primaires et secondaires selon le séquençage type présenté dans la Figure 5. La disposition préconisée pour les panneaux a essayé de garantir, pour chaque panneau, des mêmes conditions de frontière pour le creusement avec l'hydrofraise, à savoir,

terrain-terrain dans le cas des panneaux primaires et béton-béton dans le cas des panneaux secondaires.

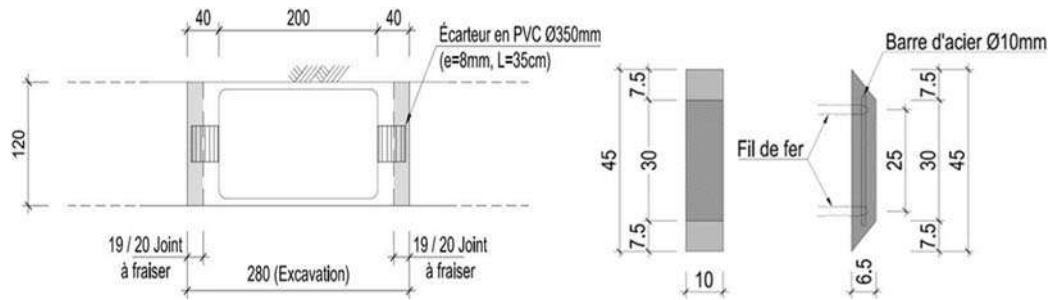
En ce qui concerne la Station Hacen Badi, attendant aux faibles caractéristiques mécaniques des terrains à creuser, les panneaux primaires seront ouverts et bétonnés par passe unique, avec les dimensions mentionnées précédemment. De même, les panneaux secondaires auront toujours les dimensions que correspondent à l'ouverture excavée par l'hydrofraise. Toutefois, il faut noter la nécessité d'effectuer, ponctuellement, des panneaux primaires multiples dans les coins ou dans le voisinage des sorties de ventilation, de façon à mieux régler les panneaux avec la géométrie de la fouille. [05]



**Figure III.3** : Mode d'exécution des panneaux considéré pour la Station Hacen Badi (situation courante) . [05]

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 de 20 cm et 21 cm pour des situations courantes, en accord avec le schéma présenté dans la Figure 4.

Pour garantir que la fraise ne frappe pas les cages d'armatures des panneaux primaires pendant l'excavation des panneaux secondaires, des écarteurs en PVC Ø350 mm ( $e=8$  mm) devront être installés dans les extrémités des panneaux primaires à fraiser, tel qu'illustré dans la Figure 5. En outre, pour assurer l'enrobage préconisé pour les armatures, des écarteurs en béton devront être installés au long des cages d'armatures (voir Figure 5).



**Figure III.4 :** Panneaux primaires: Définition géométrique type. Écarteurs en PVC et en béton (dimensions en centimètres). [05]

Dans la définition des cages d'armatures des panneaux, nous avons pris en considération les aspects suivants :

- ✓ Fonctionnement conjoint des parois moulées et de la paroi de revêtement dans le scénario à long terme. Les armatures des parois moulées ont été dimensionnées, dans les cas applicables, pour résister à des efforts résultants des actions statiques à long terme et sismiques, en considérant une section résistante composée par les parois moulées et par la paroi de revêtement .
- ✓ Les cages d'armature sont fabriquées par éléments avec 12 m de longueur maximale .
- ✓ La raideur des cages sera assurée par des barres diagonales de renforcement et par des soudures dans points en divers croisements. Ces éléments n'ont pas une fonction structurelle .
- ✓ L'écartement minimal considéré entre des niveaux d'armatures a été défini par rapport à la dimension maximale des agrégats du béton, de façon à assurer la qualité du bétonnage et le remplissage de toute la section .

En ce qui concerne la solution de soutènement de l'excavation préconisée pour les puits d'extrémité, nous avons considéré, d'une façon général, huit niveaux d'appui principal pour faire face à une hauteur d'excavation totale avec d'environ 40,5 m (voir Figure 7). Au fur et à mesure de l'excavation, les niveaux d'appui seront appuyés directement la paroi de revêtement, sauf le premier niveau que sera appuyé sur la poutre de couronnement.

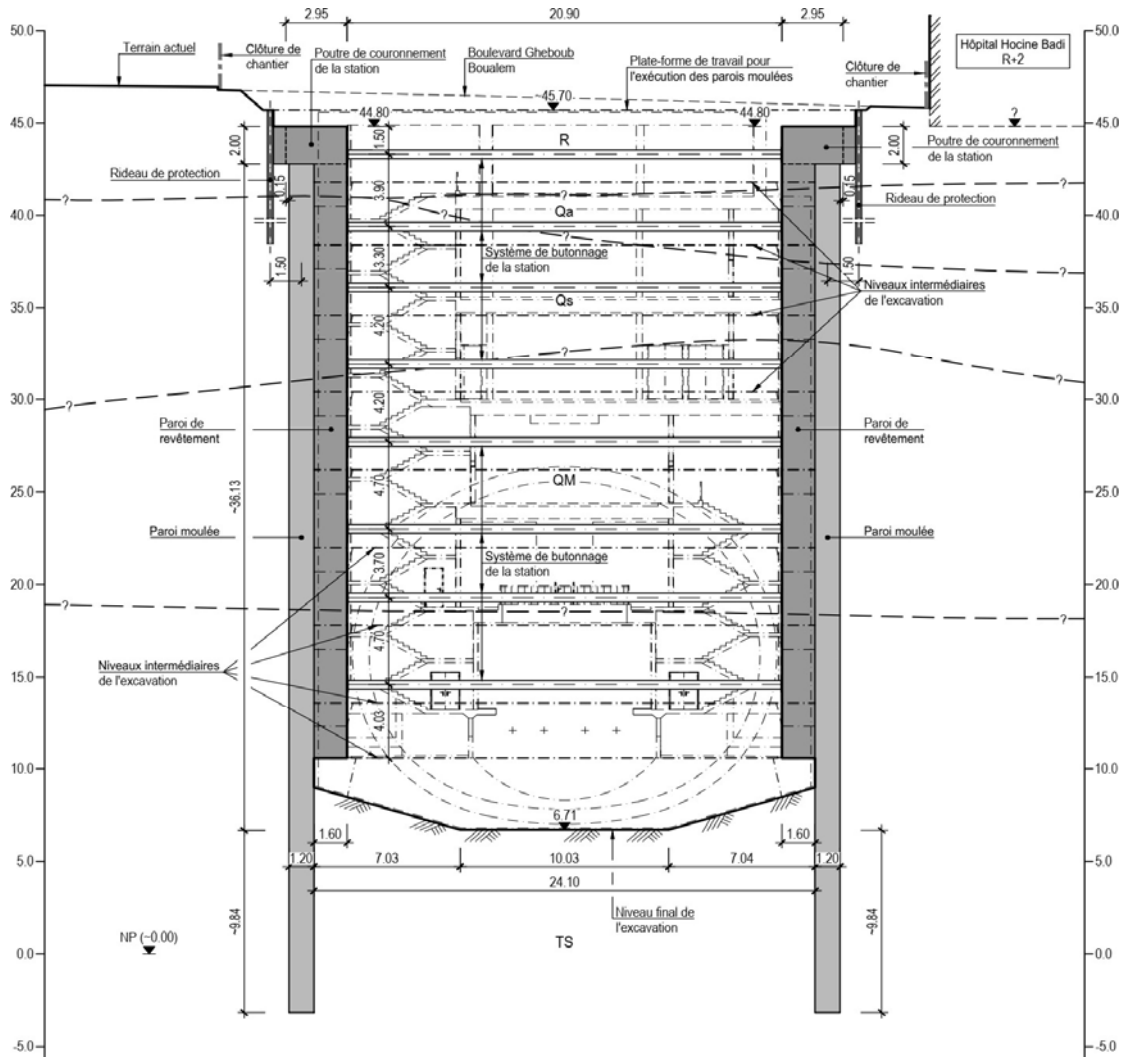
À son tour, la poutre de couronnement devra être exécutée juste après l'étêtage des parois moulées sur la cote 42,8. La cote de la poutre de couronnement devra être constante dans tout le périmètre des deux puits d'extrémité. [05]

Chaque élément des appuis des parois du blindage, à matérialiser par des profils métalliques, sera constitué par deux sections en caisson avec un comportement de poutre-colonne indépendante, dont chacune est constituée par deux profils HEB500 liés structurellement au long de toute sa longueur à travers de profils LNP 50x4 soudés aux semelles supérieures et inférieures. En considérant le niveau des efforts agissants sur chaque niveau et l'important largeur de la fouille des puits, nous avons dû préconiser le contreventement vertical et horizontal des butons de tous les niveaux. À propos du contreventement vertical, des pieux  $\square 1000$  devront être exécutés pendant la phase d'exécution des parois moulées. Le nombre et la disposition spatiale des pieux sera étudié dans la prochaine phase du projet de façon à n'affecter pas la viabilité et la rentabilité des travaux à l'intérieur des fouilles.

À son tour, le contreventement horizontal des butons sera mise en œuvre à travers de profils métalliques qui feront la liaison entre des butons et la structure de blindage dans les zones où soit attendu petits déplacements de la structure.

Il convient enfin souligner que, pour raisons constructives et à cause de la présence proche de bâtiments, des murettes-guides pour l'exécution des parois moulées seront matérialisées dès pratiquement la surface (cote 45,7). Dans les cas où l'excavation pour l'exécution de la poutre de couronnement soit très proche des bâtiments, des solutions de soutènement provisoire seront considérés, tel que des berlinoises ou de rideaux de micropieux sécants.

Les eaux affluentes à l'intérieur de l'excavation des différents ouvrages seront captées vers un puits de pompage à créer au fond de l'excavation, et pompées jusqu'à la surface.



**Figure III.5 :** Solution de blindage et de soutènement des puits d’extrémité de la Station Hacén Badi. Section concernant le puits d’extrémité Ouest. [05]

**III .2. Actions et combinaisons applicables :**

**III 2.1. Les actions et leurs effets :**

Les parois des structures de blindage et le soutènement de la galerie souterraine seront soumises aux actions suivantes ou des respectifs effets :

- ✓ Poids propre des structures de soutènement.
- ✓ Poussées des terrains – mobilisation de l’état actif du terrain à l’arrière des parois et mobilisation de l’état passif du terrain devant des parois au niveau de la base de l’excavation.
- ✓ Poussées provoquées par des surcharges situées à l’arrière des parois de nature routière (avec une valeur caractéristique de 10 kPa) .



- ✓ Poussée hydrostatique dû à la présence d'une nappe phréatique (le cas échéant) .
- ✓ Une valeur d'accélération sismique 0,1 g (associée à la phase provisoire) selon l'indication de l'EMA, et une valeur d'accélération sismique de 0,4 g (associée à la phase définitive), selon le préconisé dans la réglementation applicable.

L'abordage de calcul pour contempler l'action séismique associée à la phase provisoire sera analysé pour chaque cas spécifique, en fonction de la géométrie et des caractéristiques des structures de blindage de chaque ouvrage. Nous suivrons les principes et les méthodologies présentés dans l'Annexe D du RPOA-2008, en les adaptant le cas échéant.

Les poussées des terrains autour des parois de soutènement peuvent être considérées comme des actions ou des effets, selon la situation de calcul.

Nous signalons que les surcharges de nature routière considérée dans les calculs ont un valeur de 11,11 kPa de façon à garantir l'application du coefficient de sécurité pour les actions variables (1,5) au moment d'application du coefficient de 1,35 aux efforts obtenus du logiciel ( $1,35 \times 1,11 \approx 1,50$ ).

En ce qui concerne les butons métalliques à utiliser pour le support des parois du blindage, ceux-ci seront vérifiés en ajoutant aux efforts transmis par les parois, les efforts associés aux restrictions partiels imposées par ceux-ci à la variation de la longueur des butons résultante de la variation de la température par rapport à la température d'installation.

### **III .2.2 Combinaisons pour les états limites ultimes (elu) de résistance :**

Pour le dimensionnement des éléments structurels, notamment des parois de soutènement et des butons métalliques, on utilise des coefficients de sécurité partiels pour les états limites ultimes, selon la méthodologie présentée dans l'Eurocode. Pour chaque état limite ultime, l'inéquation suivante doit être vérifiée :

$$Ed \leq Rd$$

Où :

- ✓  $Ed$  : valeur de calcul de l'effort agissant ;
- ✓  $Rd$  : valeur de calcul de la résistance.

La valeur de calcul est définie par la combinaison fondamentale des actions ou des effets des actions :

$$Ed = \sum_{i=1}^m \gamma_{G,i} G_{k,i} + \gamma_Q (Q_{k,1} + \sum_{j=1}^n \psi_{0,j} Q_{k,j})$$

Où :

- ✓  $\gamma_{G,i}$  : Coefficient de sécurité pour les actions permanentes .
- ✓  $G_{k,i}$  : Action ou effet d'action permanente .
- ✓  $\gamma_Q$  : Coefficient de sécurité pour les actions variables .
- ✓  $Q_{k,1}$  : Action ou effet d'action variable de base .
- ✓  $\psi_{0,j}$  : Coefficient de la combinaison de l'action variable j .
- ✓  $Q_{k,j}$  : Actions restantes variables ou effet des actions restantes variables.

Selon l'Eurocode, le coefficient de sécurité pour les actions permanentes ( $\gamma_{G,i}$ ) a une valeur de 1,35 pour les actions défavorables et 1,00 pour les actions favorables. À son tour, le coefficient de sécurité pour les actions variables ( $\gamma_Q$ ) a une valeur de 1,50 pour les actions défavorables et 0,00 pour les actions favorables.

Selon la même norme, dû à la variation de la température, la valeur du coefficient de combinaison ( $\psi_{0,j}$ ) pour l'action variable est de 0,60.

La résistance de calcul ( $R_d$ ) est déterminée directement par la valeur caractéristique de la résistance du matériel ( $R_k$ ) selon la expression suivante :

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M}$$

Le coefficient partiel de sécurité qui prend en compte la variabilité du matériel et les écarts relativement aux dimensions du projet ( $\gamma_M$ ) a une valeur de 1,50 pour le béton ( $\gamma_c$ ) et 1,15 pour les ferrailages ( $\gamma_s$ ).

**III .2.3. Etats limites de service (els) :**

Malgré le caractère provisoire des certaines structures analysées dans le présent document, on limite les déformations structurales aux limites réglementaires pour tous les structures.

**III .2.4. utilisation de modeles d'interaction sol/structure :**

Dans les situations où on utilise des modèles numériques qui prennent en compte les effets d'interaction sol/structure, notamment les modèles effectués par le logiciel PLAXIS ou équivalent qui visent obtenir les actions de dimensionnement des structures de soutènement, les paramètres géotechniques utilisés pour le terrain ne sont pas affectés par les coefficients partiels respectifs en appliquant des coefficients seulement aux efforts obtenus.

En effet, en résultat du fort non linéarité de l'analyse, la réduction des paramètres des sols peut conduire à l'obtention des résultats peu crédibles et avec des conséquences pour les solutions extrêmement onéreuses dû à une plastification généralisée du sol. De plus, cette même réduction peut conduire à l'obtention des sols physiquement non existants et résultats peu crédibles. On souligne encore que cette méthodologie est d'utilisation généralisé dans le domaine géotechnique.

**III .3. Matériaux**

Les caractéristiques des matériaux utilisés pour la construction des ouvrages sont, suivant le cas:

**III .3.1 Béton :**

- ✓ C12/15 X0 – Béton de propreté/remplissage.
- ✓ C25/30 XC2 – Micro-béton de remplissage.
- ✓ C25/30 XC2 – Béton projeté.
- ✓ C25/30 XC2 – Béton armé pour les murettes-guide.
- ✓ C25/30 XC4 – Béton projeté pour le soutènement provisoire de la galerie souterraine.
- ✓ C30/37 XC2 – Béton armé pour les parois moulées, pour les poutres de couronnement des parois moulées, pour le revêtement définitif de la galerie souterraine et pour toutes les structures définitives en général.

**III .3.2 Acier :**

- ✓ Armatures passives A500 NR (EN 1992-2010) ou équivalent :
- ✓ Limite d'élasticité caractéristique :  $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ .
- ✓ Module d'élasticité :  $E_{ym} = 200\,000 \text{ N/mm}^2$ .

- ✓ Système de butonnage et cintres à utiliser dans la galerie – S275 (EN 1993-2010) ou équivalent.
- ✓ Acier de construction – S275 J2.
- ✓ L'enrobage des armatures sera de :
- ✓ 30 mm – Soutènement provisoire des galeries souterraines
- ✓ 50 mm – Murettes-guides et poutres de couronnement des pieux.
- ✓ 70 mm – Parois moulées et pieux.
- ✓ Longueur minimale de superposition .
- ✓ 75 Ø – Tronçons de superposition intégrale des parois moulées et des pieux.
- ✓ 50 Ø – Restantes structures en béton armé.
- ✓ Toutes les dispositions constructives, tels que l'espacement des armatures, les longueurs d'ancrage, les longueurs de recouvrement et les diamètres admissibles des mandrins pour les barres pliées doivent suivre l'EC2.

### III .3.3 JET-GROUTING :

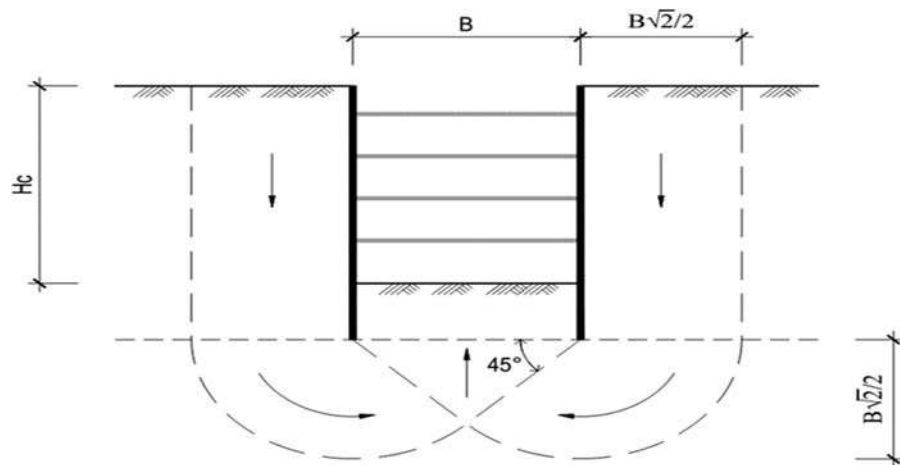
Nous estimons que les valeurs minimales à obtenir seront de l'ordre des valeurs caractéristiques suivantes (à évaluer en recourant à essais de compression uniaxiale à réaliser sur échantillons obtenues de colonnes d'essai) :

- ✓  $f_{ck} \text{ min} = 5.0 \text{ MPa (terrain sableuse) / } 2.5 \text{ MPa (terrain argileuse) .}$
- ✓  $f_{ctk} \text{ min} = 1.1 \text{ MPa (terrain sableuse) / } 0,62 \text{ MPa (terrain argileuse) .}$
- ✓  $E \text{ min} = 1500 \text{ MPa (terrain sableuse) / } 500 \text{ MPa (terrain argileuse).}$

### III .4. Analyse de la stabilité du fond de l'excavation :

La stabilité du fond d'excavation peut être mise en cause par deux phénomènes distincts, associés un à un manque de capacité portante et résultant dans un mécanisme de rupture rotationnelle, et autre à la pression ou l'écoulement de l'eau interstitielle, lesquelles peuvent induire des ruptures par soulèvement hydraulique dû à l'annulation des contraintes effectives verticales ou par érosion interne.

En ce qui concerne la capacité portante, on constate que l'avancement de l'excavation et l'extraction de terres à l'intérieur du blindage provoque l'augmentation des efforts de cisaillement sur le terrain immédiatement au-dessous du niveau de l'excavation, tel comme montre la Figure 9. Si ces efforts deviennent trop élevés, le fond de l'excavation entre en rupture, forçant le soulèvement du terrain et, par conséquence, l'occurrence d'importants déplacements dans le terrain environnant. [05]



**Figure III .6 :** Mécanisme de rupture de la fondation d'une excavation. [05]

La hauteur critique ( $H_c$ ) correspond à la hauteur d'excavation à partir de laquelle il peut se mobiliser la rupture de la fondation, ceci dépendant, entre autres facteurs, de la résistance non drainée du sol. L'expérience montre que, pour les hauteurs d'excavation courantes, ce type d'occurrence seulement a lieu dans les argiles molles.

Il est aussi connu que la stabilité du fond de l'excavation est un facteur avec beaucoup d'influence dans la magnitude des efforts agissants sur les appuis des parois de soutènement. En ce sens, on peut trouver dans la bibliographie des rapports où l'augmentation de la longueur des parois au-dessous du dernier niveau de l'excavation accroît, d'une part, le facteur de sécurité à la rupture du fond de l'excavation mais, d'autre part, accroît aussi le niveau de charge transféré par la paroi aux appuis.

*chapitre IV:*  
*Présentation du*  
*logiciel plaxis*

## **IV. Presentation du logiciel plaxis**

### **IV.1. Introduction :**

Plaxis est un programme d'éléments finis en deux dimensions ou en trois dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique.

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.

Les utilisateurs sont supposés être capables de travailler dans un environnement Windows. Pour se familiariser rapidement avec l'utilisation de cette interface et avec les caractéristiques principales du programme [6].

### **IV.2. La méthode des éléments finis :**

La méthode des éléments finis est une manière numérique de résoudre certains des problèmes de physique. C'est une méthode qui permet de déterminer une solution approchée sur un domaine spatial, c'est-à-dire qui permet de calculer un champ (de scalaires, de vecteurs, de tenseurs) qui correspond à certaines équations et à certaines conditions imposées.

La méthode consiste à découper le domaine spatial en petits éléments, également appelés mailles, et à rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément, c'est-à-dire à transformer le système d'équations quelconque en un système d'équations linéaires.

Chaque système d'équations linéaires peut se représenter par une matrice. Les systèmes d'équations pour tous les éléments sont ensuite rassemblés, ce qui forme une grande matrice ; la résolution de ce système global donne la solution approchée au problème [6].

La méthode des éléments finis est donc mise en œuvre les connaissances des trois disciplines de base :

- ✓ La mécanique des structures : élasticité, résistance des matériaux, dynamique, plasticité, ...etc.
- ✓ L'analyse numérique : méthodes d'approximations, résolution des systèmes linéaires, des problèmes aux valeurs propres, ...etc.
- ✓ L'informatique appliquée : techniques de développement et de maintenance de grands logiciels.

### **IV.3. Code de calcul Plaxis :**

L'utilisation de lois de comportement complexes dans des modèles éléments finis pour l'ingénierie est délicate. Elle demande pour la détermination des paramètres des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie. L'intégration de telles lois dans des codes éléments finis est difficile. Le coût de ces calculs est généralement important et peu de codes sont actuellement opérationnels (LEVASSEUR, S (2007) [7]).

Pour notre problème, on a choisi d'utiliser le code de calcul Plaxis.

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, etc.

Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage) [7].

### **IV.4. Options par défaut et solutions approchées :**

Le système d'options par défaut et de solutions approchées spécifiques, est destiné à faire gagner du temps à l'opérateur, à lui éviter de devoir faire des choix tracassants, et enfin à améliorer la convivialité du logiciel. Ce système est inséparable du traitement à partir d'un menu arborescent. Ces options tiennent compte de l'expérience des numériciens en la matière. Les options par défaut commencent dès le maillage : si seules les grandes lignes de celui-ci importent, le détail des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement généré par le logiciel à partir d'un petit nombre de nœuds. De même en ce qui concerne les conditions aux limites en déplacements : si elles ont un caractère standard (vecteur déplacement nul à la base du domaine étudié et vecteur déplacement horizontal nul sur ses faces latérales), l'application peut être réalisée automatiquement (par défaut) à partir du menu avec contrôle immédiat du résultat à l'écran. L'application des contraintes initiales dues au poids des terres peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre.

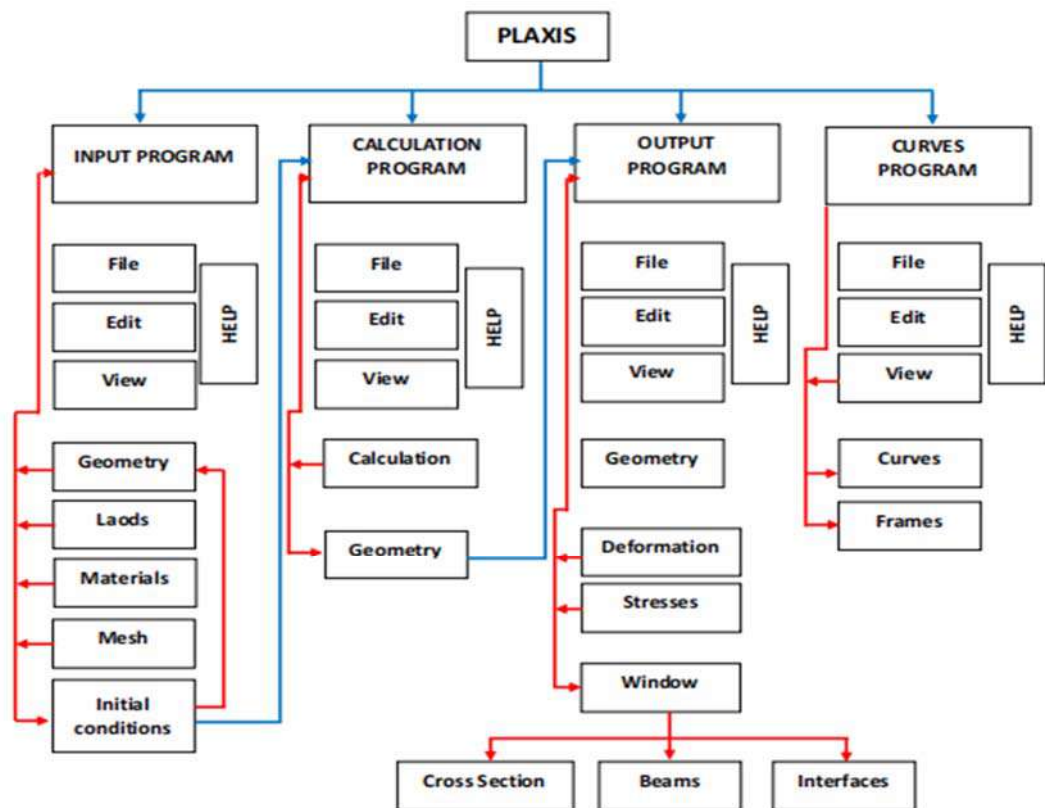
Par contre, si comme bien souvent en géotechnique on connaît ou on sait estimer un état K0 donné, celui-ci peut être spécifié directement. Dans ce cas, le massif est souvent en léger



déséquilibre (incompatibilité entre K0 et les autres caractéristiques mécaniques). Le menu permet alors, par un chargement fictif nul, de rééquilibrer le massif, puis de réinitialiser à zéro le champ de déplacement de manière à prendre comme nouvelle origine l'état du matériau après application de la gravité. L'option K0 est particulièrement intéressante (et réaliste) dans le cas d'un modèle hétérogène de surface libre presque horizontale [7].

**IV.5. les sous-programmes de plaxis :**

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves) (Figure IV.1) [7].



**Figure IV.1:** Organigramme des sous-programmes de code Plaxis. [7]

**a/ plaxis-input :**

le sous-programme Input appelé aussi le pré-processing programme contient tous les outils nécessaires à la création et modifications des modèles géométriques, à l'engendrement des maillages des éléments finis et aux définitions des conditions initiales (Figure IV.2) [7].

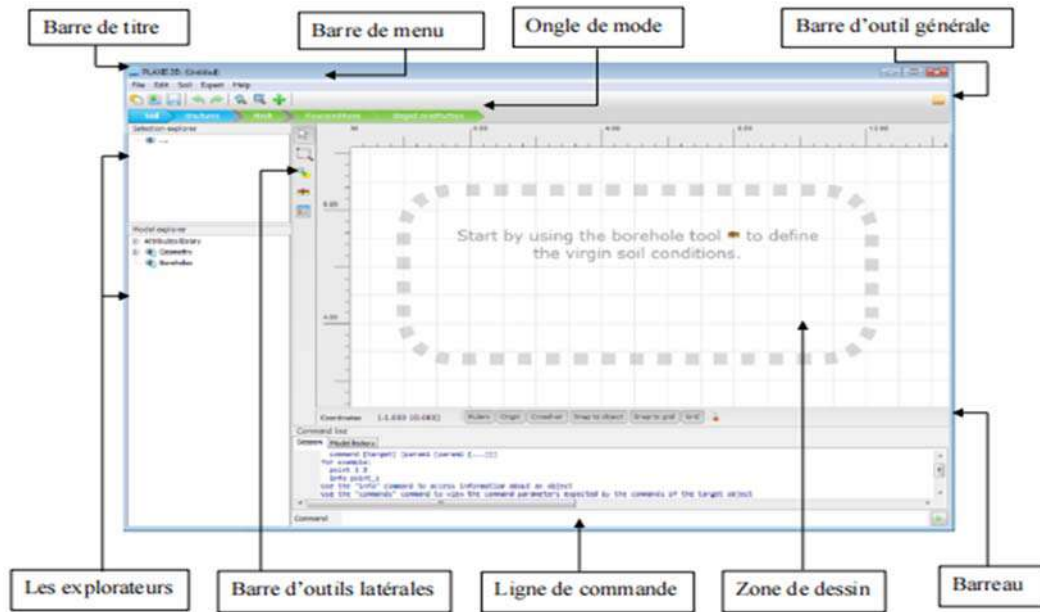


Figure IV.2: Fenêtre principale du programme d'entrée des données. [7]

**b/ plaxis-calculations :**

le processing programme ou le sous-programme de calculs contient les outils indispensables à la définition des phases et au commencement de la procédure de calcul par éléments finis (Figure IV.3) [7].

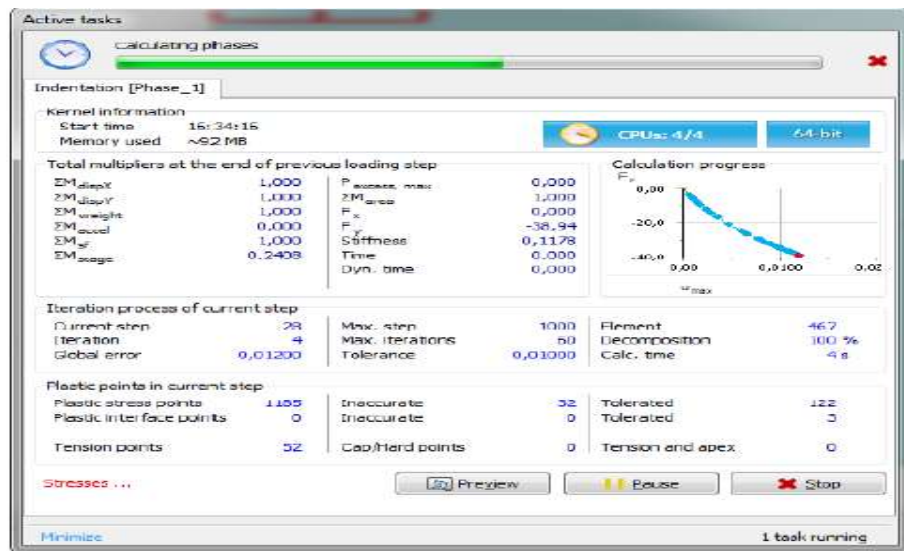


Figure IV.3: Fenêtre de calcul. [7]

**c/ plaxis-output :**

ou le programme post-processing contient les facilités pour la visualisation des résultats des différentes phases de calcul comme les déplacements au niveau des nœuds, les contraintes et les forces dans les éléments structuraux [7].

**d/ plaxis-curves :**

le sous-programme curve sert à la construction des courbes de chargement –déplacement, des chemins de contraintes, en plus de divers autres diagrammes [7].

#### **IV.6. étapes de modélisation avec plaxis :**

Nous présenterons ici le cheminement et principales étapes d'un calcul sous PLAXIS (Figure IV.4).

##### **a) Géométrie :**

La première étape sous Plaxis est la définition de la géométrie. Un certain nombre de propriétés sont disponibles :

- 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 des coquilles, des plaques pour modéliser les murs et les zones rigides. (Surtout les éléments ayant une forte extension selon l'axe perpendiculaire au plan de modélisation.
- << 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 [7].

##### **b) 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 fixée 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.

Les conditions limites pouvant être imposées sont celles qui imposent un déplacement dans une direction donnée ou celle qui impose une force dans une direction donnée. Plusieurs outils permettent de créer une large gamme de conditions limites (force répartie, force ponctuelle, encastrement, glissement, etc.) [7].

##### **c) Définition des paramètres des matériaux :**

Ensuite, il convient de définir les différentes propriétés des différents matériaux selon son type (sol et interface, plaque, ancrage, géogrille, etc...), le modèle de comportement et les différents paramètres permettant de le définir. Pour les sols, en plus de la définition des caractéristiques mécaniques, leurs interfaces avec les autres types d'éléments peuvent être paramètres, il faut également définir le comportement hydraulique du sol (drainer, non-drainer ou non poreux) [7].

#### **d) Maillage :**

Le maillage est généré automatiquement, ce qui est un point fort de Plaxis. L'opérateur peut paramétrer la finesse du maillage entre différentes options (très grossier, grossier, moyen, fin, très fin), l'opérateur peut également décider de mailler plus finement une certaine région du sol ou/et le voisinage d'un élément grâce aux options refine dans le mesh menu.

Une fois le maillage effectuée, il convient de paramétrer les conditions initiales du sol, cette procédure passe généralement par la définition d'un coefficient des terres au repos [7].

#### **e) 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 imposées, ancrage, plaque) qui correspondent à l'instant initial. Il désactive les éléments de sol qui ne correspondent pas à cet instant initial (Brinkgreave, 2003).

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

- la première qui s'appelle " initial 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) [7].

#### **f) Phase de calcul :**

Après avoir effectué l'ensemble de ces paramétrages, on peut accéder aux calculs par le bouton poussoir "calcul". L'interface "input" de << Plaxis >> se ferme et laisse la place à une nouvelle interface : "calcul". Une phase 0 est déjà calculée, cette phase correspond à l'état initial de la structure. Cette interface permet de définir le phasage de la modélisation de la construction.

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, des éléments autres que le sol (modification des paramètres entrés en input, imperméabilité et/ou la non-consolidation de certaines parois). Le niveau d'intensité et la position des conditions limites des chargements en déplacement et en contrainte peuvent également être modifiés.

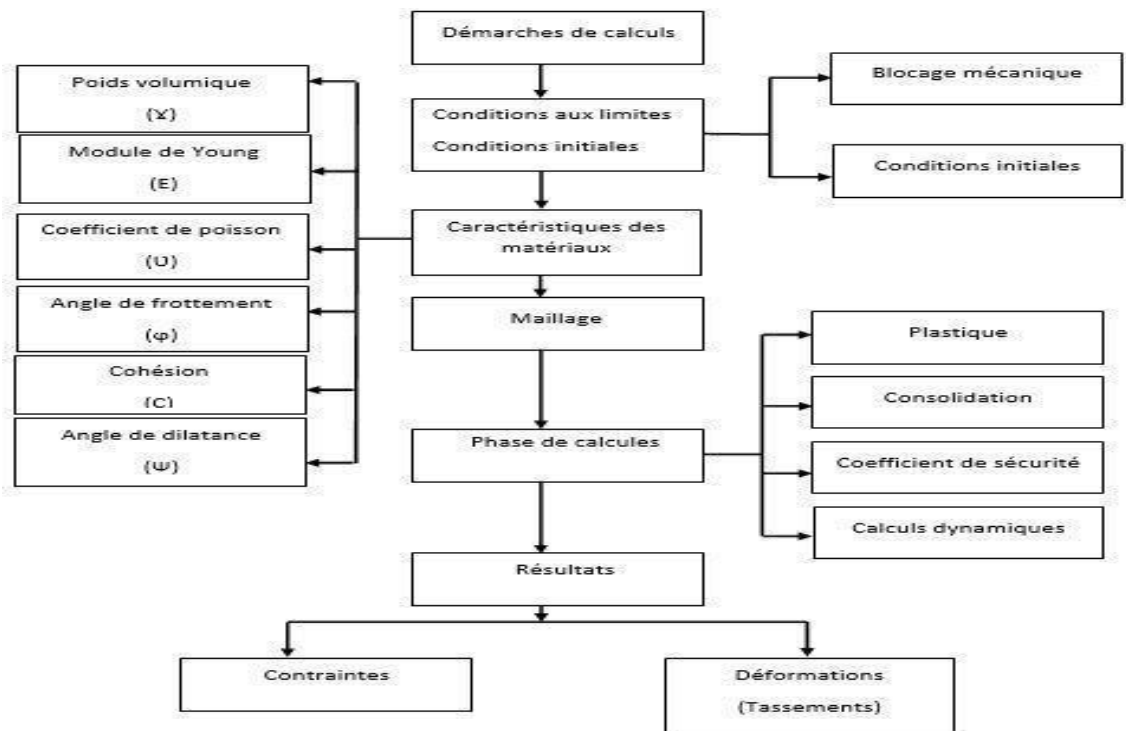
Cependant, aucun nouvel élément ne peut être créé à ce niveau que ce soit une charge, un déplacement, une condition aux limites ou une plaque un ancrage etc....,

D'autres types de phases peuvent être créés autre que la simple activation ou désactivation d'élément (phase de consolidation par exemple). Un certain nombre de types de calcul peut être simulé (consolidation, détermination du facteur de sécurité, déformation plastic, étude dynamique). Une fois le phasage de l'étude terminé, des points caractéristiques peuvent être places.

Les courbes de résultats de Plaxis seront calculées en ces points. Après avoir appuyé sur << calculate >> les calculs se lancent. Une fois terminée, les résultats sont visionnables grâce à la touche <<output>> [7].

**g) Visualisation des Résultats :**

Le code PLAXIS contient plusieurs outils pour visualiser et analyser les résultats concernant le sol soit en déformations (maillage déformé, déplacements et déformations totaux) soit en contraintes (contraintes effectives, totales, les points plastiques, les pressions interstitielles)



**Figure IV.4:** Organigramme de modélisation avec PLAXIS. [7]

### IV.7. lois de comportement dans plaxis :

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 Soil de Plaxis fait partie (LEVASSEUR, S (2007) [7].

#### IV.7.1. modèle élastique linéaire :

Le modèle élastique linéaire utilisé dans Plaxis est classique, il comporte deux paramètres de rigidité élastiques, le module de Young (E), et le coefficient de poisson ( $\nu$ ). le modèle linéaire élastique est très limité pour simuler le comportement d'un sol, il peut être employé surtout pour modéliser les éléments de structure béton ou métal en interaction avec le sol et aussi pour les problèmes de mécanique des roches.

Le modèle élastique linéaire de PLAXIS peut être employé davantage pour modéliser les éléments de structures béton ou métal en interaction avec le sol. Il peut aussi être intéressant pour certains problèmes de mécanique des roches (Figure IV.5) [7].

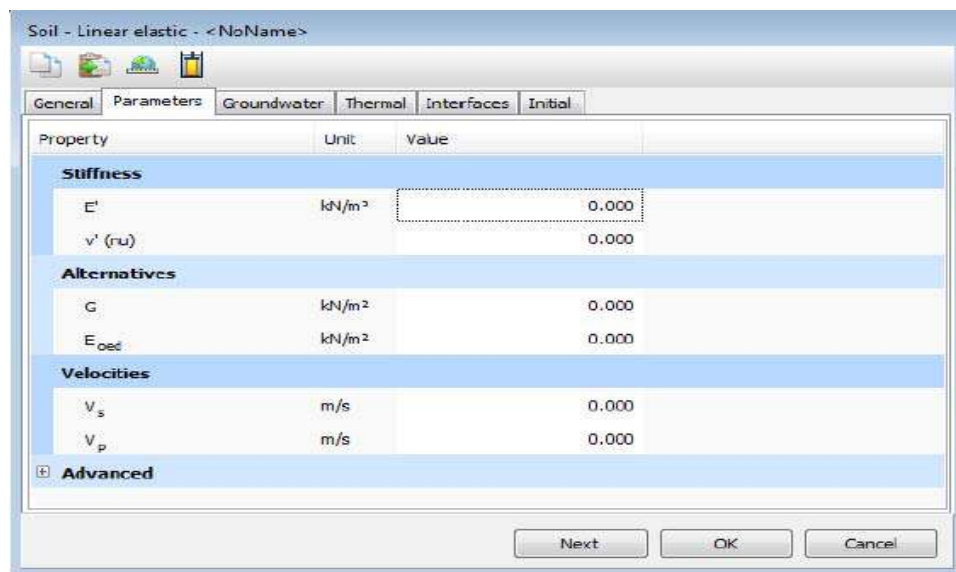
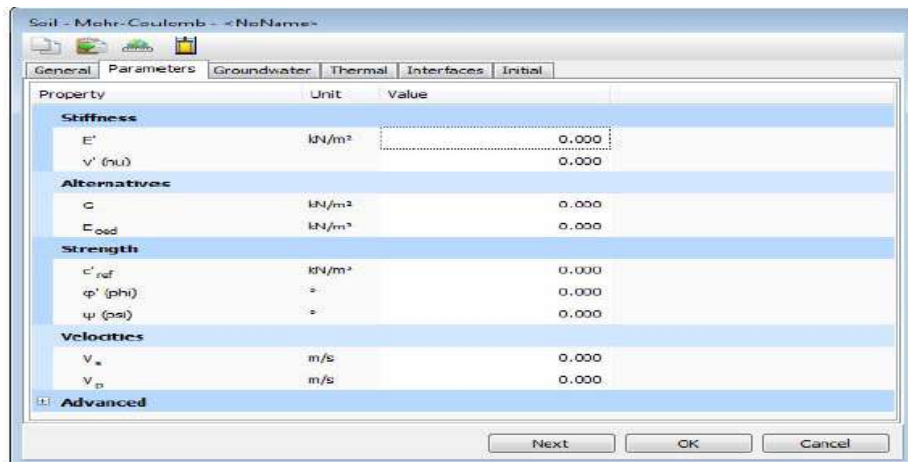


Figure IV.5: Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire. [7]

**IV.7.2. Modèle de Mohr-Coulomb :**

Ce modèle est utilisé généralement pour une première approximation du comportement d'un sol (Figure IV.6).



**Figure IV.6:** Fenêtre des paramètres du modèle mohr-coulomb. [7]

C'est un modèle élastique parfaitement plastique (sans écrouissage) nécessite la détermination de cinq paramètres qui sont : le module de Young E, coefficient de poisson ( $\mu$ ), la cohésion (C), l'angle de frottement ( $\varphi$ ), l'angle de dilatance ( $\psi$ ).

Les deux premiers (E,  $\nu$ ) sont des paramètres intrinsèques élastiques, les deux autres ( $\varphi$ , C) sont des caractéristiques mécaniques de résistance (tableau.V.1). L'angle de dilatance  $\psi$  est un paramètre relatif à la règle d'écoulement plastique. (Lamri, 2008) [7].

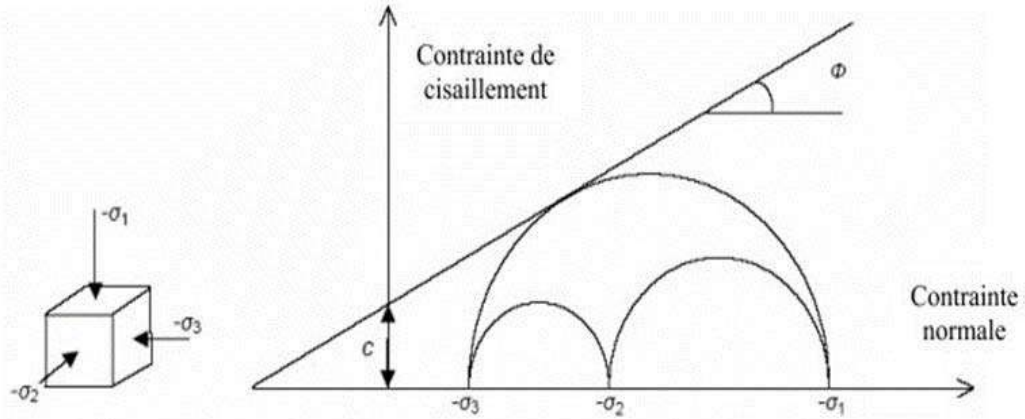
Paramètres	Module de Young	Coefficient de poisson	Cohésion	L'angle de frottement	L'angle de dilatance	Poids volumique
Symboles	E	$\mu$	C	$\varphi$	$\psi$	$\gamma$
Unités	KN/m <sup>2</sup>	/	KN/m <sup>2</sup>	degré	degré	KN/m <sup>3</sup>

**Tableau IV.1:** Les paramètres intégrés dans le modèle de Mohr-Coulomb. [7]

Dans le plan de Mohr, la courbe enveloppe est représentée par :

$$T = \sigma_n * \tan \varphi + c$$

Où  $\sigma$  et  $\tau$  sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement à la rupture sur le plan de rupture, et  $c$  et  $\phi$  respectivement le terme cohésion et l'angle de frottement du matériau (Figure V.7) [7].

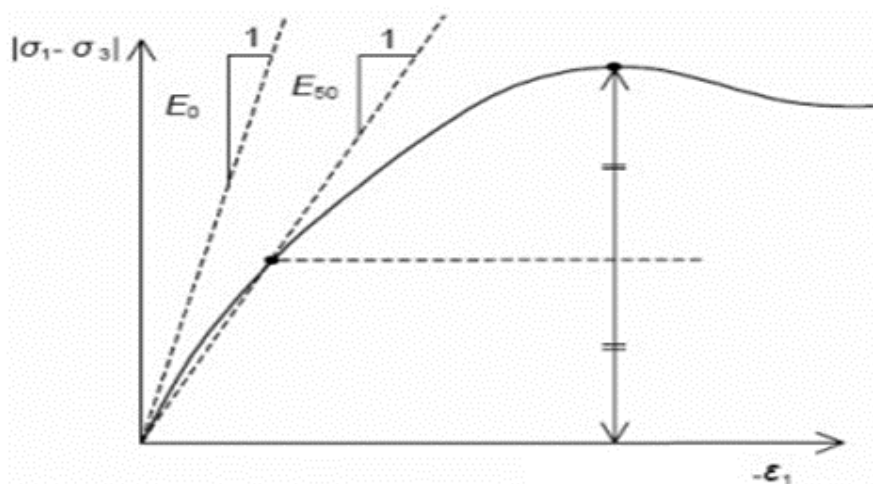


**Figure IV.7:** Courbe enveloppe du modèle de Mohr-Coulomb. [7]

**a. Le module de Young « E » :**

PLAXIS utilise le module de Young comme module de déformation de référence dans le modèle élastique et le modèle de Mohr-Coulomb. Ce module varie en fonction de la déformation et de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module de Young est constant.

Il est conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un niveau de 50 % du déviateur de rupture (Figure V.8) [7].



**Figure IV.8:** Définition du module à 50 % de la rupture. [7]

**b. Coefficient de poisson « ν » :**



On conseille une valeur de 0.2 à 0.4 pour le coefficient de poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure K0 ou chargement gravitaires). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de poisson s'approche de 0.5 sans cette valeur soit utilisable [7].

**c. L'angle de frottement «  $\phi$  » :**

L'angle de frottement est constant. Il est indépendant de la contrainte moyenne. Il peut être celui de frottement de pic ou celui de frottement du palier.

Le temps de calcul varie exponentiellement avec l'angle de frottement. Par conséquent, les angles de frottement élevés devraient être évités lors des calculs préliminaires pour un projet.

Le temps de calcul deviendra important si des angles de frottement supérieurs à 35 degrés sont utilisés [7].

**d. La cohésion « C » :**

Plaxis peut manipuler des sables sans cohésion, mais certaines options ne fonctionneront pas bien. Pour éviter les complications, il est conseillé aux utilisateurs peu expérimentés d'entrer au moins une valeur faible ( $C > 0.2 \text{ KN/m}^2$ ). Plaxis propose une option spéciale pour les couches dans lesquelles la cohésion croît avec la profondeur [7].

**e. Angle de dilatance «  $\psi$  » :**

Elle est donnée en degrés. Sauf pour les couches très sûres consolidées, les sols argileux ne présentent aucune dilatance ( $\psi=0$ ). Il peut être facilement évalué par la règle suivante :

$\Psi = \phi - 30^\circ$ , pour  $\phi > 30^\circ$  ;

$\Psi = 0$ , pour  $\phi < 30^\circ$  ;

$\Psi < 0^\circ$ , pour les sables très lâches.

Le cas où  $\psi < 0^\circ$  correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable ou liquéfaction statique). La valeur  $\psi = 0^\circ$  correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est fréquemment le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faibles ou moyenne sous contraintes assez fortes [7].

**IV.8.Conclusion :**

La modélisation numérique des ouvrages géotechniques réalisée à l'aide du logiciel PLAXIS est une approche simplifiée de la réalité géométrique de l'ouvrage.

Les modèles introduits dans les codes de calcul en éléments finis permettent la résolution des problèmes liés aux tassements, à la consolidation et à la rupture des sols.

*Chapitre V:*  
*modélisation*  
*numérique*

### **V .1. Introduction :**

La conception d'un mur en paroi doit se faire dans le cadre des trois fonctions principales : le soutènement, l'étanchéité et la fondation profonde.

On peut concevoir une paroi moulée en tant que mur de soutènement, en dégarnissant une des faces de la paroi, l'autre face étant soumise aux poussées du sol. En cas d'insuffisance de la fiche pour reprendre les efforts de butée, on ancre la paroi par des tirants disposés en lits à plusieurs niveaux.

la réalisation d'un panneau de paroi moulée comprend trois principales

#### **les étapes :**

- ✓ une phase d'excavation pendant laquelle le sol est soutenu par une boue de bentonite
- ✓ une phase de bétonnage, durant laquelle le béton fluide se substitue à la boue
- ✓ une phase de prise du béton

Le station est constitué par un assemblage de panneaux de paroi moulée de 2.8m de long, de 1,20m d'épaisseur et de 50 m de profondeur ancrés dans le substratum. La paroi est surmontée par une poutre de couronnement en béton armé, munie d'un masque d'accostage de 9,10m de hauteur.

Dans cette projet on a réalisé 51 écran et Le bute de notre étude qui on a modéliser par élément finis par le code de calcul Plaxis 3D connaître le comportement des parois moulées pendant l'excavation . les paramètres géotechniques à utiliser pour chaque formation dans les calculs pour le dimensionnement des structures sont ceux présentés dans le tableau suivant .

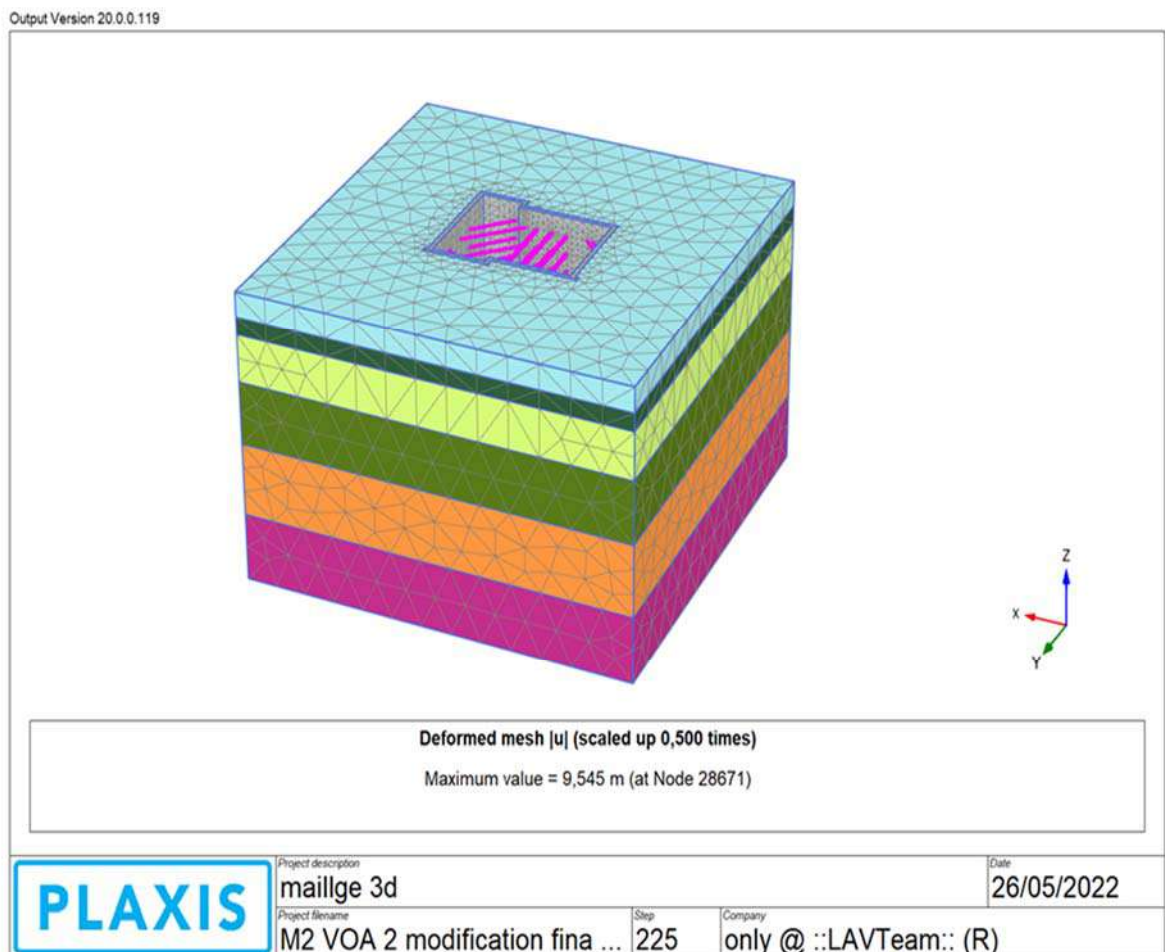
### **V .2.Modélisation :**

Les principaux choix de modélisation consistaient `a se placer dans l'hypothèse des d'formations planes représenter de manière d'entallée, considérer l'interface entre le sol et la paroi comme parfaitement adhérent. Les résultats de cette modélisation ont fait apparaitre une allure de cinématique assez différente de celle montrée par les mesures (notamment pour les premières phases de travaux). Par ailleurs, le choix les phase de construction, paramètre difficile `a appréhender On a donc réalise une simulation, en essayant d'améliorer les points qui avaient pose problème . [10]

On se place `a nouveau dans le cadre des d'formations planes, et on choisit de d'découpler le problème statique. De plus, l'interface entre le sol et la paroi est traitée de manière `a pouvoir gérer le déformation et les contraintes .

Dans notre travail, On a utilise maillages différents, `a cause du type d''éléments utilise pour d'écrire le contact entre le sol et les écrans de soutènement. Ici, les calculs sont effectués avec différents types de maillage. Afin de limiter les problèmes numériques, on a favorise les 'éléments quadrilatères autant que possible.

L'interface entre le sol et la paroi , est composée d'une part d'une couche d'éléments spéciaux dont le but est de modéliser un contact adhérent ou glissant parfait lorsqu'ils sont actives, et d'autre part, d'une couche d'éléments minces caractérisée par des paramètres de résistance faibles. Les premiers calculs sont effectués en conseil 'errant un contact adhérent entre la paroi et le sol.



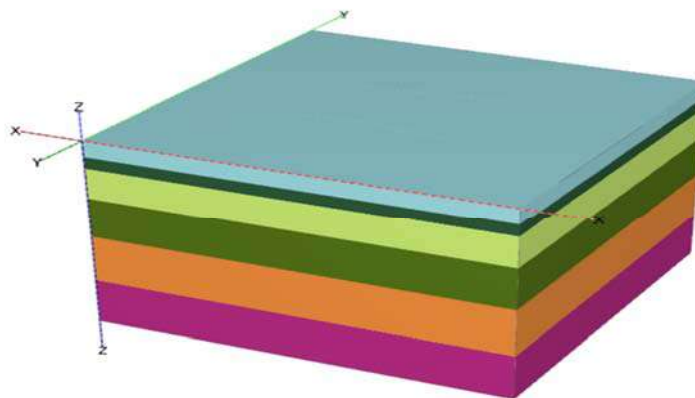
**Figure V.1:**Le maillage

Le calcul est effectuée avec le logiciel PLAXIS 3D. La modélisation comporte 9 phases et une phase d'initialisation. Les contraintes initiales sont supposées géostatiques. La paroi a un comportement élastique linéaire. Les sols suivent le modèle de Mohr-Coulomb.

Horizon géotechnique	Remblais (R)	Argiles limoneuses (Qa)	Sables limoneux-argileux parfois mêlés de cailloux (Qs)	Argiles merneuses (Qm)	Sables fins, moyennes à grossiers, jaunâtre avec présence de grès sous-forme de fragments (Ts)	Marnes verdâtres à grisâtres (Tm)
Profondeurs moyennes (m)	0,0 – 5,5	5,5 – 9,5	5,5 – 29,5	11,3 – 28,50	30,5 – 34,0	60,0 – 63,5
Poids vol. humide $\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	20,0	20,0	20,0	21,0	21,0	20,0
Poids vol. sec $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,0	17,0	17,0	17,5	18,0	17,0
Cohésion non-drainée $s_u$ (kPa)	30	$48 + 5,6 \cdot (z - 2,5)$	-	$154 + 2,4 \cdot (z - 11,5)$	-	$220 + 2,4 \cdot (z - 56,6)$
Module de déformabilité non-drainé $E_u$ (MPa)	12	$29 + 3,3 \cdot (z - 2,5)$	-	$93 + 1,45 \cdot (z - 11,5)$	-	$132 + 1,7 \cdot (z - 56,6)$
Angle de frottement effectif $\varphi'$	20	21	32	22	34	22
Cohésion effective $c'$ (kPa)	5	25	10	35	10	35
Module de déformabilité drainé $E'$ (MPa)	10	32	35	90	100	104
Coefficient $K_0$	0,65	0,65	0,5	0,65	0,5	0,6

**Tableau V.1 :** Paramètres géotechniques de calcul considérés

Ces paramètres géotechniques de calcul qui permettent la réalisation des couches de sol .



**Figure V.2 :** Les couches de sol

Et dans la prochaine étape , L'excavation de la paroi dans le terrain. durant laquelle le béton fluide se substitue à la boue et après prise du béton .

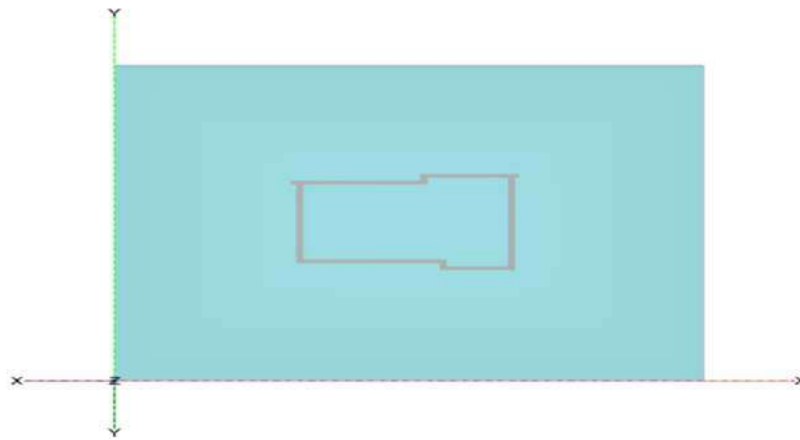


Figure V .3 : Les parois après la phase de prise du béton

Dans le cas de la Station Hacem Badi, la profondeur prévue pour les parois moulées est d'environ 50,0 m. et l'épaisseur de la paroi (1,20 m) la longueur 2.8 m

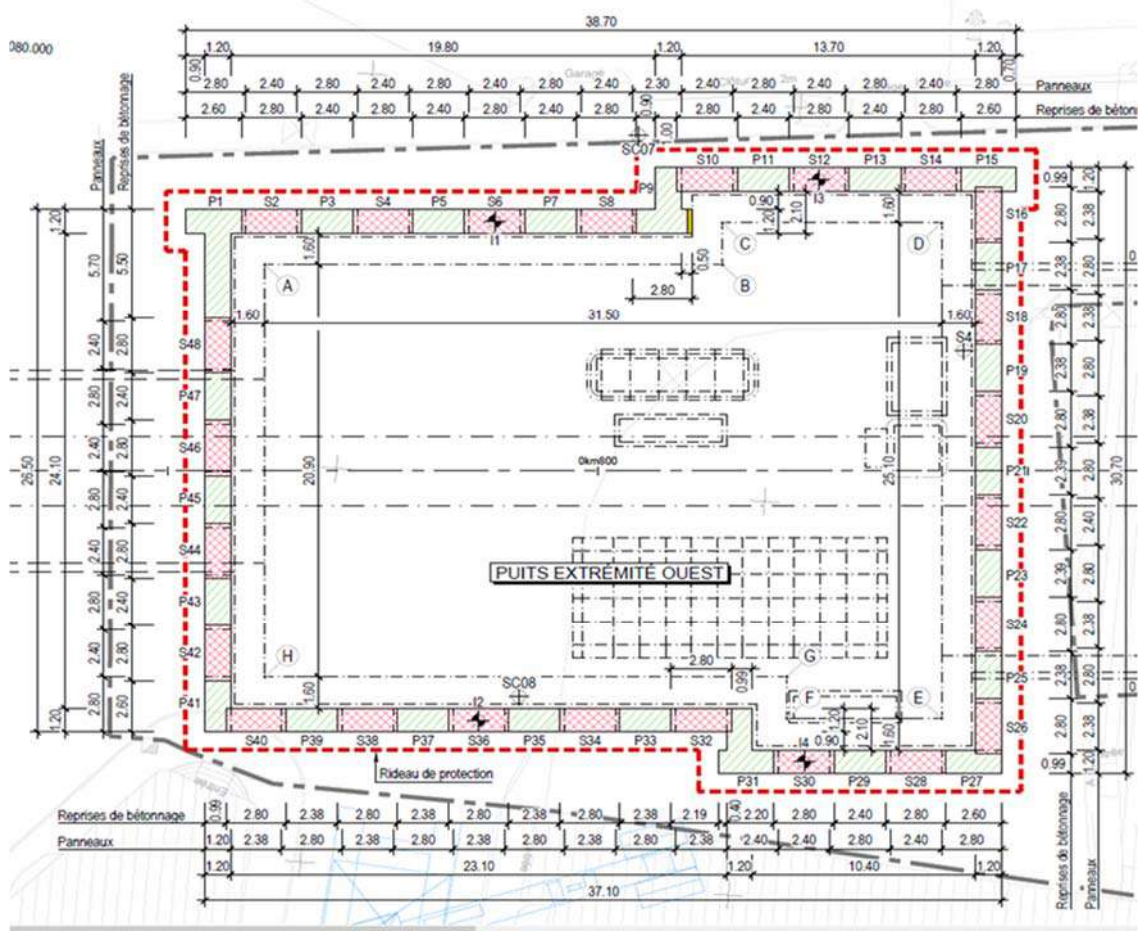
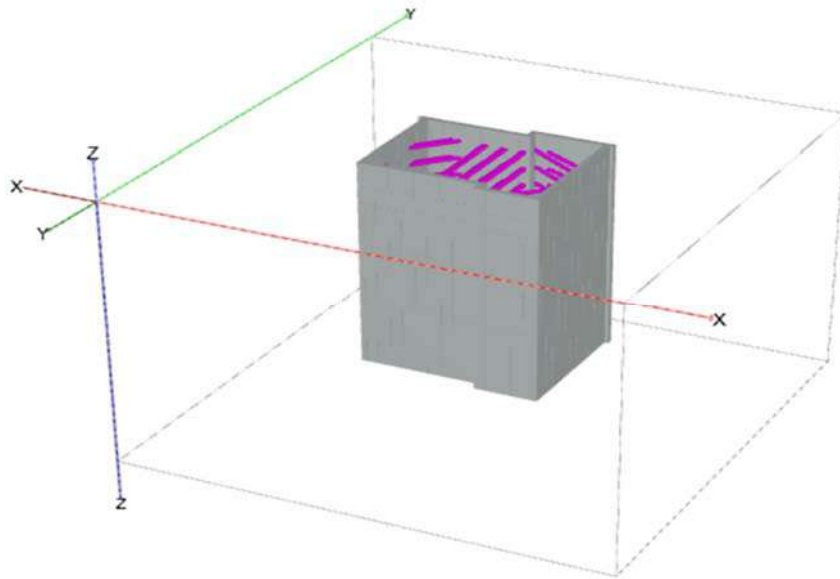


Figure V .4 : Les dimensionnements des parois

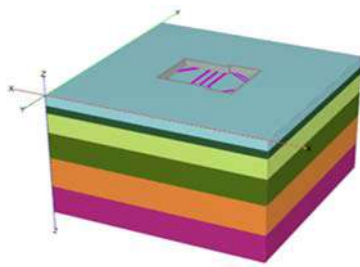


**Figure V.5:** L'ouvrage complet

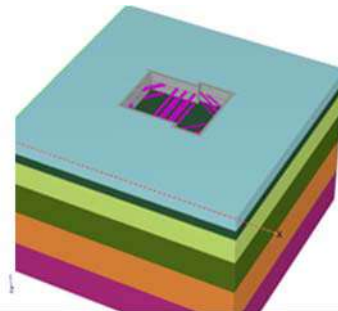
### **V.3. Les phases d excavation :**

On a excavé jusqu'à une profondeur de 40 m ou nous avons divisé l'opération en 9 phases d'excavation. En chaque phase excavé jusqu'à une profondeur de 4 m et place des butons HBE 500.





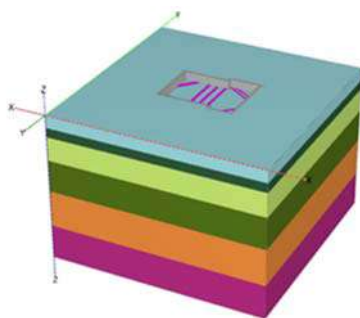
**FigureV.6:**Excavation  
niv 01



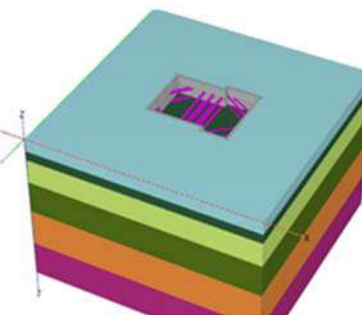
**FigureV7:**Excavation niv  
02



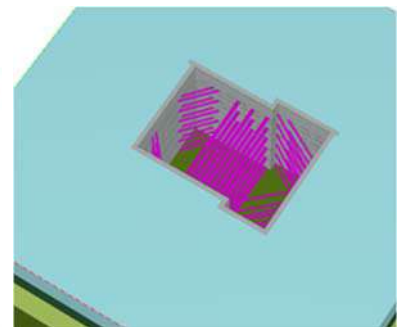
**FigureV.8:**Excavation  
niv 03



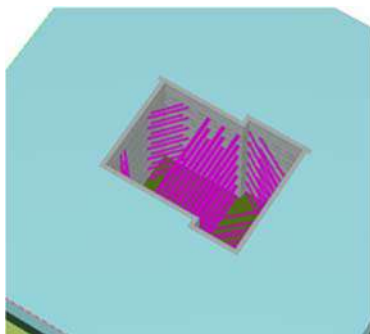
**FigureV.9:**Excavation  
niv 04



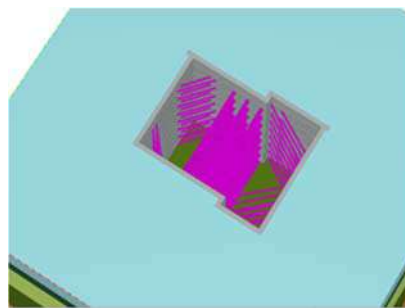
**FigureV.10:**Excavation  
niv 05



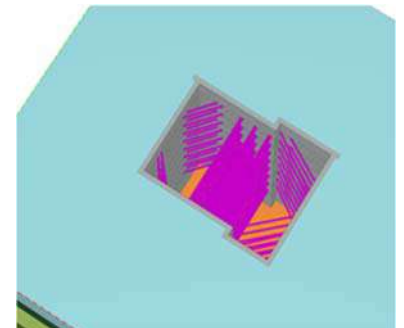
**FigureV.11:**Excavation  
niv 06



**FigureV.12:**Excavation  
niv 07



**FigureV.13:**Excavation  
niv 08



**FigureV.14:**Excavation  
niv 09

#### V.4. Les résultats :

On présente les déplacements horizontaux de la paroi comparés aux valeurs mesurées par plaxis 3d . On a choisi les 09 phases. La phase 09 représente la fin de l'excavation devant la paroi.

Les déplacements de la paroi sont étudiés sur une coupe au "centre" de la paroi s8 . Les valeurs négatives des déplacements correspondent aux déplacements vers le bassin (partie devant la

paroi) et les valeurs positives correspondent aux déplacements vers les terrains. Le sens des déplacements est bien cohérent avec le d'chargement du sol côté excavé.

Les résultats que nous avons obtenus ils identifié des 13 nouds qui représente tout la profondeur du l écran (50 m). Nous divisons les résultats en trois phases ( phase avant l'excavation et pendant l'excavation ; après l'excavation ).

#### V.4.1 Avant l excavation :

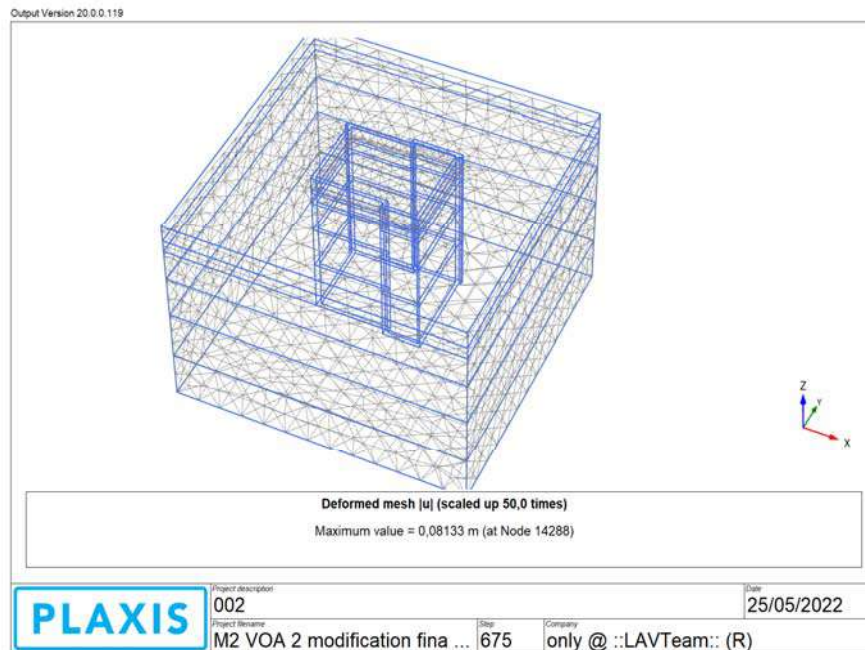


Figure V.15 :le maillage

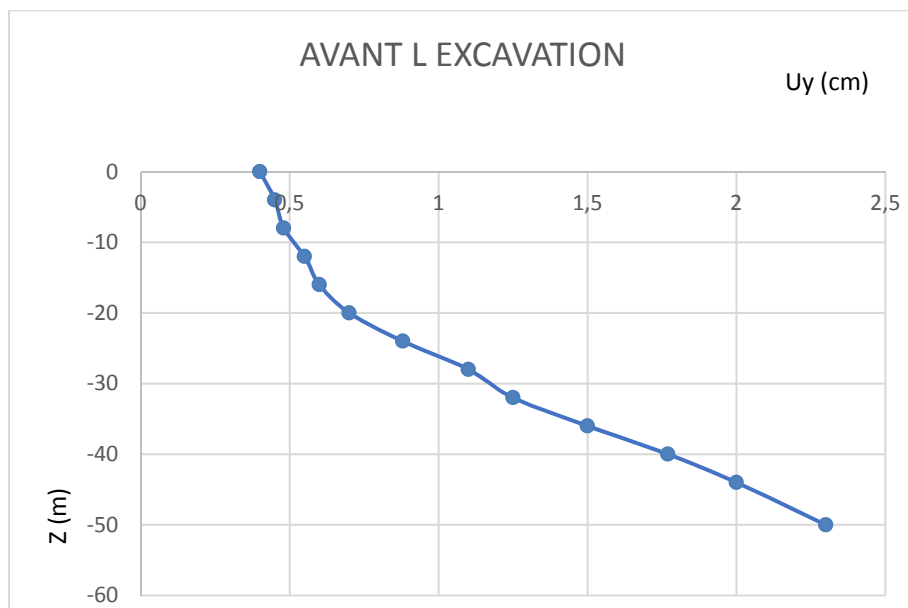


Figure V.16 : Courbe de déformation des parois avant l'excavation

Nous notons a travers cette courbe que la déplacements au point 0 m a été estimée a 0.4 cm et a continué d'augmenter jusqu'à la valeur 2.3 cm a la profondeur de 50 m .

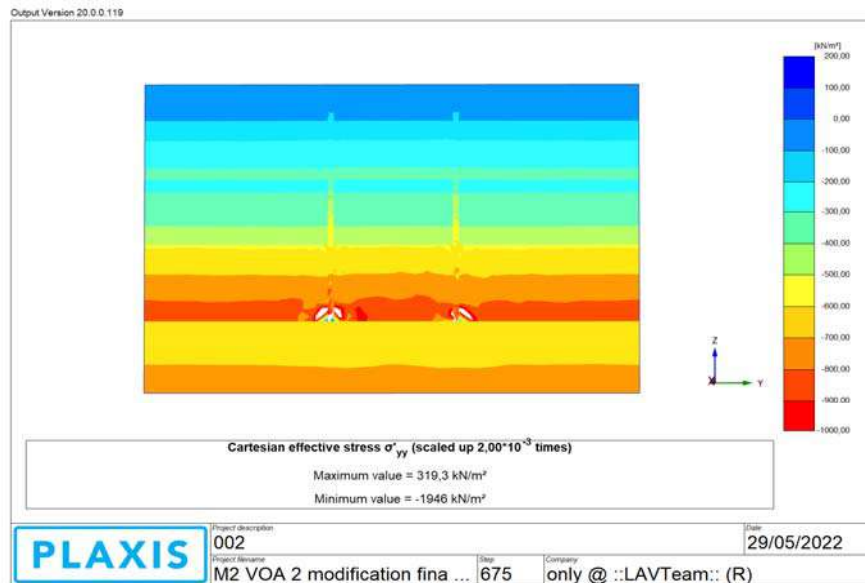


Figure V .17 : Les Contrainte avant l’excavation

**V.4.2. pendant l’excavation :**

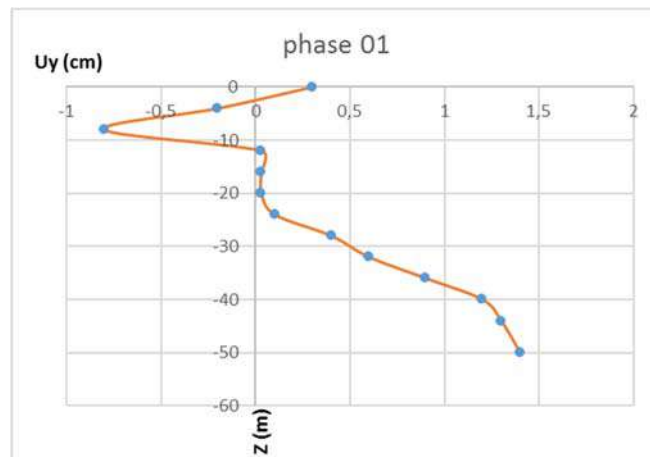
Cette phase est la plus importante de notre étude , car elle nous permet de connaître la réaction des parois au processus d’excavation et de connaître les stades de déformation .

Les phasages d’excavation divise en 09 phases chaque phase on va l exprimerons avec une courbe de déplacements.

PHASE 09	PHASE 08	PHASE 07	PHASE 06	PHASE 05	PHASE 04	PHASE 03	PHASE 02	PHASE 01	Z
0,75	0,52	0,67	0,68	0,65	0,25	0,28	0,2	0,3	0
0,65	0,41	0,48	0,45	0,28	0,1	0	-0,1	-0,2	-4
0,56	0,35	0,38	0,3	0,18	-0,04	-0,17	-0,35	-0,8	-8
0,5	0,27	0,26	-0,11	-0,05	-0,15	-0,55	-1,2	0,03	-12
0,38	0,18	0,09	-0,11	-0,3	-0,4	-1,9	-2	0,03	-16
0,15	0,01	-0,24	-0,45	-0,9	-1,5	-3,2	-2,5	0,03	-20
-0,32	-0,3	-0,65	-1,2	-3,9	-2,5	-4,1	-2,7	0,1	-24
-0,85	-0,75	-1,7	-5	-7	-3,1	-4,6	-2,6	0,4	-28
-2,5	-1,85	-6,5	-9	-10	-3,2	-4,6	0,03	0,6	-32
-10	-7,5	-12,5	-13	-12	-3,1	-4,3	0,4	0,9	-36
-19	-13,5	-17,8	-16	-14	-2,8	0,1	0,7	1,2	-40
-28	-19	-22	-19	0	0,1	0,5	0,9	1,3	-44
-50	-27,5	-30	0,01	0,2	0,4	0,7	1	1,4	-50

Tableau V.2 : les déplacements

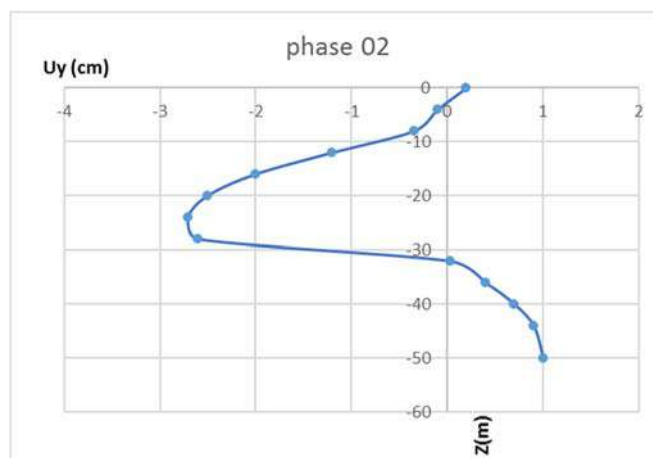
### V.4.2.1.Phase 01 :



**Figure V .18 :** courbe de déplacement phase 01

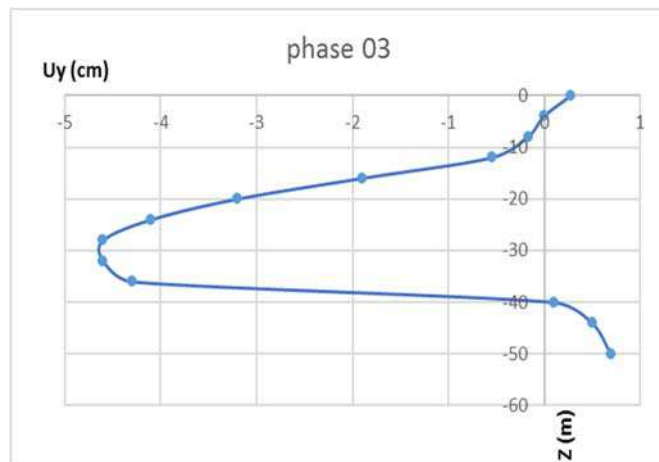
dans cette phase Nous notons que le déplacements a profondeur 0 m a été estimée a 0.3 cm .et a profondeur -8 m a été estimée a -0.8 cm . et continué d'augmenter jusqu'à la valeur 1.4 cm a la profondeur de 50 m .

### V.4.2.2.Phase 02 :

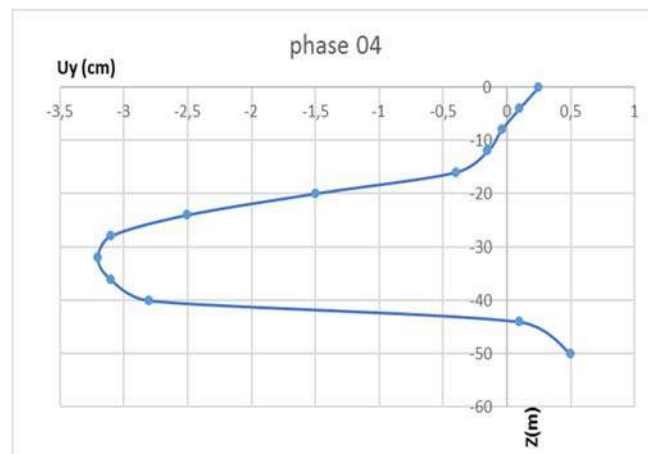


**Figure V .19 :** courbe de déplacement phase 02

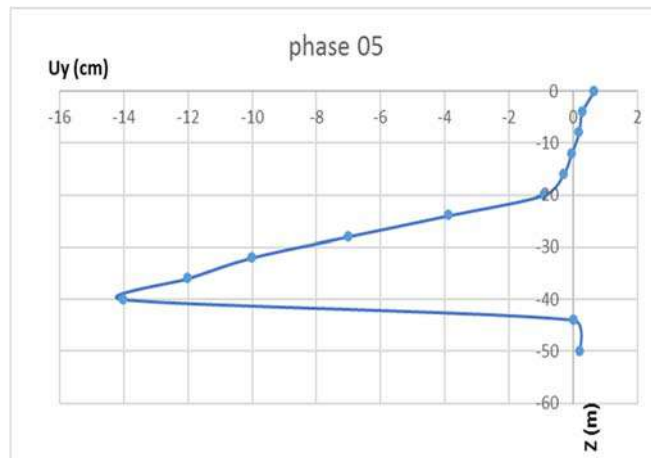
Dans cette phase Nous notons que le déplacements a profondeur 0 m a été estimée a 0.2 cm et a profondeur -8 m a été estimée a -0.35 cm . et continué d'augmenter jusqu'à la valeur -2.6 cm a la profondeur de -28 m . en profondeur -32 m a été estimée 0.03 cm et continue d'augmenter jusqu'à la valeur 1 cm a la profondeur -50 m .

**V.4.2.3.Phase 03 :****Figure V .20 :** courbe de déplacement phase 03

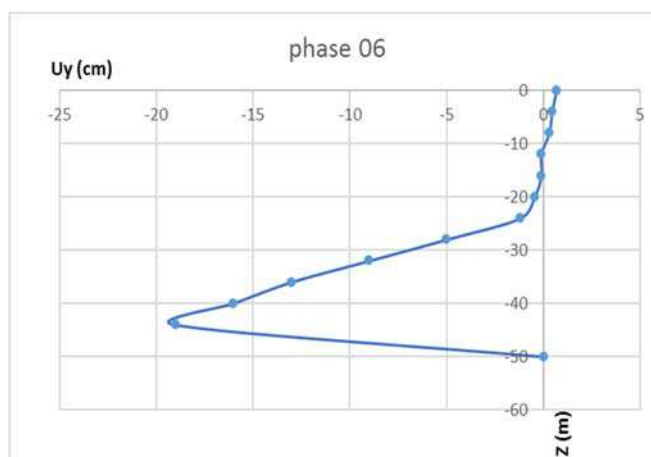
Dans cette phase Nous notons que le déplacements a profondeur 0 m a été estimée a 0.28 cm .et a profondeur -8 m a été estimée a -0.17 cm et continué d'augmenter jusqu'à la valeur -4.3 cm a la profondeur de -36 m . en profondeur -40 m a été estimée 0.1 cm et continue d'augmenter jusqu'à la valeur 0.7 cm a la profondeur -50 m .

**V.4.2.4.Phase 04 :****Figure V .21 :** courbe de déplacement phase 04

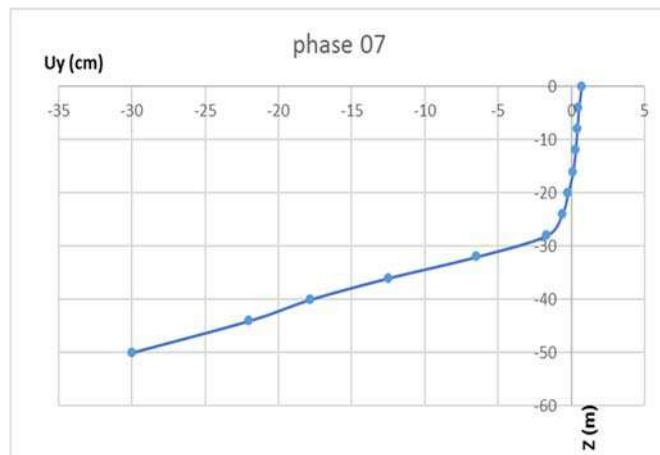
Dans cette phase Nous notons que le déplacements a profondeur 0 m a été estimée a 0.25 cm .et a profondeur -8 m a été estimée a -0.04 cm et continué d'augmenter jusqu'à la valeur -3.1 cm a la profondeur de -36 m . en profondeur -40 m a été estimée -2.8 cm et continue d'augmenter jusqu'à la valeur 0.5 cm a la profondeur -50 m .

**V.4.2.5.Phase 05 :****Figure V .22 :** courbe de déplacement phase 05

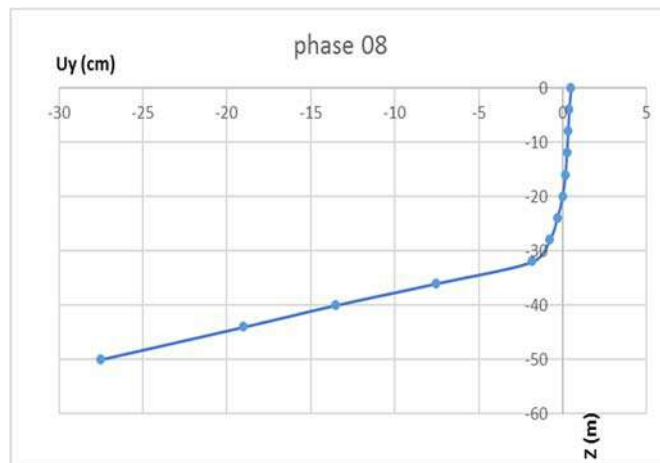
Dans cette phase Nous notons que le déplacements a profondeur 0 m a été estimée a 0.65 cm .et a profondeur -12 m a été estimée a -0.05 cm et continué d'augmenter jusqu'à la valeur -14 cm a la profondeur de -40 m . en profondeur -44 m a été estimée 00 cm et continue d'augmenter jusqu'à la valeur 0.2 cm a la profondeur -50 m .

**V.4.2.6.Phase 06 :****Figure V .23 :** courbe de déplacement phase 06

Dans cette phase Nous notons que le déplacements a profondeur 0 m a été estimée a 0.68 cm .et a profondeur -12 m a été estimée a -0.11 cm et continué d'augmenter jusqu'à la valeur -19 cm a la profondeur de -44 m . en profondeur -50 m a été estimée 0.01 cm .

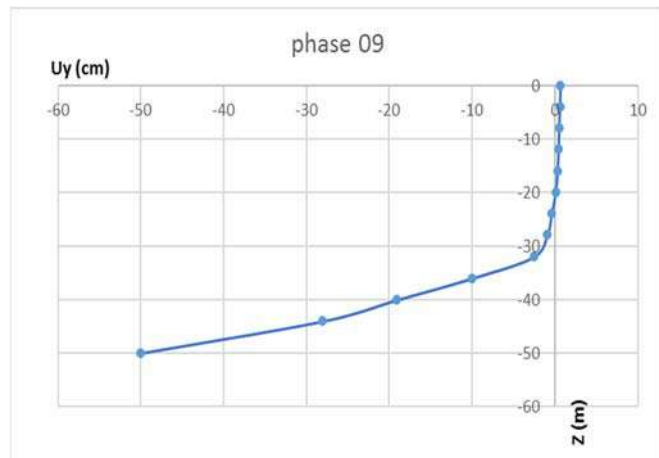
**V.4.2.7.Phase 07 :****Figure V .24 :** courbe de déplacement phase 07

Dans cette phase Nous notons que le déplacements a profondeur 0 m a été estimée a 0.67 cm .et a profondeur -20 m a été estimée a -0.24 cm et continué d'augmenter jusqu'à la valeur -30 cm a la profondeur de -50 m .

**V.4.2.8.Phase 08 :****Figure V .25 :** courbe de déplacement phase 08 .

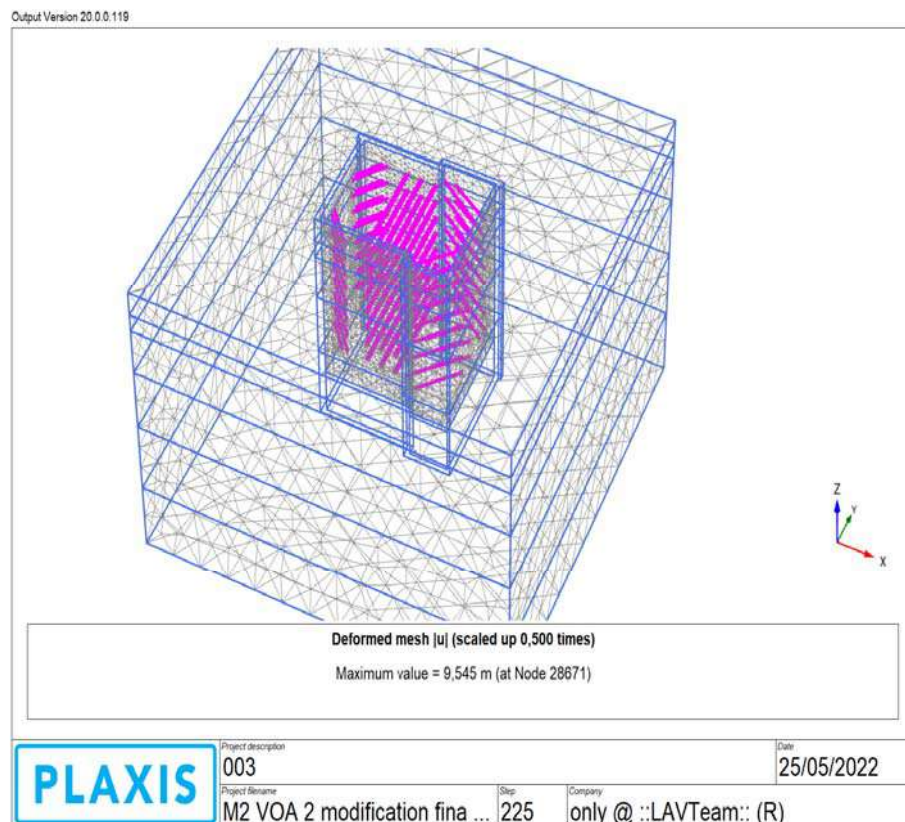
Dans cette phase Nous notons que le déplacements a profondeur 0 m a été estimée a 0.52 cm .et a profondeur -24 m a été estimée a -0.3 cm et continué d'augmenter jusqu'à la valeur -27.5 cm a la profondeur de -50 m .

### V.4.2.9.Phase 09 :



**Figure V .26 :** courbe de déplacement phase 09

Cette phase est la fin d'excavation. Nous notons que les déplacements à profondeur 0 m ont été estimés à 0.75 cm, et à profondeur -24 m ont été estimés à -0.32 cm, et continuent d'augmenter jusqu'à la valeur -45 cm à la profondeur de -50 m.



**Figure V .27:** le maillage 3D



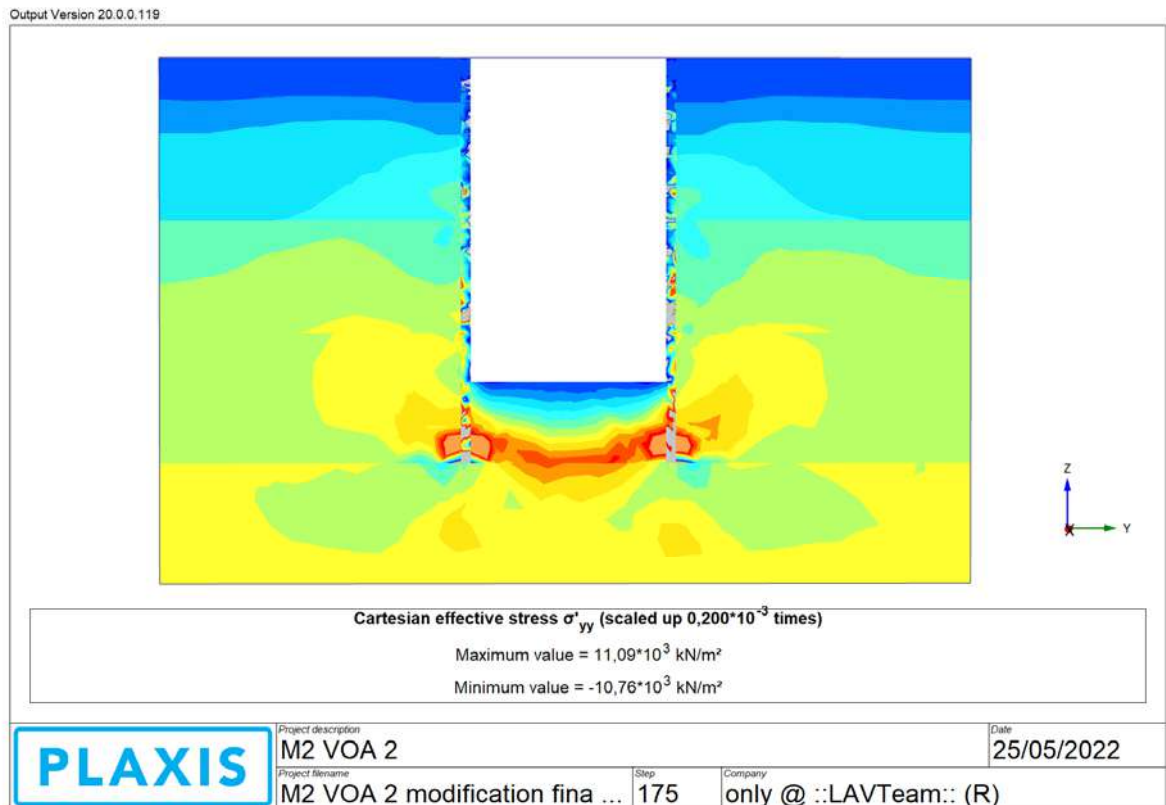


Figure V .28:Les contrainte dans la phase final

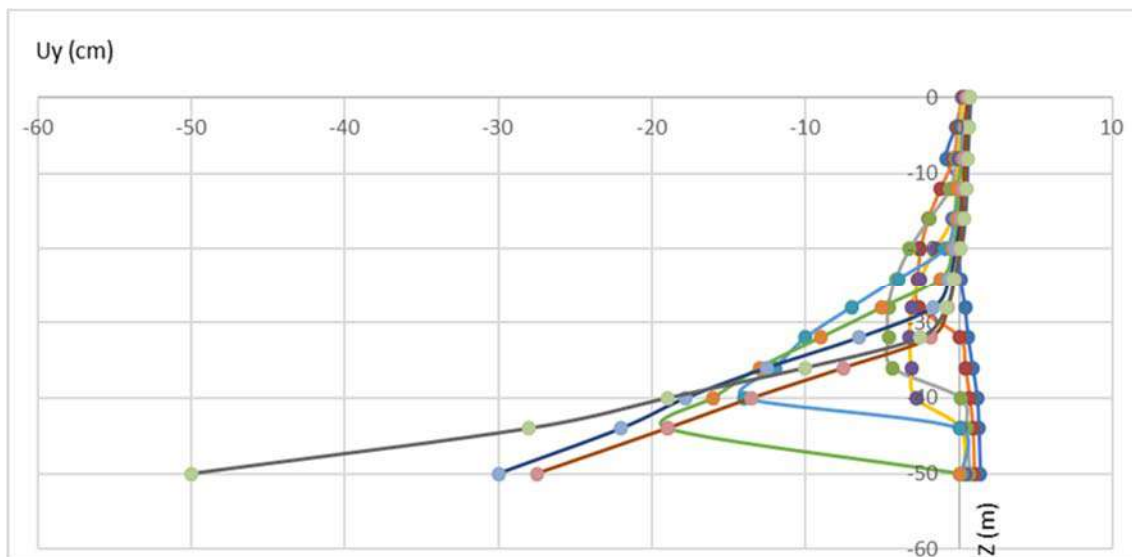


Figure V .29 :Les courbes de déformations pendant l’excavation

Après la comparaison des courbes de déplacements on trouve que la déformation augmentent au lieu du l’excavation qu’ elle sont faibles dans le point  $z=0$  et dans la fiche et Soyez dans l’inverse sens de l’excavation.

Ces résultats appartiennent les phase 1,2,3,4,5,6. Après la phase 07 jusqu'à la phase 09 la déformation augmentent jusqu'à la fin et restent dans la même direction de l'excavation.

mentales et des résultats de modélisation numérique à l'aide du logiciel plaxis 3d et l'étude de sensibilité des paramètres permettent les conclusions suivantes :

- Avec un modèle de sol élasto-plastique simple utilisant l'élasticité linéaire, les déplacements de la paroi sont fortement influencés par la profondeur de l'excavation . doit être choisi une méthode d excavation en adéquation avec les caractéristique du sol
- L'utilisation des butons passifs présente le risque d'une raideur effective plus faible que la raideur théorique en raison des jeux d'assemblage lierne-paroi et béton-lierne ce qui réduit l'efficacité du rôle des butons pour limiter les déplacements de la paroi. Les butons actifs permettraient de réduire voire même d'éliminer l'effet des jeux d'assemblage des appuis .
- L'état de l'interface sol-paroi a une influence importante sur le déplacement de la paroi et les efforts dans les butons. Une interface lisse favorise les déplacements et mobilise plus les butons contrairement à une interface rugueuse.
- Il apparaît que la cohésion joue un rôle important dès lors qu'elle est prise en compte, même pour des valeurs faibles : sa détermination devra donc faire l'objet d'une attention particulière.

### **V.5. Conclusion :**

On a établi un calcul de référence pour un projet donné ; ce calcul de référence est une approximation raisonnable de la réalité.

On a fait varier individuellement plusieurs paramètres géotechniques et de calcul, et étudié leur influence Globalement, les résultats obtenus par cette modélisation numérique sont assez satisfaisants 'pour les premières phases.

## **Conclusion générale**

Après une étude détaillée de notre projet qui consiste à l'étude et modélisation d'une paroi de soutènement en cas de l'excavation, et l'estimation de comportement des parois dus aux excavations profondes qui jouent un rôle très important dans cette étude et vue que leurs effets sur les ouvrages existants. L'estimation de comportement des parois dus aux excavations profondes a été faite par méthode des éléments finis, l'étude paramétrique est très précieuse, elle peut compenser les aléas des investigations géotechniques du terrain. Cependant, la collecte et l'analyse de données expérimentales pertinentes pour faire évoluer et valider les méthodes de simulation numérique restent des conditions fondamentales pour progresser dans ce domaine. Il est également important d'attirer l'attention sur le modèle de calcul de référence pour la paroi moulée en utilisant le logiciel PLAXIS 3D. Enfin, ce projet de fin d'étude nous a permis d'acquérir des expériences sur l'étude paramétrique en considérant d'autres facteurs pouvant affecter la performance d'une excavation profonde tels que le type de support, l'abaissement de la nappe phréatique,...etc., de dimensionnement, et de réalisation d'un paroi moulée, la validation des résultats numériques par des mesures in-situ, et aussi nous a permis d'élargir nos connaissances dans le domaine des murs de soutènement qui représentent l'avenir de construction dans le domaine de géotechnique, ainsi que la manipulation de plusieurs outils de calcul.

**Références Bibliographiques :**

- [01]SAADI Riadh- modélisation numérique d'une paroi de soutènement en zone urbaines. Thèse de Magister, Université de Batna.
- [02]Rapport technique / Domaine des travaux spéciaux .
- [03] Chouiter Amar- Contribution à l'étude numérique du comportement d'une paroi moulée tirantée. Thèse de Magister Université Mohamed Boudiaf - M'sila .
- [04]Magnan J.P. : « Géotechnique 1ère année », tome 2, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 1997.
- [05] Projet : étude d'exécution station hacen badi phases de blindage et d'excavation hypothèses et modes opératoires .
- [6] "Reference manual," Plaxis v8, pp. 30-31.
- [7] AMARI Messad, Effet du séisme sur les ouvrages souterrain – Cas de station de nouveau terminal d'aéroport d'Alger, Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2021.
- [8] Boulon M., Flavigny E., Malecot Y. et ... : « Pratique éclairée des éléments finis en géotechnique », document 1, Laboratoire 3S et Terrasol, décembre 2004.
- [9] DJABRI Mohamed- Analyse numérique du comportement dynamique des remblais d'accès en sol renforcé Thèse de Doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra
- [10] Modélisation numérique par rétro-analyse du comportement des parois moulées butonnées