



République algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur

جامعة عمار تليجي الأغواط  
Université Amar Telidji - Laghouat



**FACULTE : D'ARCHITECTURE ET DE GENIE CIVIL**

**DEPARTEMENT DU GENIE CIVIL**

## **MEMOIRE DE MASTER**

*DOMAINE : Sciences et techniques*

*FILIERE : Travaux publics*

*OPTION : Voies et ouvrages d'art*

### **Etude de La stabilité d'une paroi moulée avec une excavation profonde**

**Présenté et soutenu par :**

- ❖ **HAZEL Abd El Kader**
- ❖ **KHADROUNE Mohamed Abd El Jalil**

**Jury de soutenance :**

Mr. ZIREGUE Ahmed	MCA	Président
Mr. BACHIRI Attia	MCA	Examineur
Mr. ANNANE Abdallah	MCB	Encadreur
Mr. RACHIDI Nouari	MAA	Co-encadreur

**Année universitaire 2023-2024**

## ***REMERCIEMENTS***

Nous remercions Allah de nous avoir donné volonté et courage.

Nous vifs remerciement à notre enseignante Monsieur ANNANE Abdallah et Mr RACHIDI Nouari, pour ses conseils, son aide et ses explications, qu'elle trouve ici

l'expression de notre profonde gratitude

A Monsieur le Président DR. ZIREGUE AHMED et Monsieur  
Examineur DR. BACHIRI ATTIA

Nous remercions chaleureusement Monsieur BENDIMA MOHAMED pour nous avoir orienté, aidé et conseillé tout au long de notre stage.

Nous tenons à remercier également monsieur HOUSIN pour ses explications, sa patience et de pédagogie.

Nous n'oublions pas non plus tous les enseignants du  
Département de Génie Civil

Nous grands remerciement vont à l'ensemble du personnel de  
la direction DeCOSIDER M28

## *DÉDICACES*

Nous dédions cet humble travail à Chers parents.

Nous espérons également que cet humble travail sera l'accomplissement de vos désirs bien formulé ,Tu innombrables sacrifices, même si nous ne vous paierons jamais assez.

Que Dieu Tout- Puissant vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À toutes chères sœurs et à tous les frères, nous vous remercions pour votre compréhension et vos encouragements, qui ont été pour nous le principal soutien, et nous vous souhaitons beaucoup de bonheur et de

réussite dans votre vie. Merci pour les bons conseils et le soutien moral qui nous ont beaucoup aidés pendant cette période.

Pour toutes nos familles, petites et grandes, J'espère que vous trouverez dans cet acte humble une expression de notre amour.

A tous les professeurs qui ont contribué à notre formation.

Nous voudrions enfin remercier toutes les personnes qui ont cru en nous et qui nous ont donné envie à partir en avant

A Mes frère ZBARI, BLGASMI, DINE, HADOU , EL GHOTB  
,HABSHI ET BOUAKAZ

A tous les promos de Master 2

*HAZEL Abd El Kader*

## ملخص

يتطلب تنفيذ الحفريات العميقة في المناطق الحضرية استخدام الهياكل الإسنادية من أجل حماية المباني المجاورة القائمة. على الرغم من أن هذه الهياكل غالبًا ما تستخدم في الهندسة المدنية، إلا أن الحساب والأبعاد ليس سهل، حيث أن التفاعلات بين التربة والجدار والهياكل المجاورة مهمة ويصعب أخذها بعين الاعتبار. من أجل التحقق من استقرار جدران الحجاب الحاجز، سيتم إجراء التحليل العددي باستخدام طريقة العناصر المنتهية؛ وستتم معالجة التطبيقات باستخدام برنامج النمذجة العددية PLAXIS 2D. تهدف هذه الدراسة إلى تعميق فهم سلوك الجدار الاستنادي وتحليل النتائج التي تم الحصول عليها كدالة لعمق الحفر، وخاصة الإجهادات وعزوم الانحناء وقوى القص، وذلك لتجنب المشاكل التقنية أثناء انجاز أي مشروع.

*الكلمات المفتاحية: المترو، المحطة، التشوه، العناصر المنتهية، الجدران المصبوبة*

## Abstract

The realization of deep excavations in urban areas requires the use of retaining structures in order to protect existing neighbouring constructions. Although these structures are often used in civil engineering, the calculation and the dimensioning are not straightforward, as the interactions between soil, wall and neighbouring structures are significant and difficult to take into account.

In order to validate the stability of the diaphragm walls, numerical analysis with the finite element method will be carried out; and applications will be processed with the PLAXIS 2D numerical modelling software.

This study is intended to deepen the understanding of the behaviour of the retaining wall and to analyse the results obtained as a function of excavation depth, in particular displacements, bending moments and shear forces, in order to avoid technical problems during the project.

**Keywords:** *metro, station, deformation, finite elements, diaphragm walls.*

## ***Résumé***

La réalisation des excavations profondes dans les zones urbaines nécessite l'utilisation des structures de soutènement pour protéger les constructions voisines existantes. Bien que ces structures sont souvent utilisées en génie civil, le calcul et le dimensionnement ne sont pas simples, car les interactions entre le sol, la paroi et les structures avoisinantes sont importantes et difficiles à prise en compte.

Afin de valider la stabilité des parois moulées, des analyses numériques avec la méthode des éléments finis sont conduites, des applications ont été traitées avec le logiciel de modélisation numérique PLAXIS 2D.

Cette étude est destinée à approfondir la compréhension du comportement de l'écran de soutènements et analyser les résultats obtenus en fonction de la profondeur d'excavation, en particulier les déplacements, les moments fléchissant et les efforts tranchants afin d'éviter les problèmes techniques au cours de la réalisation du projet.

**Mots Clés :** *métro, station, déformation, éléments finis, parois moulées.*

# SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
<b>CHAPITER I LES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT</b>	
I.1 introduction.....	4
I.2 Définition.....	4
I.3 Classification des ouvrages de soutènement d'après le mode de reprise De la poussée.....	4
I.4 Soutènement des excavations.....	6
I.4.1 Les rideaux de palplanches métalliques.....	7
I.4.2 Les murs poids - les murs préfabriqué.....	7
I.4.3 Les murs en béton armé ou murs cantilever .....	9
I.4.4 Les voiles et poutres ancrés.....	10
I.4.5 Les massifs en sol cloué (ouvrages en sol en place renforcé).....	10
I.4.6 Les ouvrages en remblai armé (ou renforcé).....	11
I.5 Information .....	11
I.6 Les parois moulées.....	12
I.6.1 Généralité.....	12
I.6.2 Différents types de parois moulées.....	12
I.6.2.1 Paroi d'étanchéité.....	12
I.6.2.2 Paroi de soutènement simple.....	14
I.6.2.3 Les parois caissons.....	15
I.6.2.4 Les parois préfabriquées.....	16
I.6.2.5 Les parois de pieux- les parois composites.....	16
I.6.3 Étapes générale de réalisation d'une paroi moulée.....	18
I.7 Conclusion.....	21
<b>CHAPITER II PRESENTATION DE L'OUVRAGE</b>	
II.1 Historique sur le métro d'Alger.....	23
II.2 Présentation de la Station RABIA TAHER.....	23
II.3 Blindage des accès.....	27
II.4 Contraintes géologiques, hydrologiques et géotechniques.....	29
II.5 Paramètres de calcul pris en considération.....	30
II.5.1 Paramètres géotechnique.....	30
II.5.2 Paramètres structurels.....	32

II.6 Conclusion.....	33
----------------------	----

**CHAPITER III PRESENTATION DE PLAXIS ET MODELISATION NUMERIQUE**

III.1 Introduction.....	34
III.2 Objectifs.....	34
III.3 Courte revue des fonctionnalités.....	34
III.4 interfaces.....	35
III.4.1 Plaques .....	35
III.4.2 Poutres.....	35
III.4.3 Ancrages.....	36
III.4.4 Géogrilles.....	37
III.5 Modélisation de sol définis par l'utilisateur.....	37
III.5.1 Etapes de modélisation.....	37
III.6 L'application sur PLAXIS 2D.....	38
III.7 Les Résultats Dans PLAXIS 2D.....	50
III.7.1 Le déplacement.....	50
III.7.2 Les contraintes.....	53
III.7.3 Les moments.....	54
III.7.4 Les efforts normaux.....	55
III.7.5 Les efforts des cisaillements.....	56
Conclusion générale.....	58
Références bibliographies.....	59

# LISTE DES FIGURE

## CHAPITRE I

<b>Figure I.1</b> : Les différents types d'ouvrages de soutènement .....	5
<b>Figure I.2</b> : Les rideaux de palplanches métalliques.....	7
<b>Figure I.3</b> : Ouvrage de soutènement terrestre en palplanches.....	7
<b>Figure I.4</b> : Mur poids en pierres maçonnées.....	7
<b>Figure I.5</b> : Mur poids en béton.....	8
<b>Figure I.6</b> : Mur poids constitué de poutres préfabriquées.....	8
<b>Figure I.7</b> : (A et B) Mur en béton armé (ou mur cantilever).....	9
<b>Figure I.8</b> : Voile ancré.....	10
<b>Figure I.9</b> : Poutres ancrées.....	10
<b>Figure I.10</b> : Massif de sol en place renforcé par clonage.....	10
<b>Figure I.11</b> : Renforcement par lanières métalliques de terre armée.....	11
<b>Figure I.12</b> : Schéma de principe parois moulée d'étanchéité.....	13
<b>Figure I.13</b> : Schéma de principe d'une paroi moulée en place avec une nappe de tirants.....	15
<b>Figure I.14</b> : Paroi préfabriquée.....	16
<b>Figure I.15</b> : Schéma des étapes de réalisation d'une paroi de pieux.....	17
<b>Figure I.16</b> : Schéma des étapes de réalisation d'une paroi moulée.....	20

## CHAPITRE II

<b>Figure II 1</b> – Vue générale de la zone d'implantation de la Station RABIA Tahar (Google MAPS, date 16/10/2015).....	24
<b>Figure II 2</b> – Schéma général des différents corps de la Station RABIA Tahar et des principales contraintes à la réalisation des travaux.....	25
<b>Figure II 3</b> – Station RABIA Tahar (Métro d'Alger Octobre 2021).....	25
<b>Figure II 4</b> – Détail de la solution de blindage proposé pour l'accès nord de la Station RABIA Tahar..	28
<b>Figure II 5</b> – Schéma type du système de bétonnage préconisée pour le corps principal de la Station RABIA Tahar.....	28

## CHAPITRE III

<b>Figure III.1.</b> Éléments (Plates).....	35
<b>Figure III.2.</b> Ancrages (Anchor).....	37
<b>Figure III.3</b> Définition des sols.....	39
<b>Figure III.4</b> Définie chaque faille de sol.....	39
<b>Figure III.5</b> définit la nappe d'eau.....	40
<b>Figure III.6</b> déterminé les caractéristiques de chaque sol.....	40
<b>Figure III.7</b> déterminé les caractéristiques de chaque sol .....	41
<b>Figure III.8</b> déterminé les caractéristiques de chaque sol.....	41
<b>Figure III.9</b> déterminé les caractéristiques de chaque sol .....	42
<b>Figure III.10</b> déterminé les caractéristiques de chaque sol .....	42
<b>Figure III.11</b> déterminé les caractéristiques de chaque sol.....	43
<b>Figure III.12</b> définition plate.....	43
<b>Figure III.13</b> définit la charge.....	44
<b>Figure III.14</b> complètement de modélisation.....	44
<b>Figure III.15</b> Maillage du modèle.....	45
<b>Figure III.16</b> : modification de la nappe d'eau.....	45
<b>Figure III.17</b> : crée les phases d'excavation.....	46
<b>Figure III.18</b> : fin complètement de modélisation.....	46
<b>Figure III.19</b> : lancement du calcul.....	47
<b>Figure III.20</b> : calcul en cours.....	47
<b>Figure III.21</b> : fin du calcul.....	48
<b>Figure III.22</b> : toutes les phases calcul.....	48
<b>Figure III.23</b> : affichage de résultat.....	49
<b>Figure III.24</b> : Contour du déplacement selon axe X en fonction de profondeur d'excavation.....	50
<b>Figure III.25</b> : Contour du déplacement selon axe Y en fonction de profondeur d'excavation.....	51
<b>Figure III.26</b> : Contour des contraintes en fonction de profondeur d'excavation.....	53
<b>Figure III.27</b> : Diagramme des moments affaiblis sur la paroi moulée en fonction de profondeur d'excavation.....	54
<b>Figure III.28</b> : Diagramme des efforts normaux affaiblis sur la paroi moulée en fonction de profondeur d'excavation.....	55
<b>Figure III.29</b> : Diagramme des effets des cisaillements affaiblis sur la paroi moulée en fonction de profondeur d'excavation.....	56

# LISTE DES TABLEAU

## CHAPITR I

**Tableau I.1:** Classification des ouvrages de soutènement d'après le mode de reprise de la poussée.....5

## CHAPITR II

*Tableau II 1* – Caractéristiques géométriques et du soutènement des talus périphériques provisoires définis.....26

*Tableau II 2* – Résumé des profondeurs des facies existants.....30

*Tableau II 3* – paramètres géotechniques de calcul.....31

*Tableau II 4* – Caractéristiques physiques et géo mécaniques adoptées pour les remblais à exécuter dans les phases de couverture des structures.....32

*Tableau II 5* – Caractéristiques des éléments type « node-to-node Anchor » considérés pour simuler les niveaux de boutonnage matérialisés par des profils métalliques.....32

*Tableau II 6* – Caractéristiques par mètre de développement des éléments du type « plate » considérés pour simuler les structures de blindage.....33

## CHAPITR III

## LISTE DES SYMBOLES

**Z**: Profondeur moyenne

**W** : Poids propre du massif de sol

**$\Phi$** : L'angle de frottement interne

**C** : Cohésion

**K<sub>0</sub>**: Coefficient de pression des terres au repos.

**K<sub>a</sub>**: Coefficient de poussée des terres.

**K<sub>p</sub>**: Coefficient de butée des terres

**v**: coefficient de poisson

**C**: la résultante d'adhésion sur le plan de glissement

**K<sub>h</sub>**: Coefficient de réaction

**$\sigma$** : Contrainte normal

**$\tau$** : contrainte tangentielle

**u** : pressions interstitielles

**$\Psi$** : Angle de dilatance.

**Q** : Pression répartie des surcharges

**H**: la hauteur du mur

**F**: La charge totale exercée sur le Mur

**K**: Coefficient de poussée des terres normales à l'écran

**K**: Coefficient de poussée due à la surcharge

**K**: Coefficient de butée due à la surcharge

**K**: Coefficient de butée due à la surcharge

**$\sigma_h$** : la contrainte horizontale

**P<sub>a</sub>** : La pression active

**R**: La réaction sur le plan de glissement

### **Introduction Générale**

Les ouvrages de soutènement est essentiels dans le domaine de la construction, représentent des structures conçues pour stabiliser et retenir des terres ou des matériaux en pente. Leur rôle est crucial dans divers contextes, que ce soit pour la création de fondations solides dans les projets de construction, la protection contre l'érosion des sols, ou encore la sécurisation des infrastructures de transport. Ces ouvrages, dont les exemples peuvent varier depuis les murs de soutènement en béton jusqu'aux techniques de renforcement du sol, requièrent une expertise technique et une compréhension approfondie des principes de géotechnique et de génie civil. Dans cette introduction, nous explorerons les différents types d'ouvrages de soutènement, leurs applications, leurs méthodes de construction, ainsi que leur importance dans le domaine de l'ingénierie civile et de l'aménagement du territoire.

Une paroi moulée est une structure verticale formée en creusant une tranchée, puis en la remplissant de béton. Cette méthode de construction permet de créer des parois solides et continues, capables de résister aux forces exercées par les terres environnantes. Les parois moulées sont souvent utilisées dans les projets nécessitant une excavation profonde, comme les tunnels, les parkings souterrains ou les fondations de grands bâtiments.

L'étude de la stabilité d'une paroi de soutènement est une étape cruciale dans la conception de tel ouvrage. Elle vise à évaluer la capacité de la paroi à résister aux forces exercées par les terres environnantes, notamment la poussée des terres et les forces sismiques. L'analyse de la stabilité comprend généralement des calculs géotechniques avancés, tels que l'évaluation des contraintes et des déformations, l'analyse des facteurs de sécurité et l'utilisation de logiciels de modélisation numérique.

Lors de l'étude de la stabilité d'une paroi moulée ou d'une paroi en pieux, plusieurs paramètres doivent être pris en compte, tels que les caractéristiques géotechniques du sol, la profondeur de l'excavation, la hauteur du talus, les charges appliquées et les conditions hydrologiques. Une évaluation précise de ces paramètres permet de concevoir des ouvrages de soutènement robustes et durables, capables de résister aux contraintes environnementales et de maintenir la sécurité des structures avoisinantes.

## *Introduction Générale*

---

Cette étude repose sur des méthodes d'analyse avancées, telles que la modélisation numérique par éléments finis (PLAXIS 2D), qui permettent de simuler le comportement des parois moulées dans des conditions réelles. Elle nécessite également la collecte de données géotechniques sur le site d'implantation de l'ouvrage, telles que la nature des sols, leur résistance.

L'objectif ultime de cette étude est de fournir des informations approfondies sur les ouvrages de soutènement et d'aider les professionnels du génie civil à prendre des décisions éclairées lors de la conception et de la réalisation de ces structures. Nous explorerons les facteurs clés qui influencent la stabilité des parois et examinerons les techniques d'analyse et de calcul utilisées pour évaluer leur performance.

Comment assurer la stabilité optimale d'une paroi moulée avec appuis horizontaux dans un projet de génie civil en tenant compte des déformations maximales et des contraintes géotechniques spécifiques du sol ?

# *CHAPITRE I*

*Généralités sur  
les ouvrages de  
soutènements*

## I.1 Introduction

Les ouvrages de soutènement sont des structures construites pour retenir ou stabiliser des terres, des rochers ou d'autres matériaux en pente. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines tels que la construction de routes, de ponts, de bâtiments, de digues, de tunnels, de terrasses de jardins et d'autres projets d'ingénierie.

## I.2 Définition

Les ouvrages de soutènement sont des éléments clés de l'ingénierie civile qui permettent de retenir et de stabiliser les terres en pente, garantissant ainsi la sécurité des infrastructures et des personnes. Leur conception et leur construction nécessitent une approche spécialisée afin de répondre aux exigences spécifiques de chaque projet et d'assurer leur fonctionnement efficace et durable [1].

## I.3 Classification des ouvrages de soutènement d'après le mode de reprise de la poussée

Les différents types d'ouvrages de soutènement se distinguent donc par la manière dont les efforts de poussées du terrain derrière l'ouvrage sont repris. La poussée peut être reprise par [2]:

- Le poids de l'ouvrage : ce type de mur assure la stabilité du système mur/sol par son poids propre. Le poids du mur peut contribuer à sa stabilité et à la reprise des poussées, sans subir des déplacements pouvant rompre le sol derrière.
- L'encastrement de l'ouvrage : ce type de mur assure la stabilité du système mur/sol par l'encastrement de sa semelle. La semelle du mur doit avoir une largeur suffisante pour résister aux différentes formes d'instabilité (glissement de la semelle, renversement, etc.).

Les rideaux de palplanches, les parois moulées fonctionnent par encastrement, mais en faisant intervenir la partie fichée du mur dans le sol.

L'ancrage de l'ouvrage : ce type de mur assure la stabilité du système mur/sol par l'ancrage ou le clouage du mur dans le sol. Le mur est ancré dans le sol par des tirants d'ancrage ou des clous permettant la reprise des forces de poussées

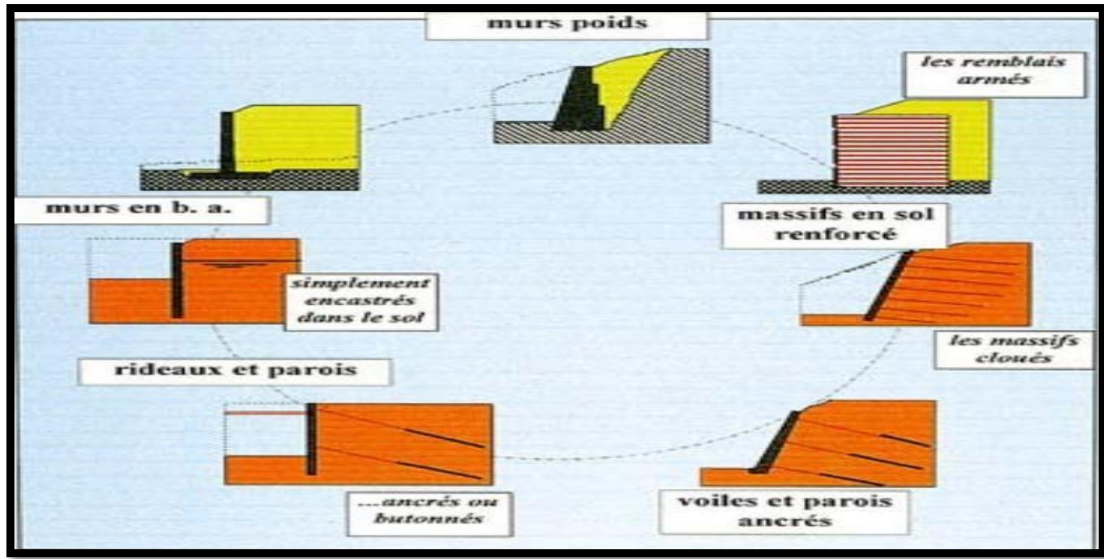


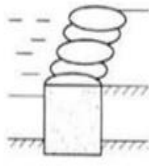
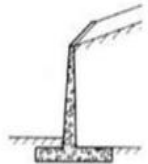
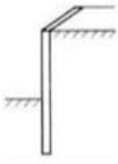
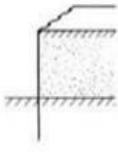
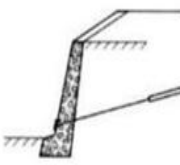
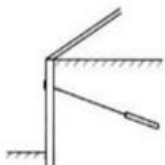
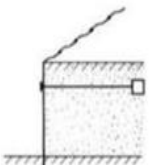


Figure I.1 Les différents types d'ouvrages de soutènement

Les différents types d'ouvrages de soutènement classés d'après le mode de reprise de la poussée sont montrés dans Le tableau I.1 :

Tableau I.1: Classification des ouvrages de soutènement d'après le mode de reprise de la Poussée

Mode de reprise de la poussée	Ouvrages de soutènement		
Poids de l'ouvrage	 Mur poids en béton ou maçonnerie	 Mur en Terre Armée	 Ouvrage cellulaire
Encastrement	 Mur cantilever en béton armé	 Paroi moulée	 Rideau de palplanches
Ancrage	 Mur en béton, ancré	 Paroi moulée ancrée	 Rideau ancré

## **I.4 Soutènement des excavations**

Le développement en zones urbaines nécessite généralement la réalisation d'excavations Profondes à proximité de structures existants en surface.

Les ouvrages des soutènements des excavations profondes peuvent être des ouvrages temporaires ou permanents qui ont une influence fondamentale sur la sécurité, la qualité,

La rapidité et la rentabilité de la construction des projets qui nécessitent les excavations profondes. Les ouvrages de soutènements des excavations incluent tous les moyens et les méthodes de prévention d'un effondrement de terre qui entourent une excavation.

Dans un premier temps, il sera décrit tant en termes d'exécution, de domaine d'emploi que de modèle fonctionnement, les familles de soutènement suivante [3]:

- Les parois de pieux
- Les murs préfabriqués
- Les massifs en sol cloué (ouvrages en sol en place renforcé)
- Les voiles et poutres ancrés
- Les parois moulées et Les parois préfabriquées
- Les parois composites
- Les murs en béton armé ou murs cantilever
- Les murs poids
- Les ouvrages en remblai armé (ou renforcé)
- Les rideaux de palplanche métallique

### I.4.1 Les rideaux de palplanches métalliques



Fig I.2 : Les rideaux de palplanches métalliques



Fig I.3 : Ouvrage de soutènement terrestre en palplanches

### I.4.2 Les murs poids et les murs préfabriqués



Fig I.4 : Mur poids en pierres maçonnées

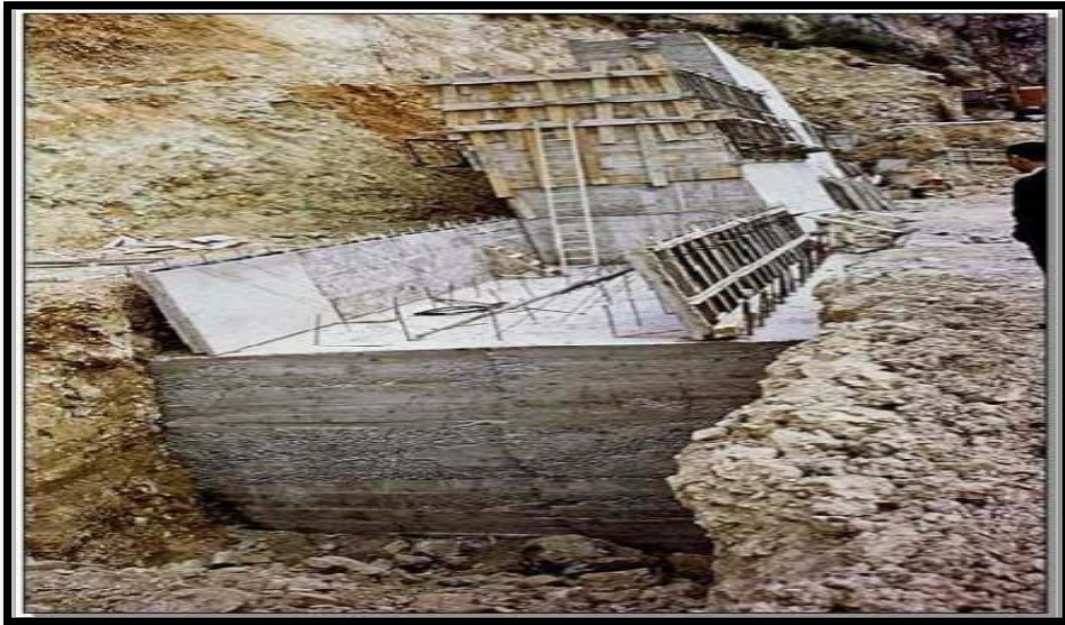


Fig I.5 : Mur poids en béton



Fig I.6 : Mur poids constitué de poutres préfabriquées.

### I.4.3 Les murs en béton armé ou murs cantilever



(A)



(B)

Fig I.7 (A et B) : Mur en béton armé ou mur cantilever

I.4.4 Les voiles et poutres ancrés

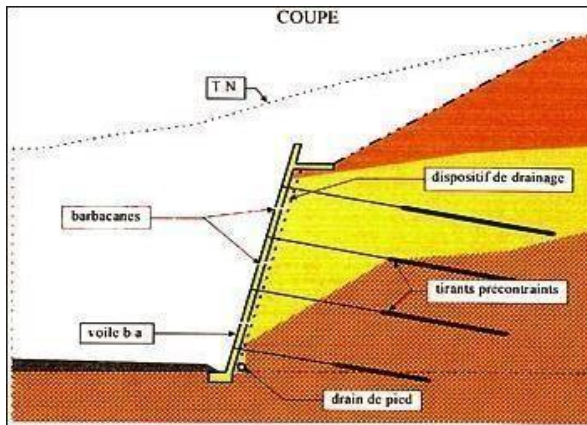


Fig I.8 : Voile ancré.

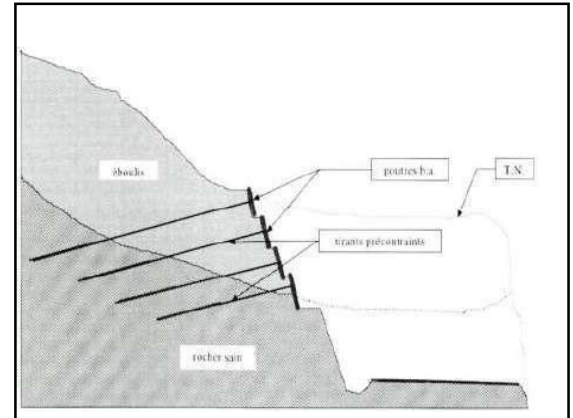


Fig I.9 : Poutres ancrées.

I.4.5 Les massifs en sol cloué (ouvrages en sol en place renforcé)

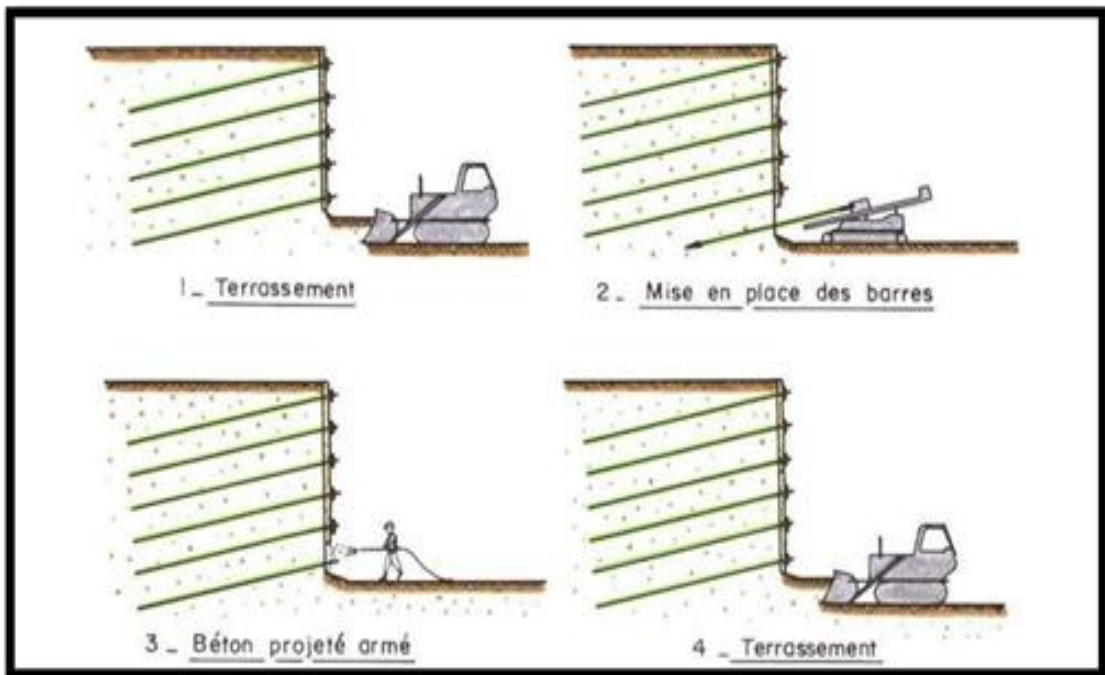


Fig I.10 : Massif de sol en place renforcé par clouage.

### I.4.6 Les ouvrages en remblai armé

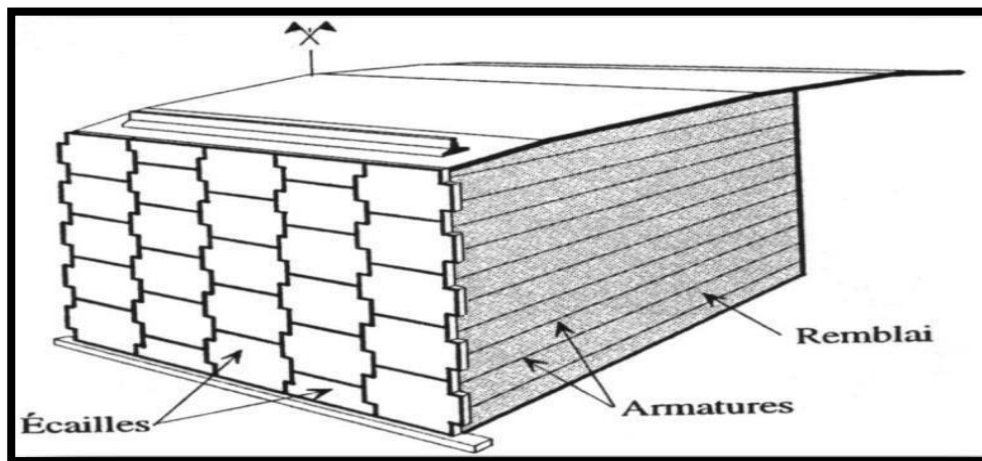


Fig I.11 : Renforcement par lanières métalliques de terre armée

## I.5 Information

Les ouvrages souterrains en travaux publics, il est crucial de souligner leur importance et leur complexité dans l'infrastructure moderne. Ces structures souterraines sont essentielles pour répondre aux besoins de transport, d'approvisionnement en eau, d'énergie et de communication dans les zones urbaines et rurales.

Leur construction nécessite une expertise technique avancée, une planification minutieuse et une gestion efficace des risques. Les défis liés à la sécurité, à l'environnement et à la durabilité doivent être soigneusement pris en compte à chaque étape du processus de conception et de réalisation.

Malgré les défis, les ouvrages souterrains offrent de nombreux avantages, notamment la préservation de l'espace au sol, la réduction des impacts visuels et sonores, ainsi que la protection des infrastructures contre les intempéries et les catastrophes naturelles.

Finalement les ouvrages souterrains représentent une composante essentielle et souvent invisible de nos infrastructures modernes. Leur conception et leur construction doivent être abordées avec sérieux et responsabilité pour garantir un développement durable et une qualité de vie optimale pour les générations futures.

## I.6 Les parois moulées

### I.6.1 Généralités

La paroi moulée en béton armé consiste en un voile coulé dans les terres, comme une sorte de pieux 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.

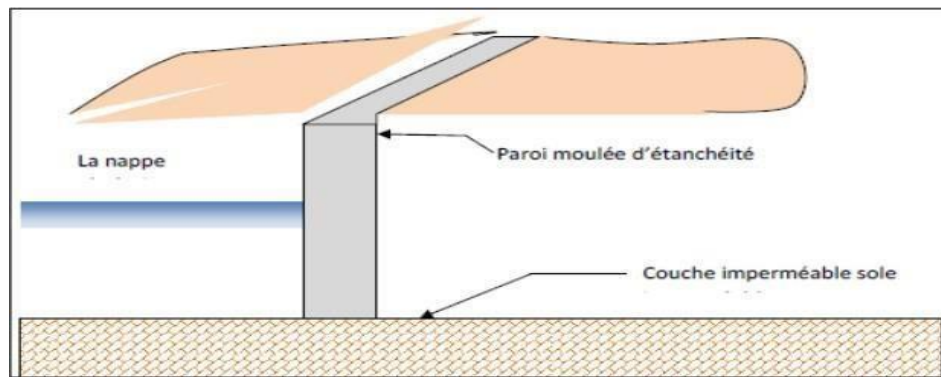
**De soutènement** : en maintenant les terres et les surcharges sur la périphérie.

**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 types de parois moulées [4].

### I.6.2 Différents types de parois moulées

#### I.6.2.1 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.



**Figure I.12:** Schéma de principe parois moulée d'étanchéité

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 verticale et horizontale. Elles assurent une résistance durable à l'eau [5].

Les applications possibles sont:

- Excavations ;
- Digue, tunnels et parkings souterrains ;
- Chemins creux ;
- Sites pollués ;
- Mise en œuvre.

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 [6].

### I.6.2.2 Paroi de soutènement simple

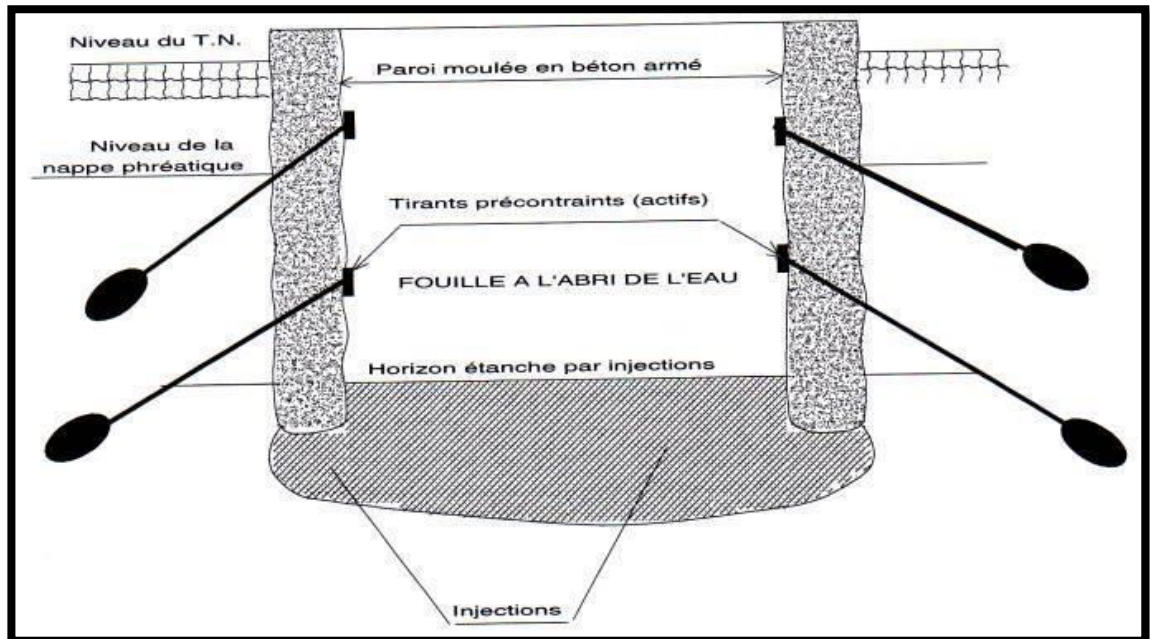
Cas où il n'est pas prévu de construction dans l'excavation après terrassement.

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 fiche et d'autre part par des tirants ou butons disposés dans la partie libre de l'écran .

L'écran est généralement fiché de façon significative dans le terrain : de façon typique, la fiche pour une paroi ancrée varie de 30% à 50% de la hauteur de fouille, en permettant la mobilisation d'un appui au sein du terrain, cette fiche joue un rôle déterminant dans l'équilibre de l'ouvrage.

La nature de ces appuis est variable selon les propriétés de terrain, la longueur en fiche de l'écran, sa rigidité et la distribution des autres appuis, tirants ou butons en partie aérienne. Elle peut se réduire à un appui simple pour des écrans très rigides, ancrés en partie supérieure et dont la fiche est courte tandis que pour des écrans ne possédant pas d'appuis en partie supérieure l'encastrement en fiche devra être totale. Dans le cas général l'écran se trouve partiellement encasté dans le terrain.

Les appuis en partie supérieurs de l'écran sont présents dès que la hauteur libre dépasse environ 5m, de façon à limiter les déplacements et 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 où l'effort doit être renvoyé à une structure faisant face à l'écran (cas des tranchées couvertes, par exemple) [7].



**Fig I.13** : Schéma de principe d'une paroi moulée en place avec une nappe de tirants

### I.6.2.3 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 l'intérieur.

Elle remplace, pour de très grandes dimensions et de grandes profondeurs, la technique des caissons havés Caissons havés ("ouverts") Les extrémités inférieure et supérieure sont ouvertes.

Le caisson est foncé, en place Lorsque la cote finale est atteinte on assèche le caisson et on le remplit de béton Pour faciliter la pénétration du caisson dans le sol, les extrémités inférieures des parois latérales du caisson sont façonnées en biseau ; sur cette partie biseautée, ou "crinoline", est fixée une "trousse coupante" munie d'un "couteau" prolongeant la paroi extérieure du caisson; Elle permet de fonder des charges ou d'ancrer des efforts de traction considérables [6].

### I.6.2.4 Les parois préfabriquées

Les parois préfabriquées sont constituées, quant à elles, de panneaux préfabriqués en béton armé, descendus dans des excavations dans lesquelles ils sont posés à l'aide généralement d'un coulis de ciment-bentonite. Celles-ci sont réalisées dans les mêmes conditions que pour les parois moulées, le fluide de forage pouvant être prévu pour servir également de coulis de scellement des panneaux. Les parois sont généralement ancrées ou boutonnées [5].



Fig I.14: Paroi préfabriquée.

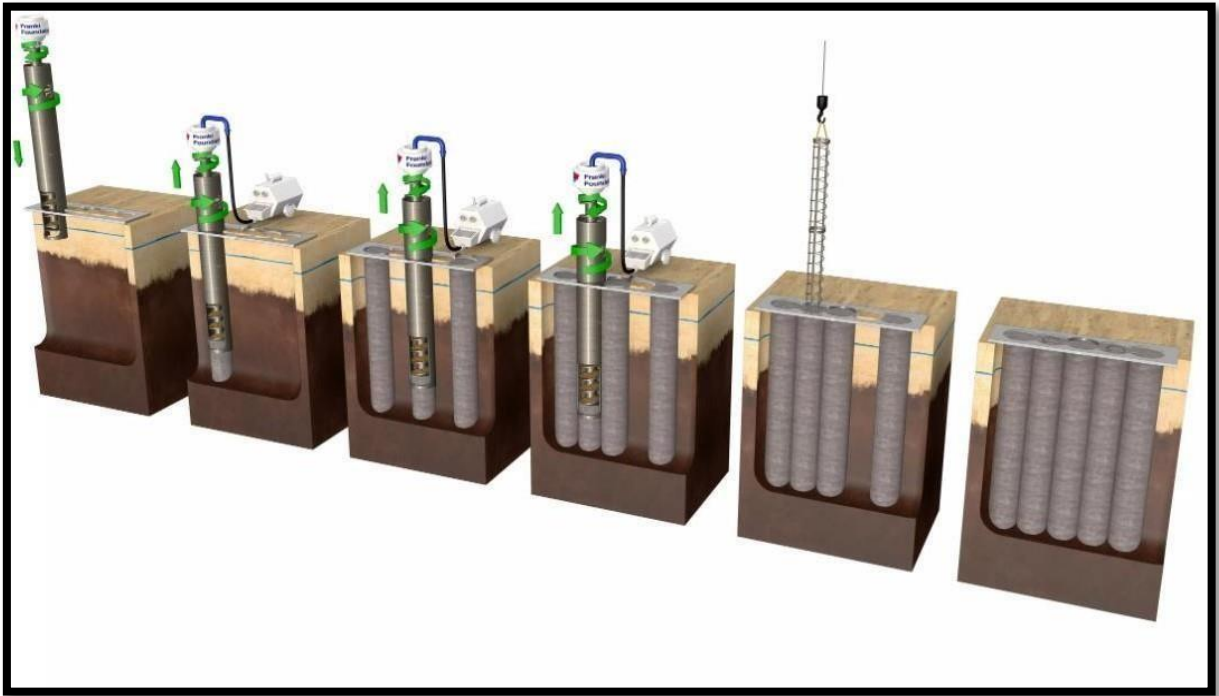
### I.6.2.5 Les parois de pieux et les parois composites

#### A/ Une paroi de pieux :

Est constituée d'une succession de pieux forés, tangents ou sécants. Il s'agit généralement de pieux forés en béton armé, d'un diamètre de 0,60 à 1,20 m au plus, réalisés à l'abri d'un tube de travail provisoire (remonté au fur et à mesure du bétonnage).

Le soutènement est réalisé par excavation des terres devant les parois dès lors que les pieux ont atteint une résistance suffisante. Les parois peuvent être planes, courbes, présenter des angles et former des enceintes fermées.

La paroi de pieux est le plus souvent ancrée par un ou plusieurs lits de tirants d'ancrage précontraints, situés dans des poutres horizontales métalliques (en principe lorsque les tirants sont provisoires) ou en béton armé [5].



**Fig I.15** : Schéma des étapes de réalisation d'une paroi de pieux.

### **B/ Une paroi composite :**

Est constituée de pieux isolés, disposés verticalement avec un entre-axe généralement compris entre 2,50 et 4 mètres, et de voiles, en principe en béton armé (coulé en place ou projeté), réalisés entre les pieux au fur et à mesure de l'excavation des terres devant ces derniers.

Les voiles sont généralement réalisés par plots de 2 à 5 mètres de hauteur, en béton coffré ou projeté, et liaisonnés aux pieux.

Une paroi composite comporte le plus souvent un ou plusieurs niveaux d'appui. Lorsqu'il s'agit de tirants d'ancrage précontraints, comme cela est généralement le cas, ils peuvent s'appuyer sur des poutres horizontales métalliques (généralement lorsque ces tirants sont provisoires) ou en béton armé. Ils peuvent être disposés également au droit des pieux, et même noyés dans le béton de ces derniers à l'intérieur de réservations spécialement prévues à cet effet, lorsqu'ils sont définitifs [5].

Pour des raisons d'aspect, les parties vues des parois composites et des parois de pieux (hauteur libre des parois) peuvent être, si nécessaire, soit traitées, soit revêtues d'un bardage rapporté. Par ailleurs, bien qu'elles ne soient pas conçues en principe pour des terrains qui retiennent une nappe sur leur hauteur libre (souvent simplement pour éviter des suintements d'eau sur les parements vus), ces parois peuvent être pourvues, dans le plus simple des cas, de barbacanes, reliées ou non à un

système de drainage. Pour des parois de type berlinoises ou parisiennes, celui-ci peut être réalisé simplement par la mise en œuvre d'un matériau drainant dans l'espace compris entre le pieu et la paroi du forage, sur la hauteur libre de l'ouvrage [5].

### I.6.3 Étapes générales de réalisation d'une paroi moulée

#### Etape 1 :

Le premier ouvrage exécuté est la murette-guide : elle est constituée de deux murets provisoires béton armé permettant :

- De matérialiser l'ouvrage à exécuter et d'en définir avec précision le tracé, de guider l'outil de forage,
- D'assurer une réserve de boue de forage,
- De caler les cages d'armatures avant la mise en place du béton et pendant son durcissement.

Les murettes-guides peuvent être construites au contact de structures ou de fondations existantes. On peut ainsi par exemple construire une paroi moulée au plus près de bâtiments mitoyens.

La phase de perforation est réalisée en une ou plusieurs passes, avec l'aide d'un fluide support de manière à excaver des panneaux. La formulation de ce fluide et la longueur de chaque panneau excavé sont ajustées en fonction du type de sol et des structures mitoyennes environnantes, de manière à garantir à tout moment une bonne stabilité de la tranchée pendant travaux. Lors de l'excavation, le terrain est progressivement remplacé par ce fluide support, appelé 'boue de forage.

On emploie généralement une forme particulière d'argile, la bentonite, qui forme sur les parois de l'excavation un dépôt étanche, permettant de maintenir une contre-pression hydrostatique dans l'excavation s'opposant à la poussée des terres tendant à provoquer l'éboulement des parois.

Une boue de forage fabriquée avec des polymères peut aussi être utilisée selon les conditions géologiques. D'autres options sont possibles [6].

Durant la phase d'excavation, les propriétés de la boue de forage sont régulièrement contrôlées, et corrigées lorsque nécessaire.

**Etape 2 :**

Une fois l'excavation d'un panneau achevée, la boue de forage est recyclée, de manière à limiter fortement la quantité de particules de terrain en suspension. Puis une cage d'armatures est mise en place dans le panneau. Cette cage peut être pré-équipée de divers éléments, par exemple des tubes de réservation pour l'exécution de tirants d'ancrage.

Une fois la cage mise en place, on installe des colonnes de bétonnage traversant la cage d'armatures jusqu'au fond du panneau excavé.

Le bétonnage du panneau est réalisé depuis la surface. Les colonnes de bétonnage permettent de couler le béton depuis le fond du panneau, et de remonter progressivement jusqu'à la surface. Pendant cette opération, le béton enrobe la cage d'armatures et repousse progressivement la boue de bentonite vers la surface, où elle est pompée pour être traitée.

L'étanchéité entre deux panneaux adjacents peut être réalisée :

- Soit par l'utilisation d'un coffrage métallique provisoire CWS permettant l'incorporation d'un joint emprisonné de part et d'autre dans le béton de chaque panneau ;
- Soit en remordant dans le béton du panneau adjacent (possible uniquement lorsque l'excavation est réalisée à l'Hydro fraise.

**Etape 3 :**

En fonction des projets une poutre de couronnement en béton peut être construite en tête de paroi pour lier les panneaux entre eux ou pour préparer l'interface avec le reste du projet.

La phase de terrassement peut ensuite être réalisée à l'abri de la paroi moulée. Pendant ce terrassement, et en fonction du niveau de finition demandé, le béton de la paroi pourra alors être raboté. L'excavation est souvent réalisée en plusieurs étapes. Suivant la conception de l'ouvrage, des opérations complémentaires peuvent être réalisées comme l'installation de liernes, la mise en place d'un bétonnage, la réalisation et mise en tension de tirants d'ancrage, la construction de planchers intermédiaires, etc. [7].

Les épaisseurs de paroi moulée sont généralement de : 0,50 m ; 0,60 m ; 0,80 m ; 1,00 m ; 1,20 m ; 1,50 m et 1,80 m



**Fig I.16** : Schéma des étapes de réalisation d'une paroi moulée.

## **I.7 Conclusion**

En conclusion, les ouvrages de soutènement jouent un rôle essentiel dans de nombreux projets d'ingénierie pour retenir et stabiliser les terres en pente. Leur objectif principal est d'assurer la sécurité des infrastructures et des personnes en évitant les mouvements de terrain et l'érosion des pentes.

Ces ouvrages de soutènement varient en fonction des conditions du sol, de la hauteur de la paroi et des contraintes spécifiques du projet. Ils peuvent être réalisés à l'aide de murs en gravité, de murs en cantilever, de murs en contrebutement, de gabions, de systèmes de soutènement en terre armée, de pieux et de palplanches, entre autres.

La conception des ouvrages de soutènement nécessite une analyse approfondie du sol et des calculs de stabilité pour garantir leur performance optimale. Il est essentiel de faire appel à des ingénieurs géotechniques expérimentés pour assurer la fiabilité et la durabilité de ces structures.

En somme, les ouvrages de soutènement contribuent à la réalisation de projets d'infrastructure sûrs et fonctionnels, en permettant la construction sur des terrains accidentés et en garantissant la stabilité des terres environnantes. Leur importance dans l'ingénierie civile ne peut être sous-estimée, et leur conception et leur construction doivent être réalisées avec soin pour assurer leur efficacité.

# *CHAPITRE II*

*Présentation De L'ouvrage*

## II.1 Historique sur le métro d'Alger

Les études du métro d'Alger ont commencé en 1932, dont l'objectif premier était de réaliser une ligne de 14 km entre « BOLOGHINE » et « El Harrach ». En 1955 l'administration coloniale décida d'entreprendre une étude pour la réalisation de la ligne entre « BOLOGHINE » et « El Harrach », qui devait être lancée, a été en fin de compte abandonnée.

En 1972, une étude de transport confiée au Bureau Britannique Buchanan concluait qu'une sorte de métro de type classique serait la solution la plus appropriée.

En 1981, SOFRETU (Société Française d'étude et de Réalisation de Transport Urbain) a fait une étude pour le compte de la RSTA (Régie syndicale des transports algérois) et conclu que la meilleure solution serait d'implanter un système de transport de métro à l'intérieur des zones denses de la ville. Ce système assurerait le transport de 40 000 voyageurs par heure en un seul sens.

En 1982 Le lancement des études du métro d'ALGER s'est concrétisé par la création de l'E.M.A (Entreprise du Métro d'ALGER) qui avait pour rôle de veiller au bon déroulement des différentes étapes de ce projet de grande envergure, dont le lancement des travaux n'a débuté qu'en 1990.

Les études de conception générale ont abouti à la définition d'un schéma de réseau à long terme constitué de trois lignes, totalisant environ 56 Km avec 54 stations. L'analyse des flux de déplacement des personnes dans la ville d'Alger, faite par l'E.M.A, montre une forte densité sur l'axe: BAB EL-OUED - HUSSEIN DEY. C'est pour cela que le choix s'est porté pour la réalisation en priorité de la première phase de la première ligne qui s'étend de HAI EL BADR à TAFOURAH Grande Poste, d'une longueur de 9,5km et comportant dix stations, ligne inauguré le 31 octobre 2011, la ligne est mise en service commercial le lendemain 1er novembre [7].

## II.2 Présentation de la Station «RABIA TAHER»

La Station RABIA Tahar sera située à sud de la cité RABIA Tahar, dans une zone urbaine et topographiquement plaine.

Au nord de la station se trouve une station de tramway, un terminal de bus et une zone de commerce, lesquels seront dans le futur, servis directement par la station. À son tour, au sud, se trouve la Cité EPLF avec immeubles, résidentiels qui portent nombreux étages dont quelques sont proches de la zone d'implantation de la station.

Dans la Figure 1 est présenté une vue générale de la zone d'implantation de la Station RABIA TAHAR et des respectifs accès (Nord, Sud – Sortie Ouest et Sud – Sortie Est), laquelle correspond

à une surface d'environ 6100 m<sup>2</sup> [8].



**Figure II 1** – Vue générale de la zone d'implantation de la Station RABIA Tahar  
(Google Maps, date 16/10/2015)

L'excavation associée à l'exécution du corps principal de la station aura une longueur d'environ 147,0 m, une largeur courante de 26,0 m et une profondeur moyenne de 23,0 m. Nous signalons que dans l'extrémité nord-est de la station est prévu un puits de pompage d'eau sous la dalle de fond, lequel implique qu'en cette zone que le niveau d'excavation soit d'environ 3,75 m plus profonde.

À son tour, la profondeur maximale des excavations associées à l'exécution des accès sera d'environ 12,0 m. L'intersection entre les excavations des accès et l'excavation du corps principal la station aura lieu à cette profondeur. Les accès Nord, Sud –Sortie Ouest et Sud – Sortie Est auront une extension de, respectivement, 78 m, 69 m et 71 m.

Malgré le fait que la zone d'implantation de la Station RABIA Tahar n'ait pas, en général, des restrictions au niveau d'occupation à la surface, dans la phase de conception des solutions, et plus spécifiquement en ce qui concerne à des accès, l'ouvrage préalable de déviation de l'ovoïde existante dans la côté nord de la station et la présence de bâtiments résidentiellles de grande hauteur proches des blindages des accès sud ont constitué des contraintes importantes et exceptionnelles au développement des études et à la définition des solutions à adopter.

La Figure 2 présente la disposition en plan des différents corps de la Station RABIA Tahar selon la définition de l'architecture présentée dans l'APD ainsi que des principales contraintes à la

réalisation des travaux précédemment mentionnés[9].

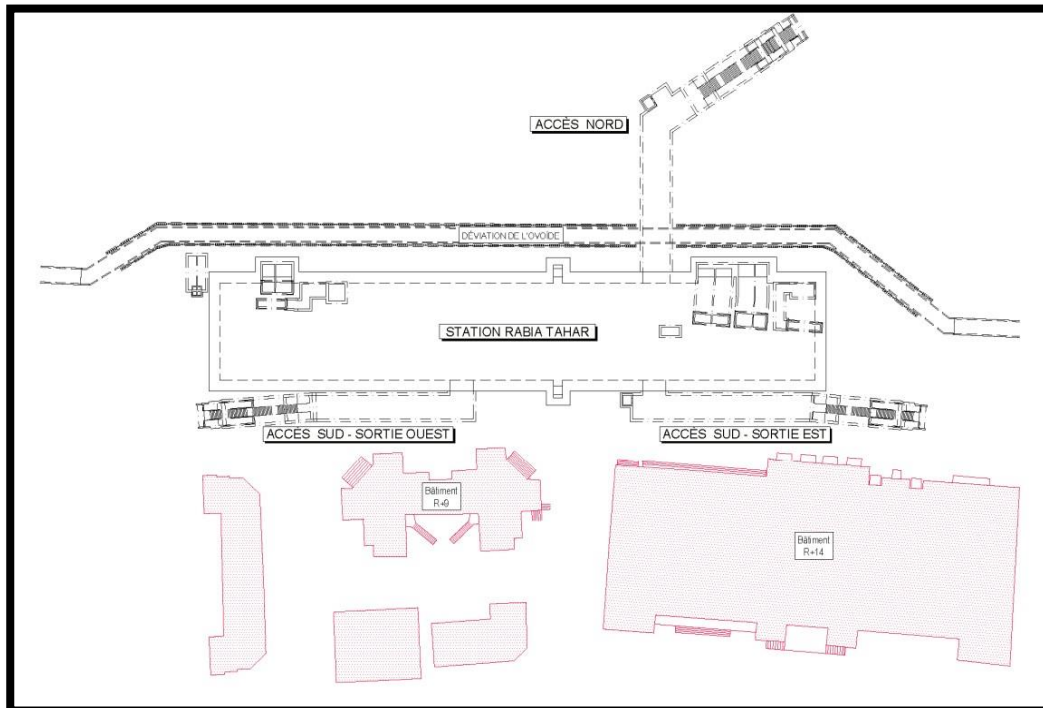


Figure II 2 – Schéma général des différents corps de la Station RABIA Tahar et des principales contraintes à la réalisation des travaux



Figure II 3 – Station RABIA Tahar (Métro d'Alger) Octobre 2021

Le soutènement des talus sera constitué par un revêtement en béton projeté, avec 10 cm d'épaisseur, appliqué en deux couches de 5 cm, intégrant un treillis soudé #φ8//0,15, associé à des clouages composés par des barres d'acier A500 NR φ25mm avec une longueur variable en fonction des contraintes spatiaux de chaque alignement de talus (voir le Tableau).

Il a été aussi prévu l'installation d'un système de drainage superficiel composé par des barbacanes en PVC φ63mm avec des écartements triples des clouages, afin d'éviter la concentration des éventuelles eaux d'infiltration dans les zones situées dans l'arrière des revêtements en béton projeté

Bien qu'on ne prévoit pas l'existence de beaucoup d'eau dans le terrain intéressé par les talus d'excavation, afin de protéger efficacement le revêtement en béton projeté à réaliser contre les eaux d'infiltration, lesquelles peuvent donner origine à des poussées significatives ou à une dégradation rapide de sa résistance, il a été préconisé l'installation d'un système de drainage profond éventuel composé de drains sous-horizontaux, avec un diamètre de 63 mm, constitués de tuyaux en PVC, ondulés et perforés, enveloppés en géotextile. La mise en place de ces drains, la définition de l'écartement entre eux ainsi comme sa position dans les talus, sera de la responsabilité de l'équipe d'ATE en fonction des réelles conditions hydrogéologiques trouvées au fur et à mesure de l'excavation et de la pluviosité vérifiée pendant les travaux.

**Tableau II 1** – Caractéristiques géométriques et du soutènement des talus périphériques

Provisoires définis

Talus	Pente	Longueur des clouages [m]		Éloignement vertical des clouages [m]	Éloignement horizontal des clouages [m]	Longueur du géodrain [m]	Contraintes
		1 <sup>er</sup> niveau	2 <sup>ème</sup> niveau				
Nord	V=1 H=1	2,0	2,0	1,0	1,5	3,0	Ovoïde
Sud		3,0	4,0	1,5	1,5	5,0	Bâtiments
Est/Ouest		6,0	6,0	1,5	1,5	5,0	-

### II.3 Blindage des accès

À son tour, le drainage des eaux recueillies dans les drains et les barbacanes doit être réalisé à travers des caniveaux, en béton projeté  $\phi 300$ , à installer dans la base des talus et qui devront mener les eaux aux puits de pompage situés à l'intérieur de la fouille. Il a été aussi prévu la réalisation de caniveaux  $\phi 300$  en béton projeté au long du haut des talus dans toute le périmètre de la fouille.

En ce qui concerne la solution de boutonnage préconisée pour le corps principal de la station, nous avons considéré trois niveaux d'appui pour faire face à une hauteur d'excavation totale d'environ 23,0 m , dont deux seront matérialisés par des systèmes de boutonnage constitués par des profils métalliques et un autre par la dalle de couverture de la station, laquelle a 2,0 m d'épaisseur et devra être exécutée dans une phase préliminaire des travaux d'excavation.

La paroi de revêtement des parois moulées, avec 1,40 m d'épaisseur théorique, sera aussi exécutée au fur et à mesure de l'avance de l'excavation et de façon à que les différents niveaux de boutonnage s'appuient directement sur la paroi.

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 le largueur important de la fouille de la station, nous avons dû définir le contreventement horizontal et vertical des deux niveaux de boutonnage localisés sous la dalle de couverture.

Le contreventement horizontal des butons, ça veut dire, le contreventement selon la moindre inertie des profils, sera mise en œuvre soit par le détail de l'appui des butons sur les pieux  $\phi 1000$ , soit à travers de profils métalliques qui feront la liaison entre Extensions du Métro d'Alger – EL HARRACH Centre – BAB EZZOUAR – Aéroport International d'Alger ÉTUDE D'EXÉCUTION– STATION RABIA TAHAR Projet de Blindage et d'Excavation Note de Calcul Date: 23-08- 2016 Document N°: L1B1-GCG-COSM28-3070-A2-13-003-A Page: 26 sur 231 butons dans lescas où les pieux  $\phi 1000$  ne sont pas liés à la dalle de couverture.

À son tour, le contreventement vertical des butons sera mise en œuvre en profitant aussi des pieux  $\phi 1000$  précédemment exécutés pour l'appui vertical de la dalle de couverture de la station

(voir Figure 11). Comme sera présenté en détail dans le chapitre concernant au phasage exécutif, la démolition de chaque pair de pieux  $\phi 1000$  pourra seulement être réalisée après la désactivation des butons qui en sont liés.

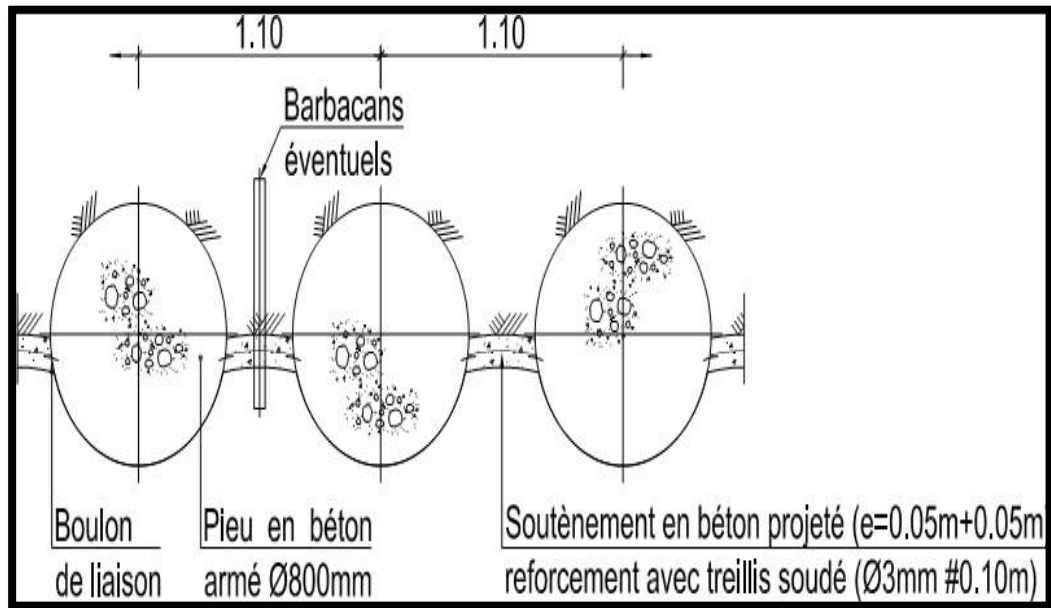


Figure II 4 – Détail de la solution de blindage proposé pour l'accès nord de la Station RABIA Tahar

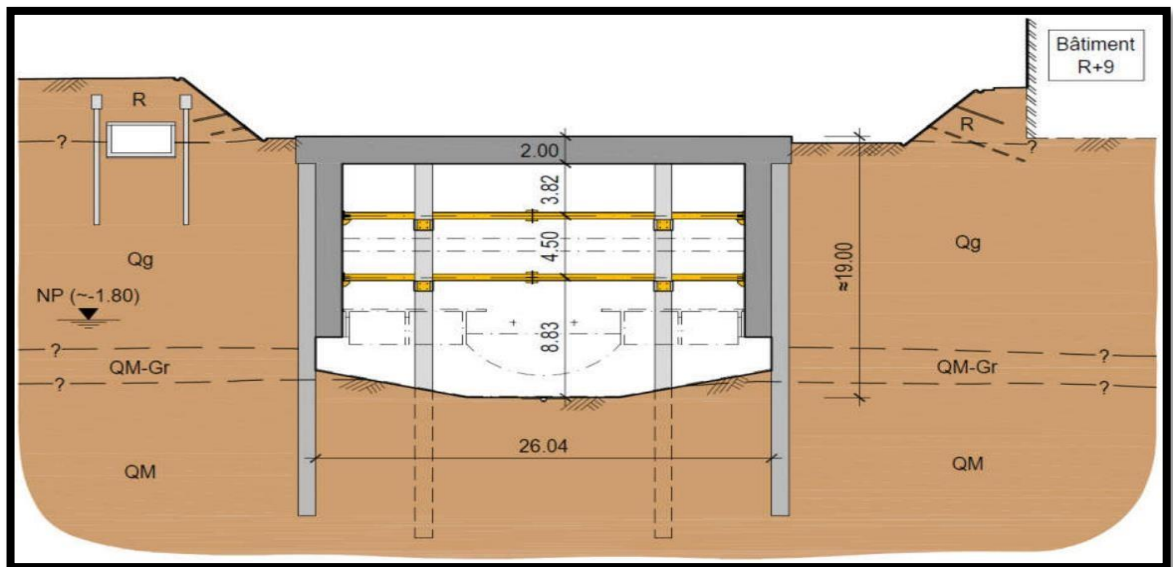


Figure II 5 – Schéma type du système de boutonnage préconisé pour le corps principal de la Station RABIA Tahar

## **II.4 Contraintes géologiques, hydrologiques et géotechniques**

Comme indiqué précédemment, le document « Hypothèses Géotechniques. Station RABIA Tahar » (L1B1-GCG-COSM28-3070- A10-40-001) présent un résumé de l'information géologique, hydrologique et géotechnique la plus importante, provenant soit de l'APD soit de la campagne de prospection complémentaire, aussi bien que les paramètres géotechniques déduits en ce document sont considérés dans les calculs de vérification structurelle du blindage des fouilles et dans le dimensionnement du système de bétonnage du corps principal de la station et des respectives accès.

Selon l'information disponible, les sols où la Station RABIA Tahar sera creusé s'agissent des dépôts quaternaires constitués par des alternances de facies argileux, graveleux et sableux, superposés aux formations du pliocène récent et quaternaire ancien constitués, à l'échelle de l'ouvrage, par un niveau gréseux à passages graveleuses et décomposés, sous lequel on trouve les marnes et argiles marneuses grises dites d'El Harrach.

Les données disponibles ont permis d'établir un zonage en profondeur des sols selon ces caractéristiques géotechniques et déterminer des paramètres géo mécaniques caractéristiques de chaque horizon. Ainsi, selon nôtre interprétation, le dispositif géologique-géotechnique est constitué, de haut en bas, par un horizon de remblais argileux jusqu'au 2,5-6,0 m de profondeur, par des sables caillouteux avec passages de grès broyés et sous forme de gravier, compactes à denses, jusqu'aux 19,0-22,0 m de profondeur, que passent latéralement à des argiles limoneuses peu graveleuses, parfois marneuses, fermes, jusqu'aux 22,0- 22,5 m de profondeur, par une couche des grès lumachéliques poreux, fissuré et broyé, parfois sous formes de graviers, jusqu'aux 19,0-27,0 m de profondeur. En dessous des 22,0-27,0 m de profondeur, on trouve les marnes et argiles marneuses grisâtres à verdâtres, fermes à très raides, avec intercalations sableuses et de sable pour la base.

Tableau II 2 – Résumé des profondeurs des facies existants

Localisation (PK)	Profondeur atteinte par les sondages [m]	Horizon géotechnique	Symboles utilisés dans les dessins	Réponse drainée ou non-drainée	Profondeurs moyennes [m]
5+613	0,0 – 43,5	Remblais	R	Non-drainée	0,0 - 6,0
		Sables caillouteux avec passages de grès broyés sous forme de gravier	Qg	Drainée	3,0 - 22,0
		Grès poreux fissuré et broyé	QM-Gr	Drainée	19,0 - 27,0
		Marnes et argiles marneuses grisâtres	QM	Non-drainée	> 20,5

## II.5 Paramètres de calcul pris en considération

### II.5.1 Paramètres géotechnique

La définition et la justification des paramètres de calcul géotechniques de résistance et de déformabilité caractéristiques des formations creusées par les travaux d'excavation de la station, de leurs accès et d'autres ouvrages complémentaires, nécessaires aux analyses numériques, autant comme au dimensionnement des structures, sont indiquées dans le document « Hypothèses Géotechniques. Station RABIA Tahar » (L1B1-GCG-COSM28-3070- A10-40-001), tel que décrit au Chapitre 1. Dans ce document, les paramètres géotechniques de calcul ont été répartis en cinq unités géotechniques, selon le présenté dans le Tableau 3 [9].

Tableau II 3 – paramètres géotechniques de calcul

Horizon géotechnique	U1	U2	U4	U5
	Remblais	Sables caillouteux avec passages de grès broyés sous forme de graviers	Grès lumachéliques poreux, fissuré et broyé, parfois sous formes de graviers	Marnes et argiles marneuses grisâtres à verdâtres
Profondeurs moyennes (m)	0,0 – 5,0	3,0 - 22,0	19,0 -27,0	> 20,5
Masse vol. humide $\gamma_h$ (KN/m <sup>3</sup> )	20,0	21,0	23,0	20,0
Masse vol. sèche $\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	17,0	17,5	23,0	17,0
Cohésion non-drainée $s_u$ (kPa)	30	-	-	$s_u = 5,3 \cdot (z - 20) + 11$ 2
Module de déformation non-drainé $E_u$ (MPa)	12	-	-	$E_u = 3,2 \cdot (z - 20) + 67$
Angle de frottement effectif $\phi'$ (°)	20°	34°	40°	22°
Cohésion effective $c'$ (kPa)	0	0	60	35
Module de déformation drainé $E'$ (MPa)	10	70	120	85
Coefficient $K_0$	0,65	0,50	0,50	0,60
$\nu'$	0,4	0,3	0,3	0,4

Le modèle constitutif choisi pour modéliser le comportement de ces formations est celui l'élastique-parfaitement plastique avec le critère de plasticité de MOHR-Coulomb. Malgré quelques limitations, il présente comme avantages le fait de n'avoir besoin de deux critères pour la définition du critère de rupture et d'être également le modèle le plus communément utilisé dans la simulation d'ouvrages géotechniques, ce qui permet à l'utilisateur expérimenté une plus grande aisance dans l'interprétation de son comportement.

En outre, de façon à modéliser les phases de construction des structures internes, notamment dans le cas des accès, et la conséquente désactivation des niveaux de boutonnage, nous avons considéré un matériel de remblai avec une réponse drainée et avec les caractéristiques physiques et géo mécaniques présentés dans le Tableau 4 :

**Tableau II 4** – Caractéristiques physiques et géo mécaniques adoptées pour les remblais à exécuter dans les phases de couverture des structures

Masse volumique □ (KN/m <sup>3</sup> )	Module de déformation drainé E' (MPa)	v'	Angle de frottement effectif φ' (°)	Cohésion effective c' (kPa)	Coefficient K <sub>0</sub>
19,0	20,0	0,3	32	5	0,47

### II.5.2 Paramètres structurels

Dans le présent chapitre nous présentons les paramètres de calcul physiques et de déformabilité adoptés dans les calculs numériques pour les différents éléments structurels qui composent les solutions de blindage et de soutènement du corps principal de la station et des accès.

Les structures en béton armé qui font partie du blindage ont été modélisées dans le logiciel PLAXIS 2D comme des éléments du type « plate », selon les spécifications du projet et selon les indications des normes applicables, notamment en ce qui concerne la capacité portante et la déformabilité. Nous avons considéré que ces éléments structurels présentent un comportement linéaire élastique.

De souligner que, malgré la définition commune adoptée pour les structures de blindage de tous les accès, ça veut dire, pieux φ800 éloignés de 1,10 m, dans le cas de l'Accès Nord et dans le tronçon d'intersection avec la structure hydraulique, les pieux φ800 auront un éloignement de 1,20 m.

En outre, pour mieux rapprocher le comportement des modèles de calcul et la réalité, en ce qui concerne son importance pour la phase d'excavation, la dalle de fond de la station a été modélisée selon un élément type « cluster » avec un comportement linéaire élastique, un poids volumique de 25 KN/m<sup>3</sup>, un module de déformabilité de 33 GPa et un coefficient de Poisson de 0,2. Dans le projet de structures intérieures cette dalle sera dimensionnée structurellement [9].

**Tableau II 5** – Caractéristiques des éléments type « node-to-node anchor » considérés pour simuler les niveaux de boutonnage matérialisés par des profils métalliques

Élément structurel	80% EA (KN)	Éloignement (m)
HEB500	3,824x10 <sup>6</sup>	Variable pour chaque cas
2HEB300	4,768x10 <sup>6</sup>	Variable pour chaque cas

2HEB500	7,648x10 <sup>6</sup>	Variable pour chaque cas
---------	-----------------------	--------------------------

**Tableau II 6** – Caractéristiques par mètre de développement des éléments du type « plate » considérés pour simuler les structures de blindage

Élément structurel	EA (KN/m)	EI (KN.m <sup>2</sup> /m)	h <sub>équivalent</sub> (m)	Poids (KN/m/m)	v
Paroi moulée (e=1,00 m)	33x10 <sup>6</sup>	2,75x10 <sup>6</sup>	1,00	14,50	0,2
Paroi moulée (e=1,00 m) + paroi de revêtement (e=1,40 m)	79,20x10 <sup>6</sup>	38,02x10 <sup>6</sup>	2,40	34,80	
Dalle de couverture (*)	49,47x10 <sup>6</sup>	19,81x10 <sup>6</sup>	2,19	38,65	
Dalle intermédiaire (*)	24,16x10 <sup>6</sup>	1,86x10 <sup>6</sup>	0,96	18,88	
Rideaux de pieux φ800//1,10	15,08x10 <sup>6</sup>	603,2x10 <sup>3</sup>	0,69	6,85	
Rideaux de pieux φ800//1,10 + Paroi des accès (e=0,60 m)	34,88x10 <sup>6</sup>	4,79x10 <sup>6</sup>	1,28	15,85	
Rideaux de pieux φ800//1,20	13,82x10 <sup>6</sup>	552,9x10 <sup>3</sup>	0,69	6,28	
Rideaux de pieux φ800//1,20 + Paroi des accès (e=0,60 m)	33,62x10 <sup>6</sup>	4,59x10 <sup>6</sup>	1,28	15,28	
Dalle supérieure des accès (e=0,60 m)	19,80x10 <sup>6</sup>	594,0x10 <sup>3</sup>	0,60	15,00	
Dalle inférieure des accès (e=0,70 m)	23,10x10 <sup>6</sup>	943,2x10 <sup>3</sup>	0,70	17,50	

## II.6 Conclusion

Plaxis2D est un outil puissant pour les ingénieurs civils et géotechniciens, leur permettant d'analyser avec précision le sol et les structures géotechniques. Le logiciel permet d'intégrer divers paramètres tels que les propriétés du sol, les charges et les conditions aux limites, fournissant ainsi des résultats détaillés pour mieux comprendre le comportement du système et améliorer la conception des structures.

En résumé, l'utilisation d'outils informatiques comme Plaxis2D améliore la précision et l'efficacité de la conception et de l'évaluation des murs de soutènement en béton et d'autres structures géotechniques, contribuant ainsi à améliorer la qualité et la stabilité des projets d'ingénierie en général [9].

# *CHAPITRE*

## *III*

*Présentation DePLAXIS*

*Et Modélisation*

*Numérique*

### III.1 Introduction

PLAXIS 2D est un logiciel d'analyse géotechnique numérique largement utilisé pour la modélisation et la simulation du comportement des sols et des structures dans le domaine de l'ingénierie géotechnique. Il est principalement utilisé pour étudier les problèmes de stabilité des pentes, les fondations, les excavations souterraines, les tunnels, les remblais, les digues et les murs de soutènement. En utilisant PLAXIS 2D, les ingénieurs peuvent simuler divers scénarios et conditions géotechniques pour évaluer la performance des structures et prendre des décisions éclairées en matière de conception et de construction.

En 1998, la première version de PLAXIS 2D pour Windows a été publiée. Entre-temps, un noyau de calcul pour les calculs d'éléments finis en 3D a été développé, ce qui a abouti à la publication du programme 3DTunnel en 2001. 3DFoundation était le deuxième programme PLAXIS tridimensionnel développé en collaboration avec TNO. Le programme 3DFoundation a été publié en 2004. Cependant, ni 3DTunnel ni 3DFoundation ne permettaient de définir des géométries 3D arbitraires en raison de leurs limitations géométriques. PLAXIS 3D est un programme complet d'éléments finis tridimensionnel qui combine une interface facile à utiliser avec des fonctionnalités de modélisation 3D complètes. Le premier programme PLAXIS 3D a été publié en 2010. [10].

### III.2 Objectifs

PLAXIS a pour objectif de fournir un outil d'analyse pratique utilisé par les ingénieurs géotechniciens qui ne sont pas nécessairement des spécialistes en numérique. Les calculs non linéaires par des éléments finis sont souvent considérés comme fastidieux et chronophages par les ingénieurs praticiens. L'équipe de recherche et développement de PLAXIS a abordé cette question en concevant des procédures de calcul robustes et théoriquement solides, qui sont encapsulées dans une interface logique et facile à utiliser. En conséquence, de nombreux ingénieurs géotechniciens du monde entier ont adopté le produit et l'utilisent à des fins d'ingénierie et de conception.

### III.3 Courte revue des fonctionnalités

PLAXIS est un logiciel de méthode des éléments finis destiné à l'analyse bidimensionnelle ou tridimensionnelle des déformations, de la stabilité, de la dynamique et des écoulements d'eau souterraine en génie géotechnique. Les applications géotechniques requièrent des modèles

constitutifs avancés pour la simulation du comportement non linéaire, dépendant du temps et anisotrope des sols et/ou des roches. De plus, étant donné que le sol est un matériau multi phase, des procédures spéciales sont nécessaires pour traiter les pressions interstitielles et la saturation (partielle) dans le sol. Bien que la modélisation du sol soit un enjeu important, de nombreux projets géotechniques impliquent la modélisation de structures et de leur interaction avec le sol. [10].

### III.4 Interfaces

Des éléments d'interface sont disponibles pour modéliser l'interaction sol-structure. Par exemple, ces éléments peuvent être utilisés pour simuler la zone mince de matériau fortement cisaillement au contact entre un revêtement de tunnel et le sol environnant. Les valeurs de l'angle de frottement et de l'adhérence de l'interface ne sont généralement pas les mêmes que l'angle de frottement et la cohésion du sol environnant.

#### III.4.1 Plaques (Plates)

Des plaques (ou éléments de coque) peuvent être utilisées pour modéliser des structures minces dans le sol avec une rigidité à la flexion significative. Leur comportement peut être élastique ou élastoplastique non linéaire. Les applications typiques comprennent les dalles de plancher, les murs et les revêtements de tunnel [10].

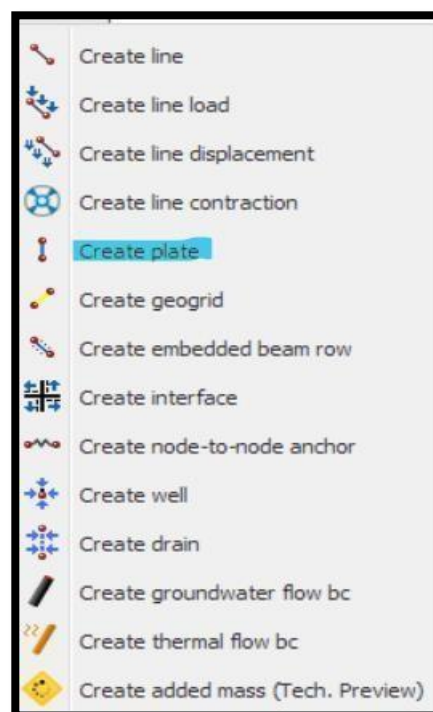


Figure III.1. Éléments (Plates)

### III.4.2 Poutres (Beams)

Des éléments de poutre peuvent être utilisés pour modéliser des objets unidimensionnels minces avec une rigidité à la flexion significative. Leur comportement peut être élastique ou élastoplastique non linéaire. Les applications typiques comprennent les boudins, les poutres et les colonnes structurales. [10].

### III.4.3 Ancrages (Anchors)

Les plaques et blocs de stabilisation sont de plus en plus courants dans les structures géotechniques. Ils sont couramment utilisés pour améliorer la stabilité et réduire le déplacement des murs de soutènement, des murs à membrane, des murs de palplanches, des structures offshore, des tours, etc.

Des éléments élastoplastique à ressort sont utilisés pour modéliser les enclous et les tirants. Le comportement de ces éléments est défini en utilisant une raideur normale et une force maximale. Une option spéciale existe pour l'analyse des ancrages de sol précontraintes et des soutènements d'excavation [10].

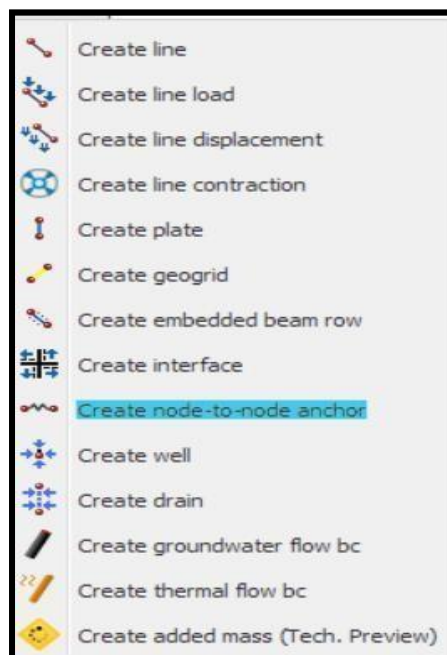


Figure III.2. Ancrages (Anchors)

#### III.4.4 Géogrilles (geogrids)

Les géogrilles (ou géotextiles) sont souvent utilisées dans la pratique pour la construction de remblais renforcés ou de structures de retenue de sol. Ces éléments peuvent être simulés dans PLAXIS en utilisant des éléments de tension spéciaux. Il est souvent pratique de combiner ces éléments avec des interfaces pour modéliser l'interaction avec le sol environnant. Le comportement de ces éléments est défini en utilisant une raideur normale et une force de tension maximale. [10].

### III.5 Modélisation de sol définis par l'utilisateur

#### III.5.1 Etapes de modélisation

Nous avons passé par plusieurs étapes :

**Géométrie du modèle** : la première étape consiste à définir la géométrie du modèle, y compris les dimensions, les couches de sol, les profils de sol, les structures, etc. PLAXIS 2D fournit des outils pour créer et modifier facilement la géométrie du modèle.

**Propriétés du sol** : Vous devez déterminer les propriétés géotechniques du sol, telles que les paramètres de cisaillement, la compressibilité, la perméabilité, etc. Ces propriétés déterminent le comportement mécanique du sol lors de la simulation.

**Conditions aux limites** : les conditions aux limites spécifient les pressions, les déplacements ou les débits d'eau appliqués aux limites du modèle. Vous pouvez spécifier des conditions aux limites telles que des contraintes, des charges, des pressions latérales, des conditions de drainage, etc.

**Chargement** : vous pouvez appliquer des charges statiques ou dynamiques au modèle, telles que des charges ponctuelles, des charges réparties, des surcharges, des forces sismiques, etc. PLAXIS 2D peut également simuler des processus de construction, tels que l'excavation, la construction de murs de soutènement, etc.

**Analyse** : Une fois que vous avez déterminé la géométrie, les propriétés du sol, les conditions aux limites et les charges, vous pouvez effectuer l'analyse. PLAXIS 2D V20 utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les équations d'équilibre et prédire le comportement des sols et des structures. Vous pouvez obtenir des résultats comme le stress, les pressions, les déplacements, les tassements, etc.

### III.6 L'application sur PLAXIS 2D

L'application PLAXIS 2D dans le domaine géotechnique fournit plusieurs fonctionnalités et capacités clés pour l'analyse et la modélisation des interactions sol-structure. Vous trouverez ci-dessous un aperçu des principales applications de PLAXIS 2D et de la méthode de modélisation avec les prochaines étapes.

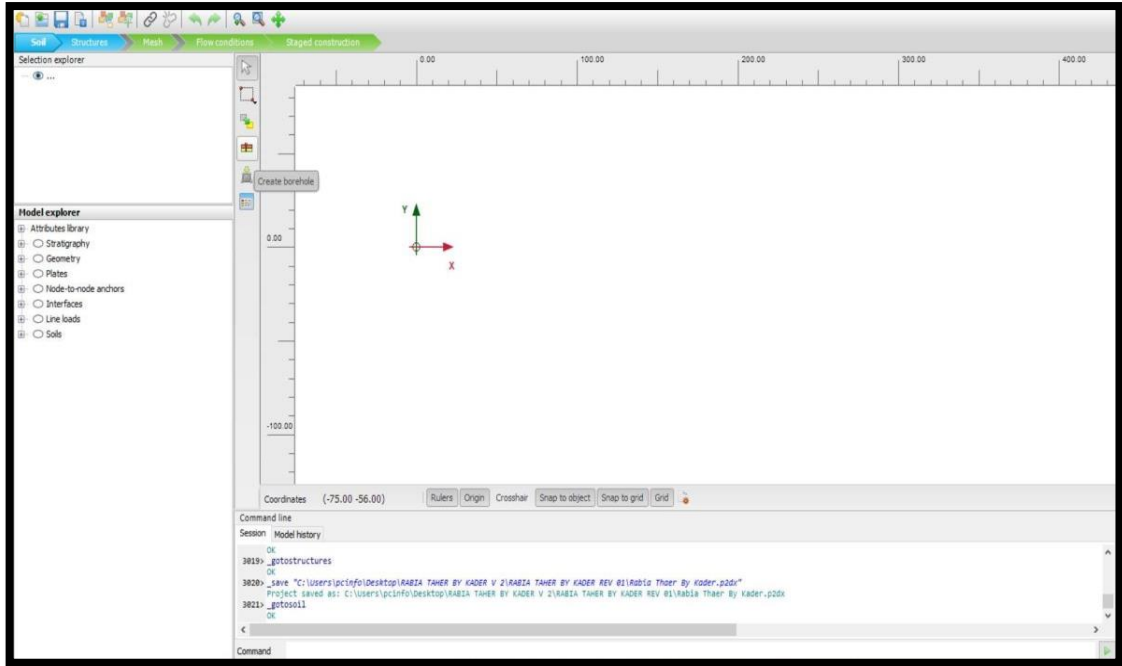


Fig III.3 Définition de couches sols

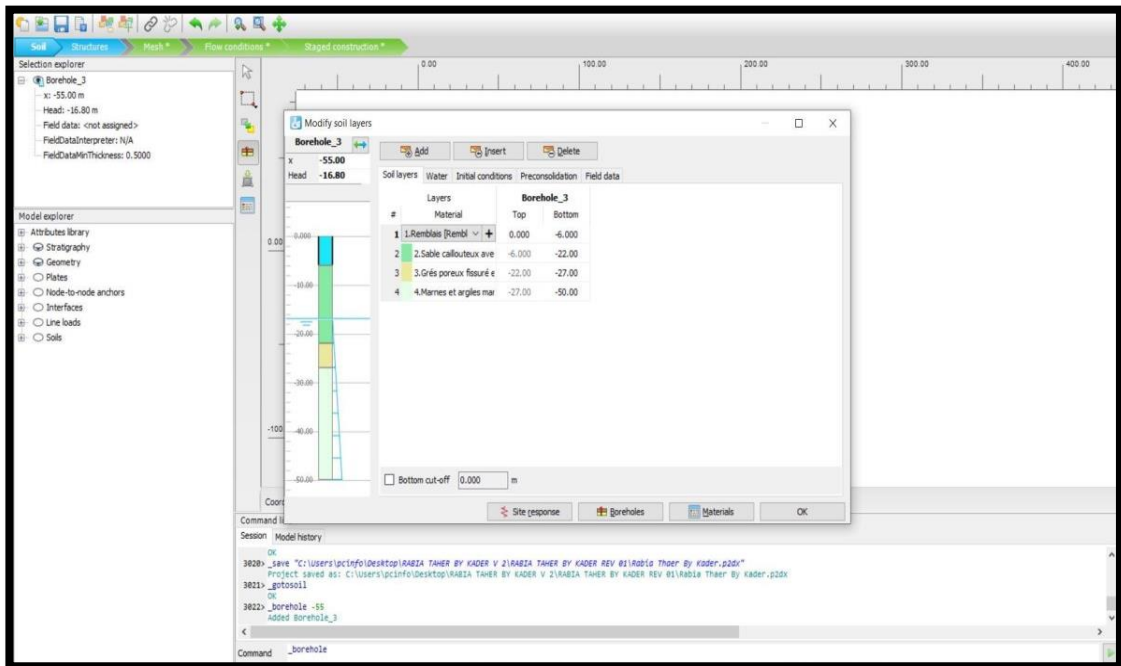


Fig III.4 Définie chaque faille de sol

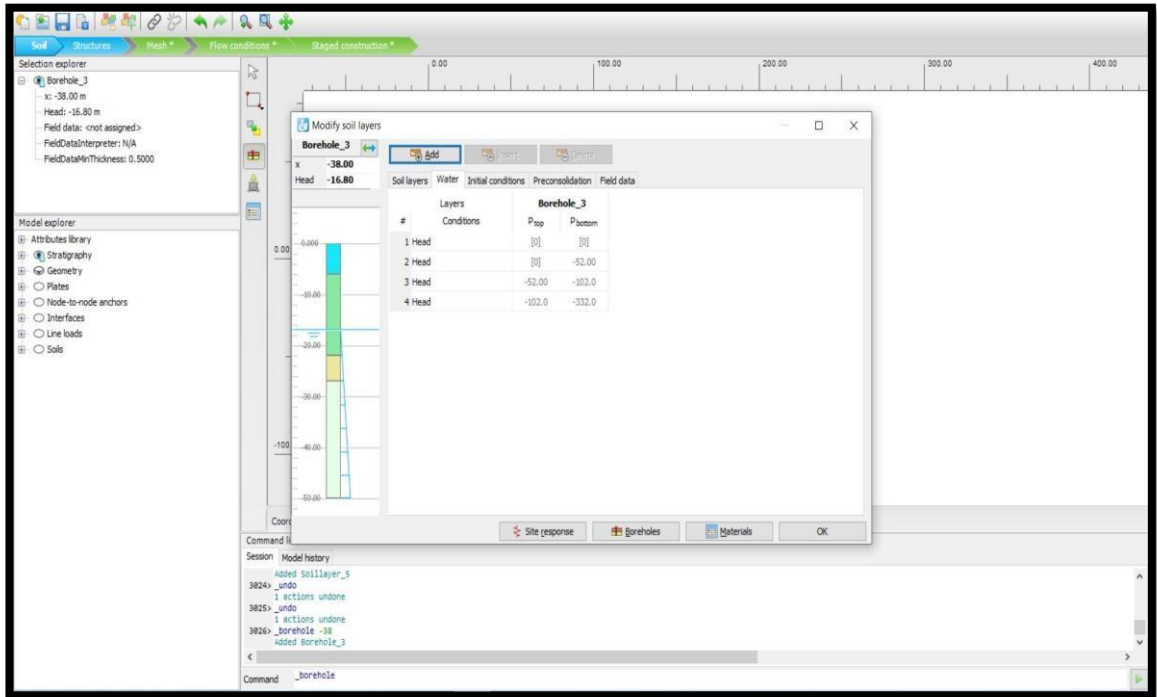


Fig III.5 définition du niveau de la nappe d'eau

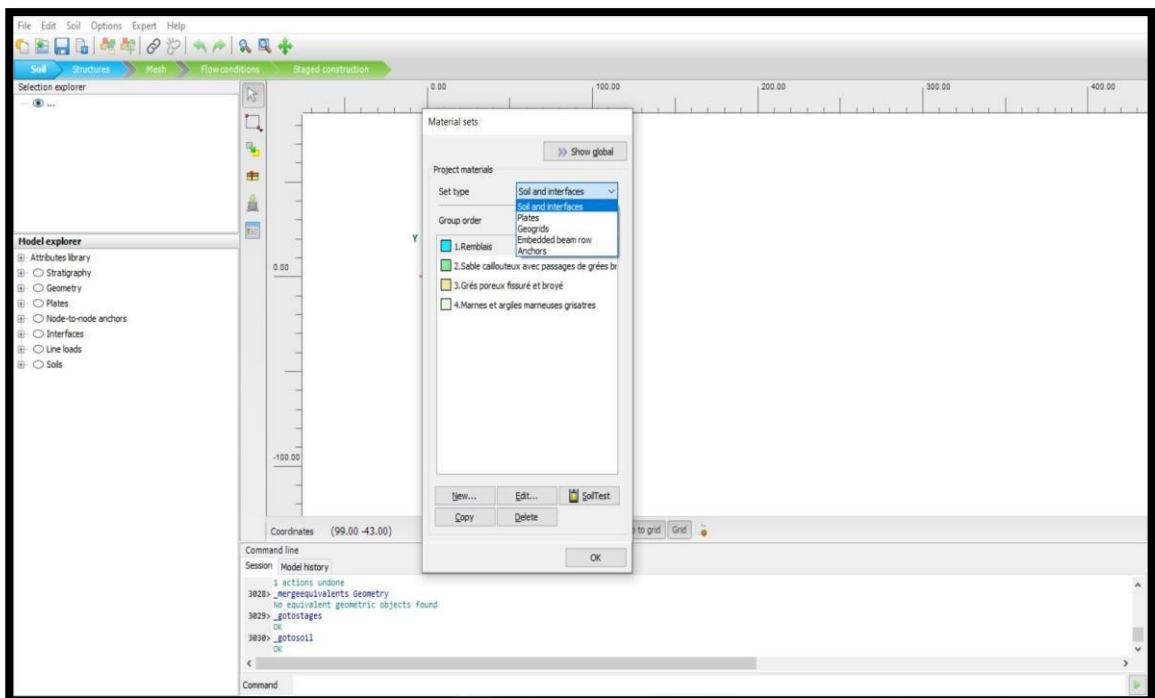


Fig III.6 déterminé les caractéristiques de chaque sol

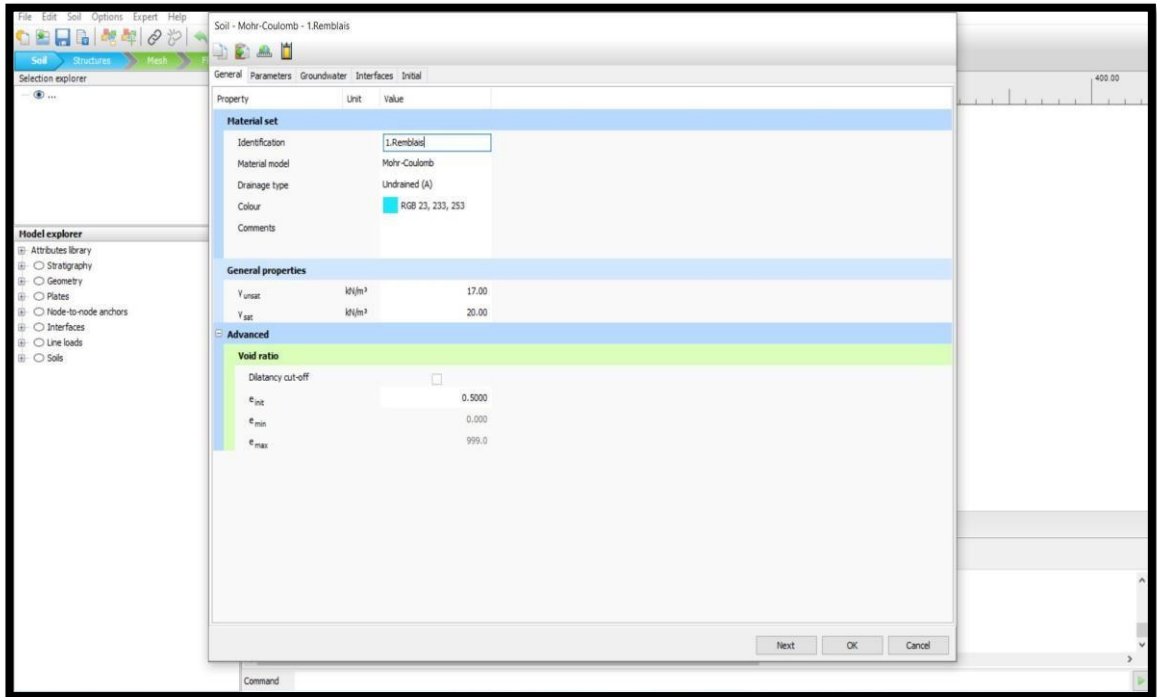


Fig III.7 déterminé les caractéristiques de chaque sol

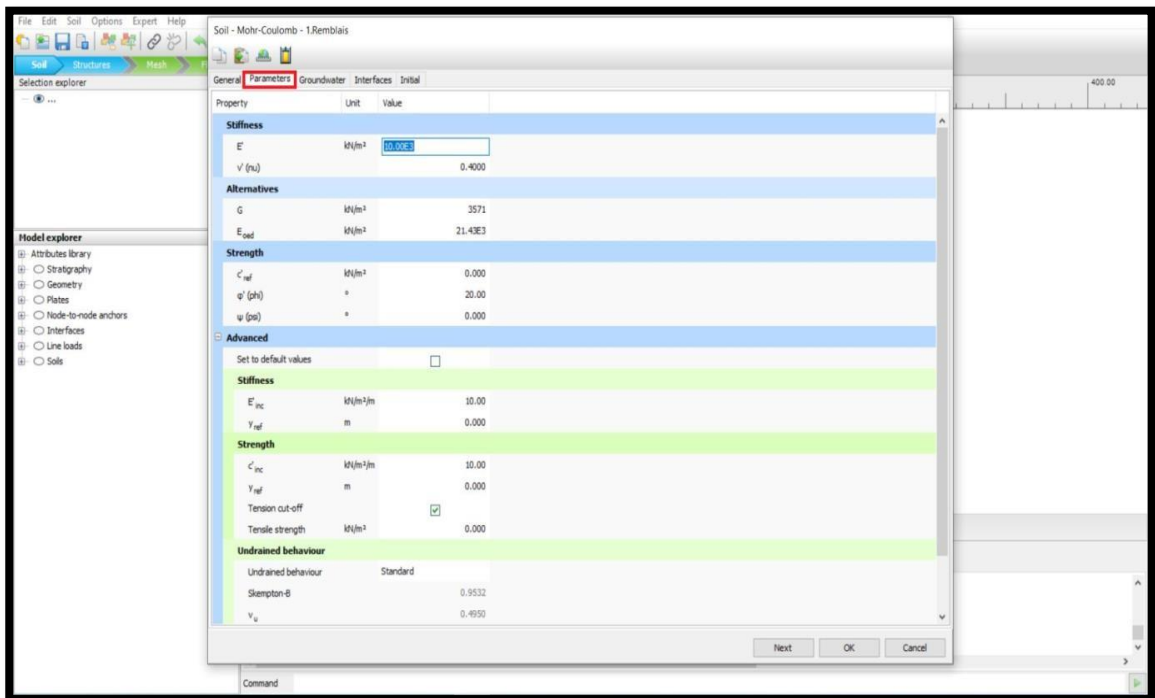


Fig III.8 déterminé les caractéristiques de chaque sol

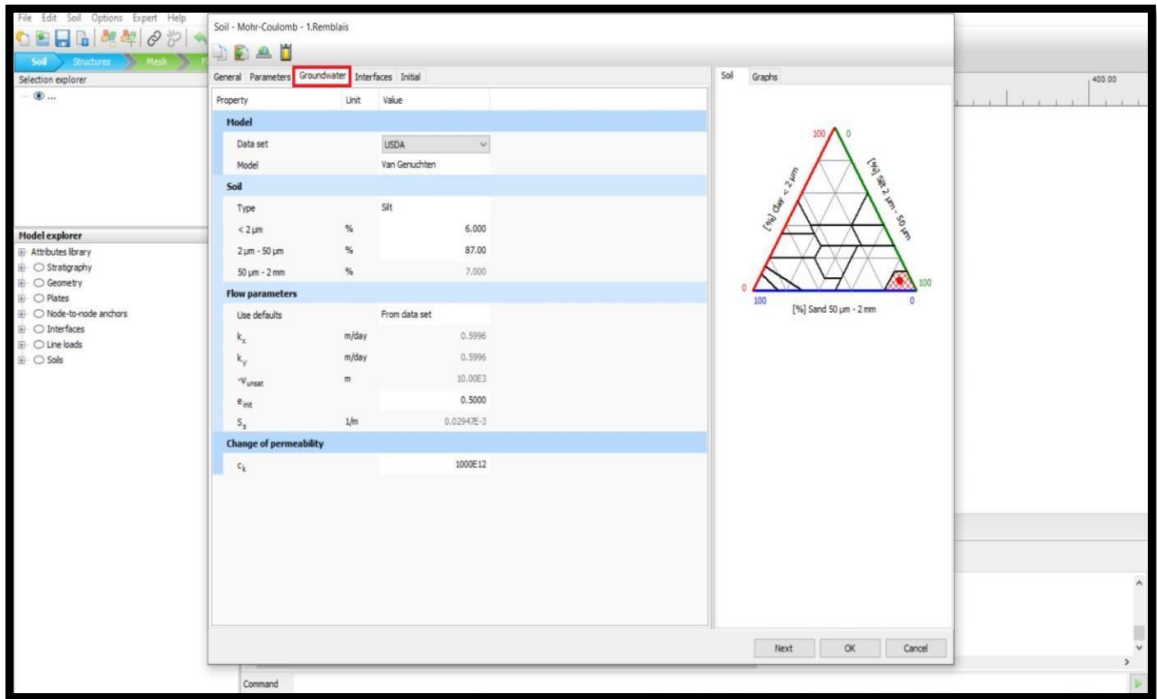


Fig III.9 déterminé les caractéristiques de chaque sol

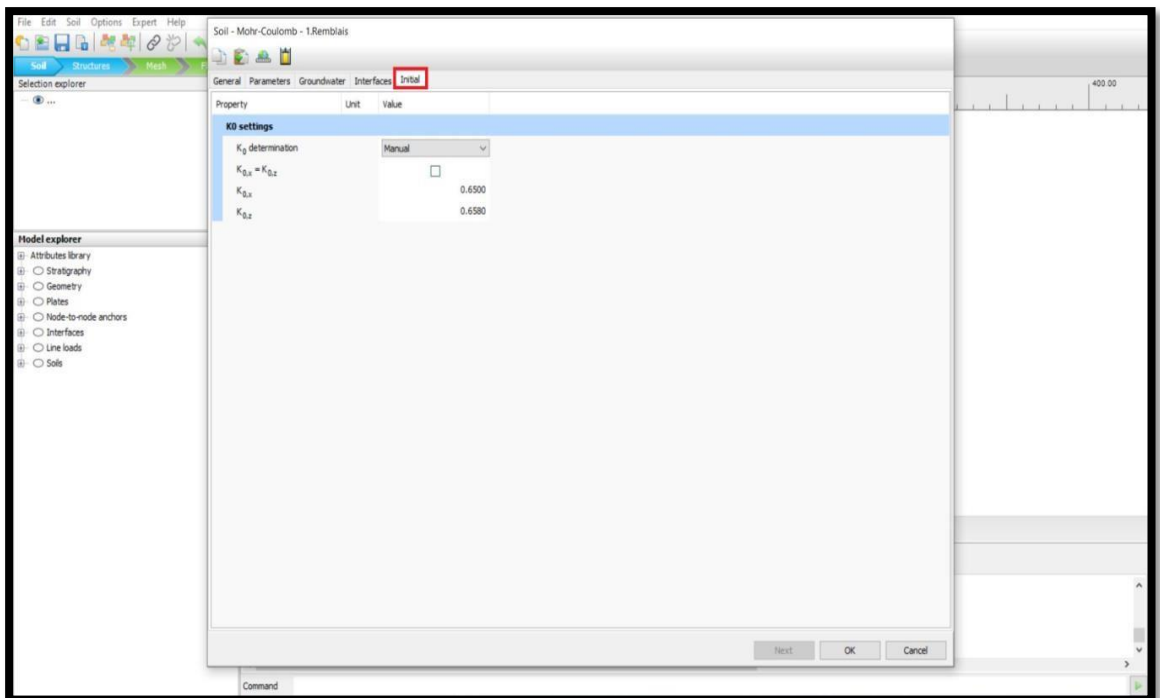


Fig III.10 déterminé les caractéristiques de chaque sol

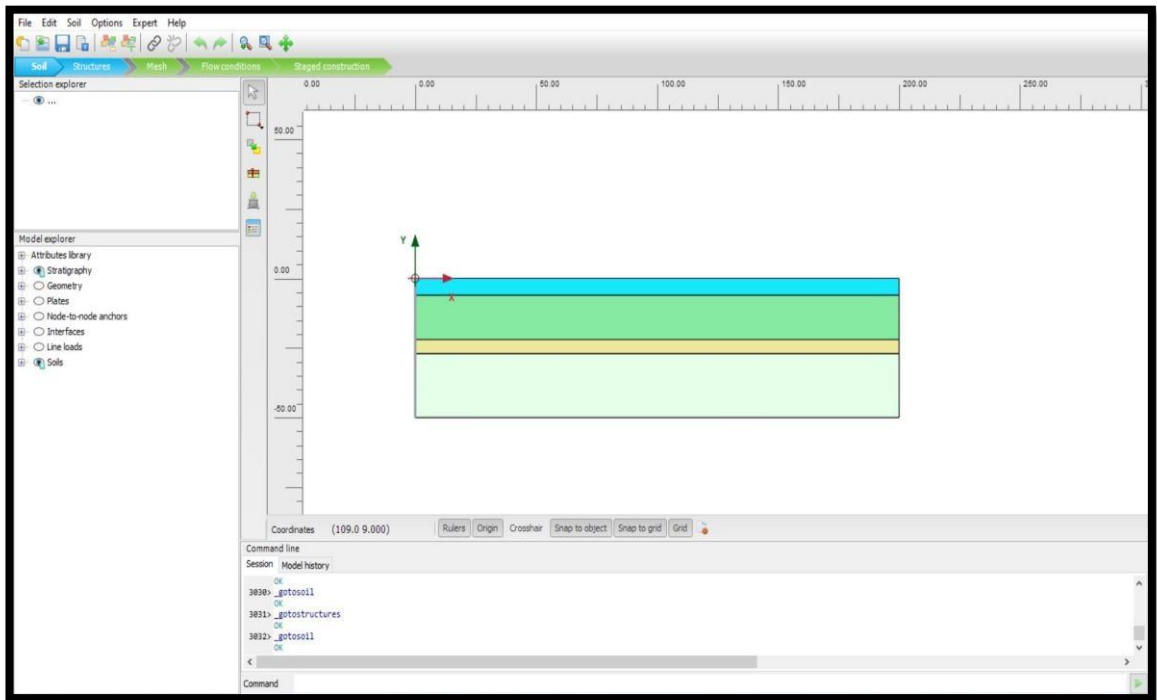


Fig III.11 déterminé les caractéristiques de chaque sol

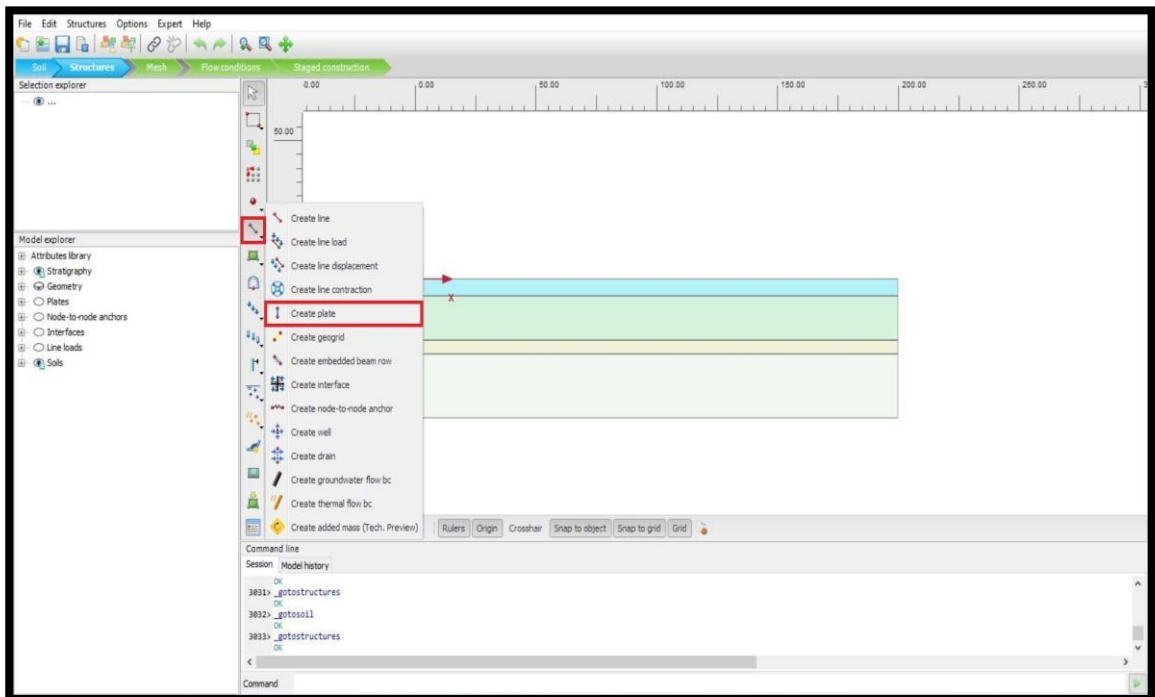


Fig III.12 définition du plate

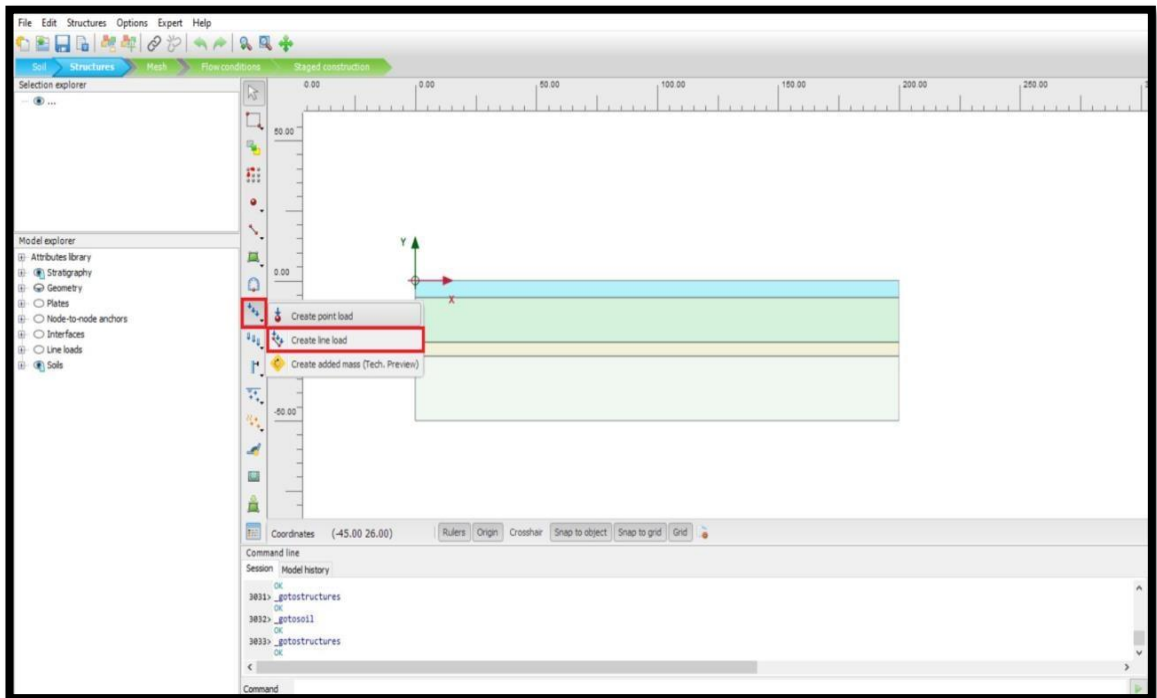


Fig III.13 définition de la charge

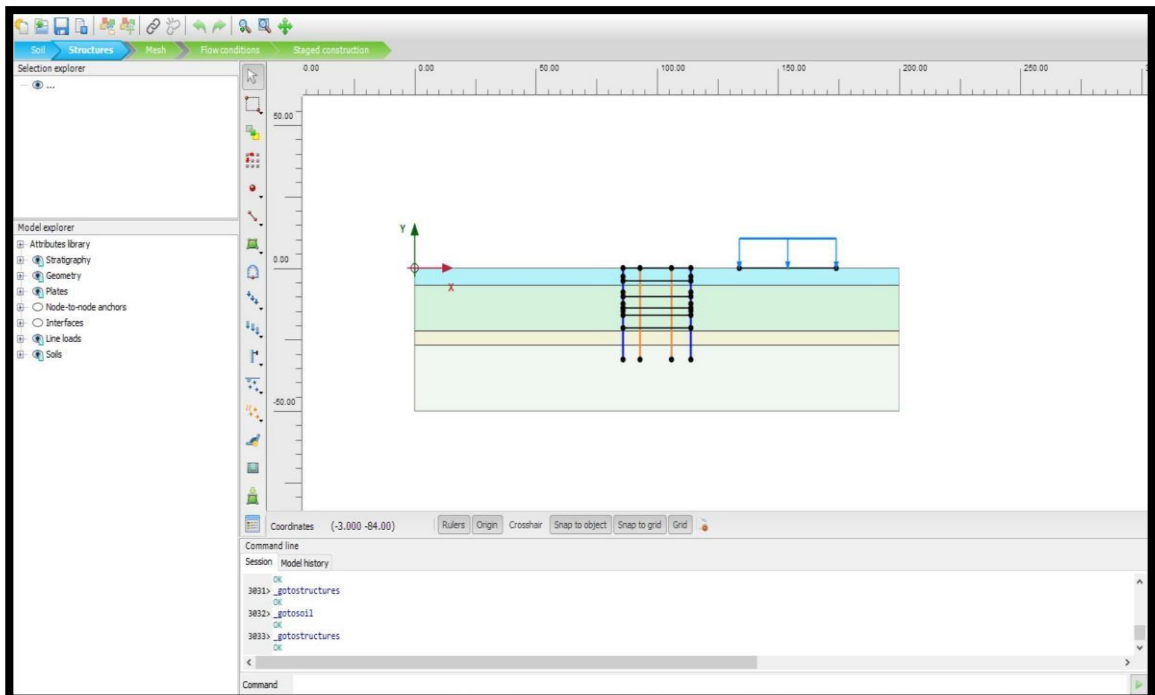


Fig III.14 complètement de modélisation

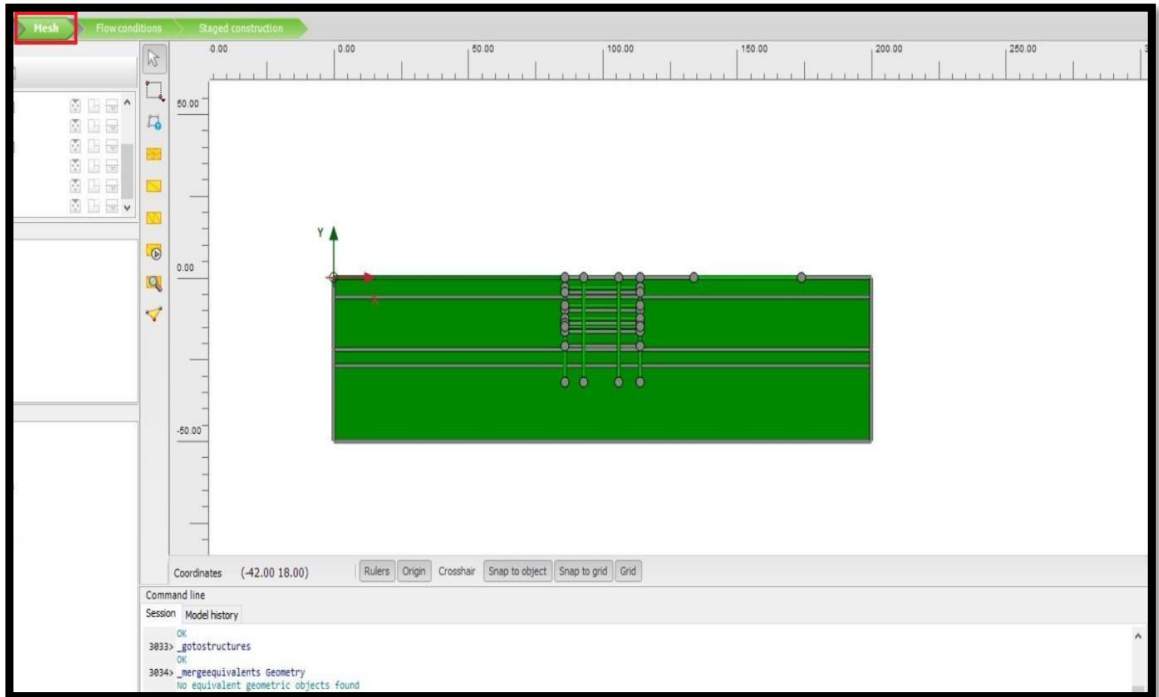


Fig III.15 Maillage du modèle

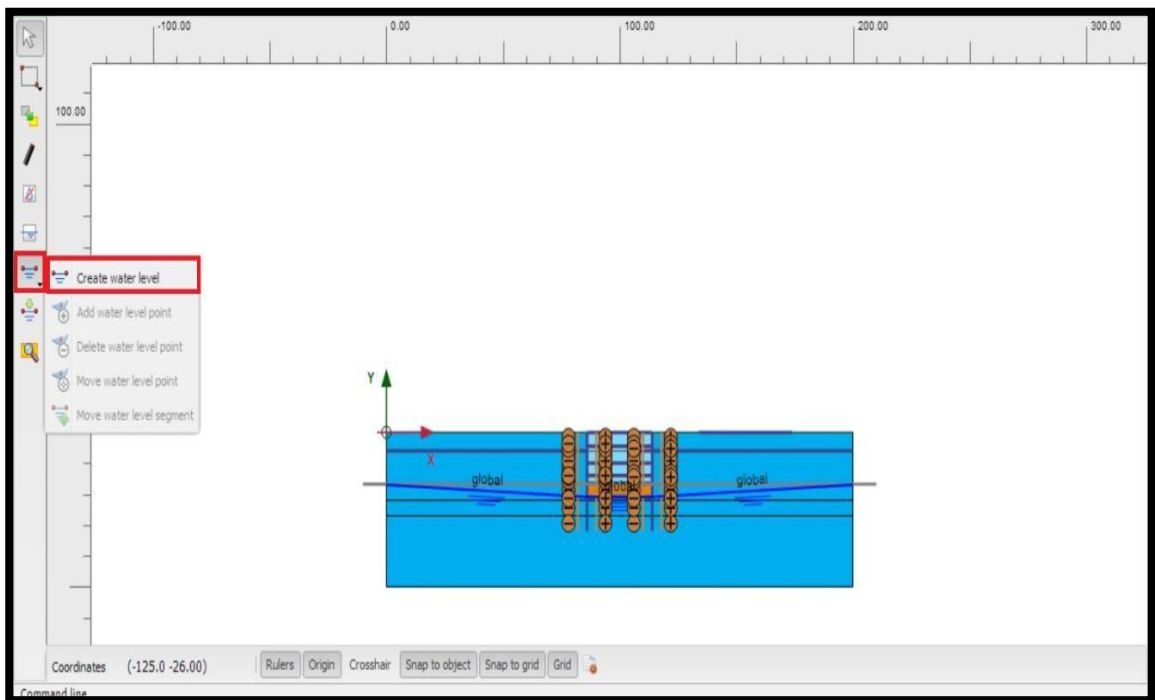


Fig III.16 modification de la nappe d'eau

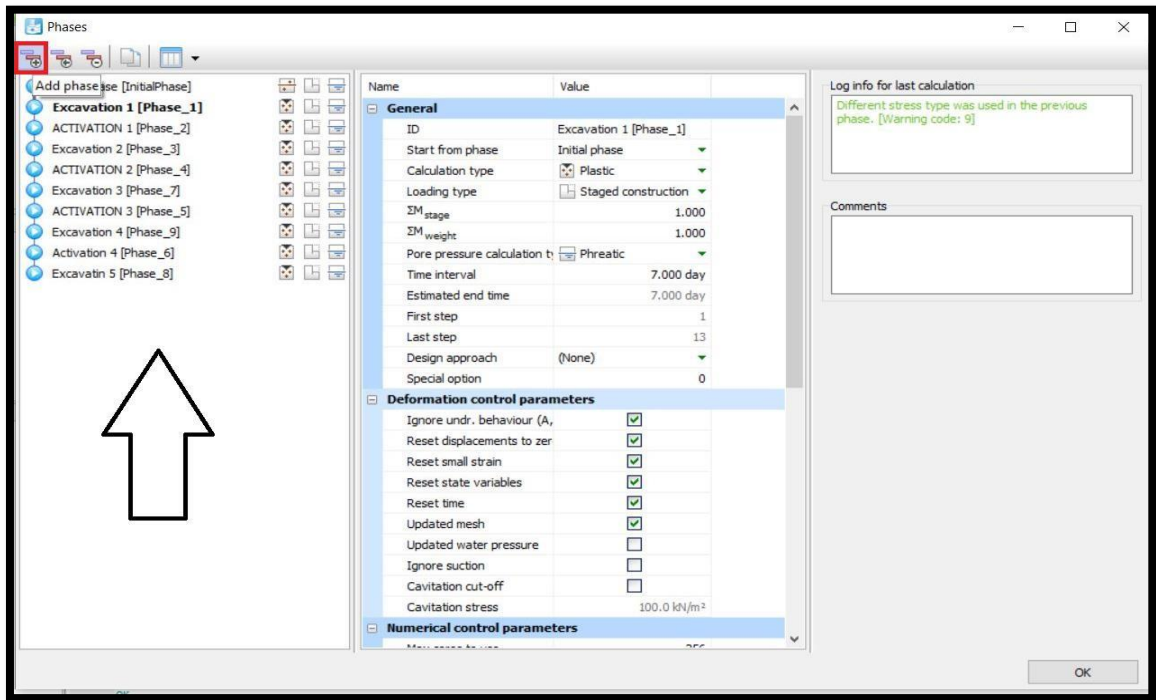


Fig III.17 crée les phases d'excavation

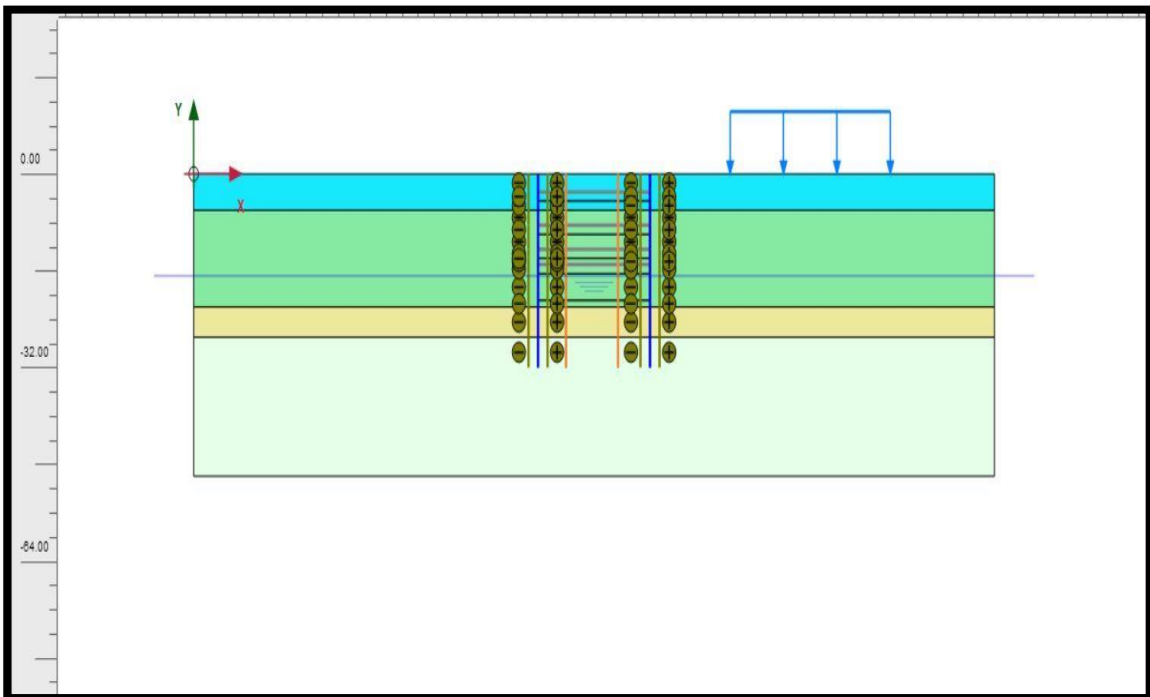


Fig III.18 fin complètement de modélisation

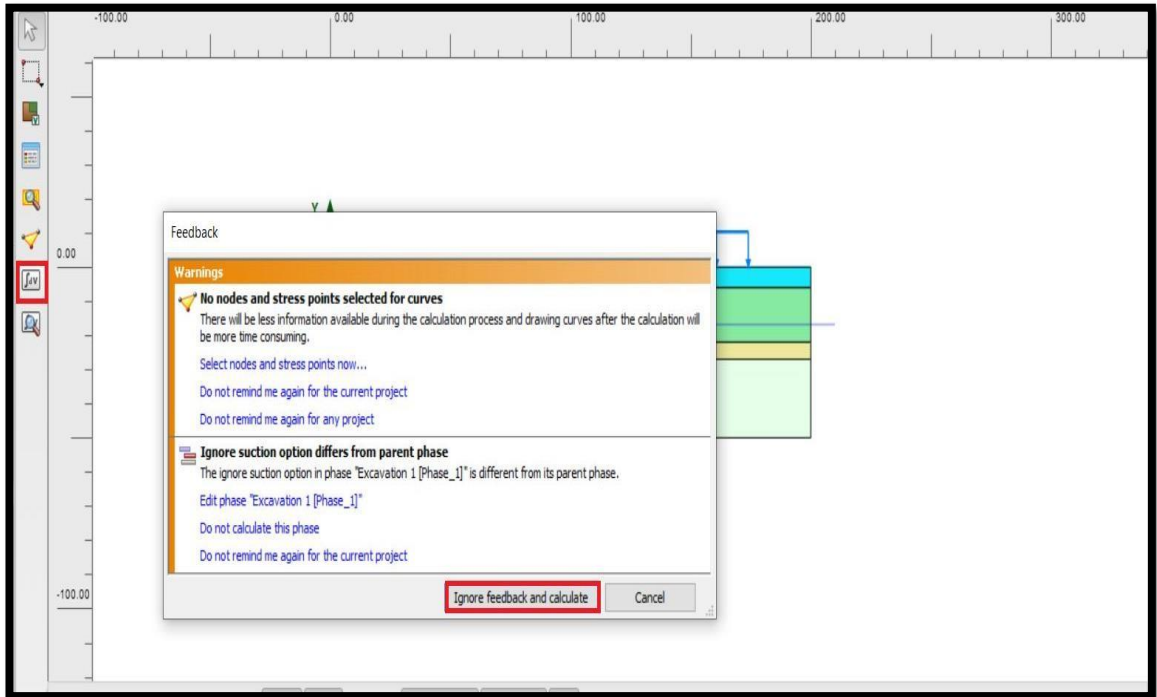


Fig III.19 lancement du calcul

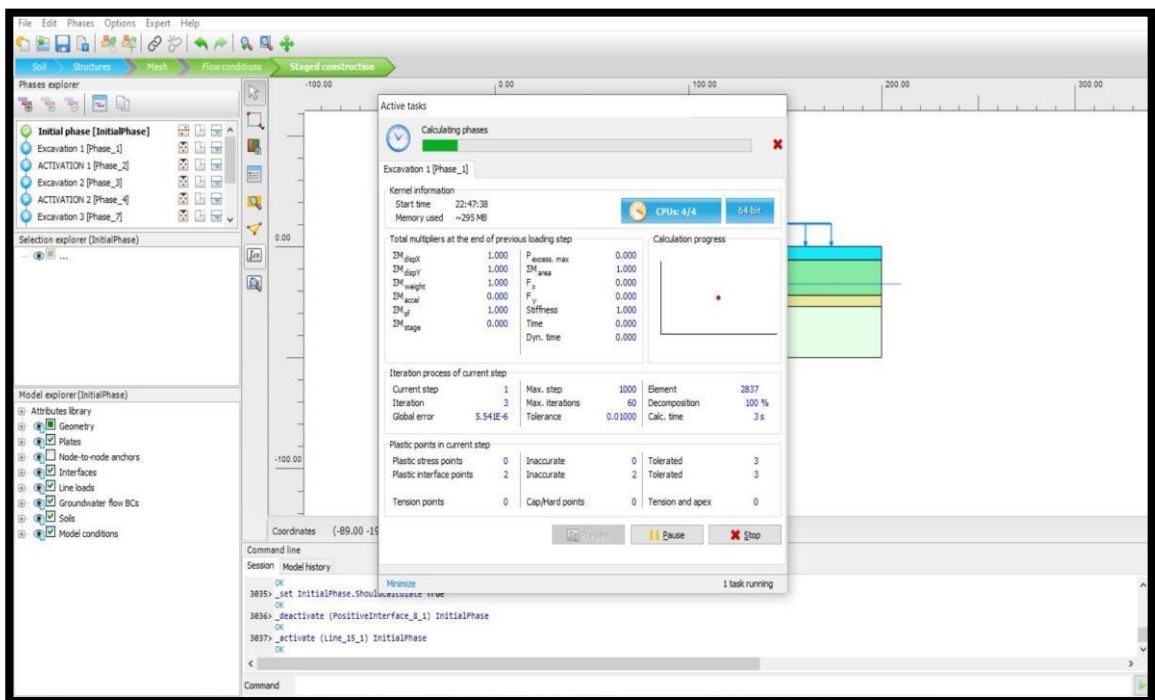


Fig III.20 calcul en cours

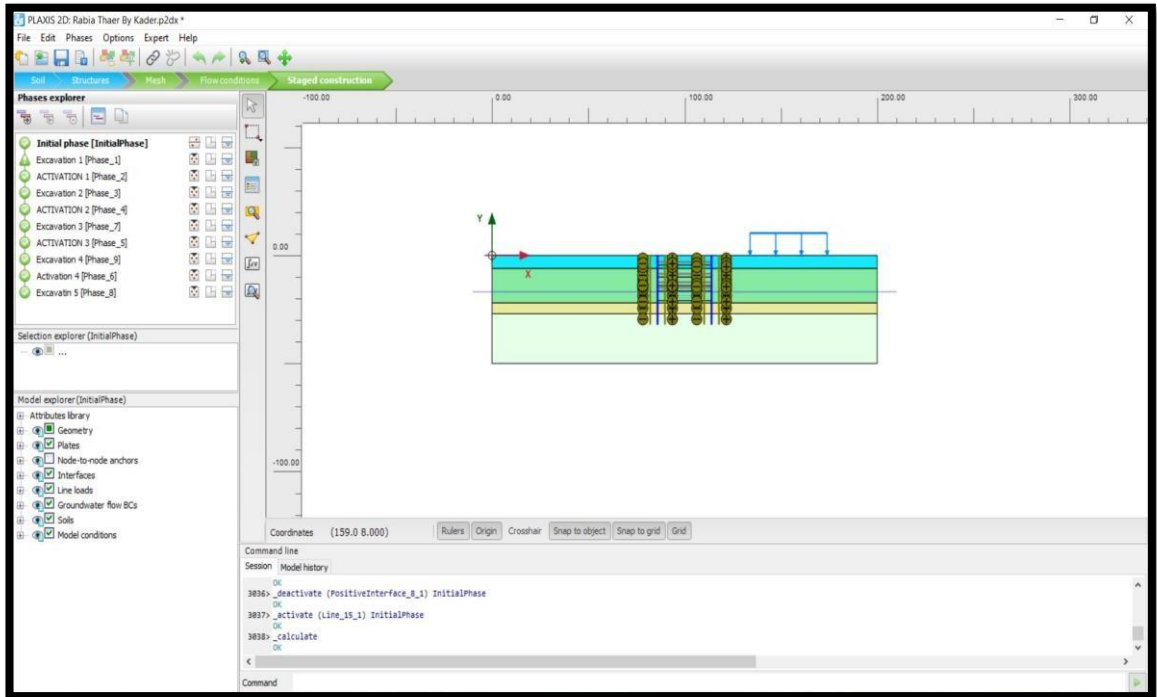


Fig III.21 fin du calcul

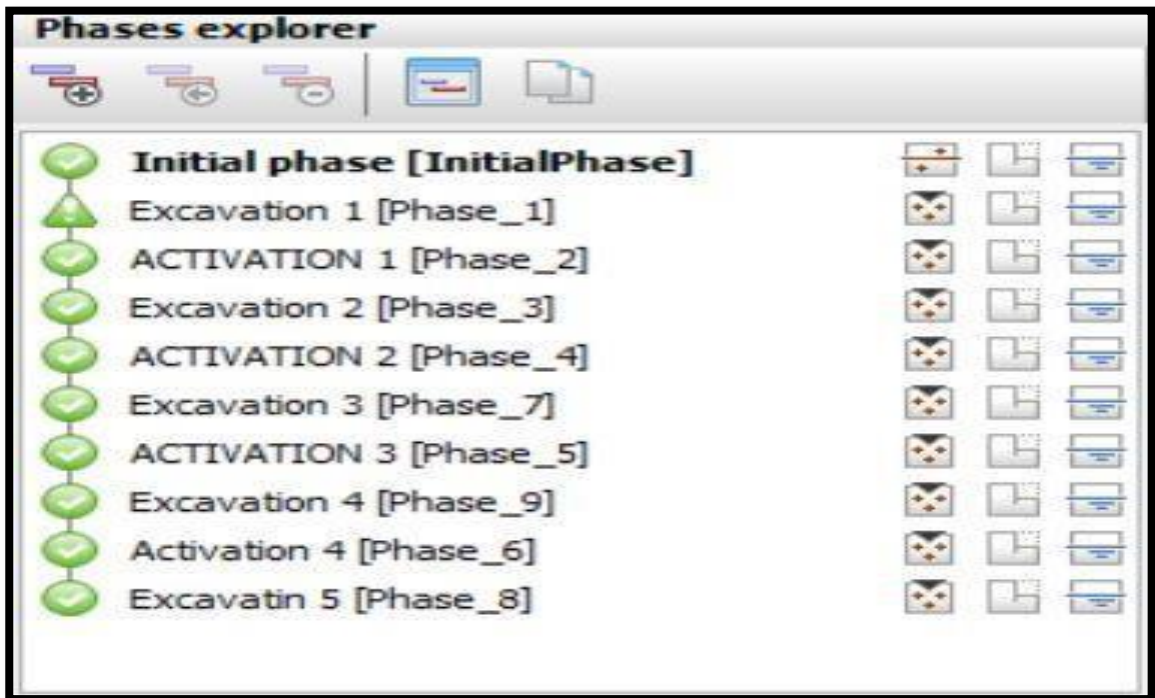


Fig III.22 toutes les phases calcul

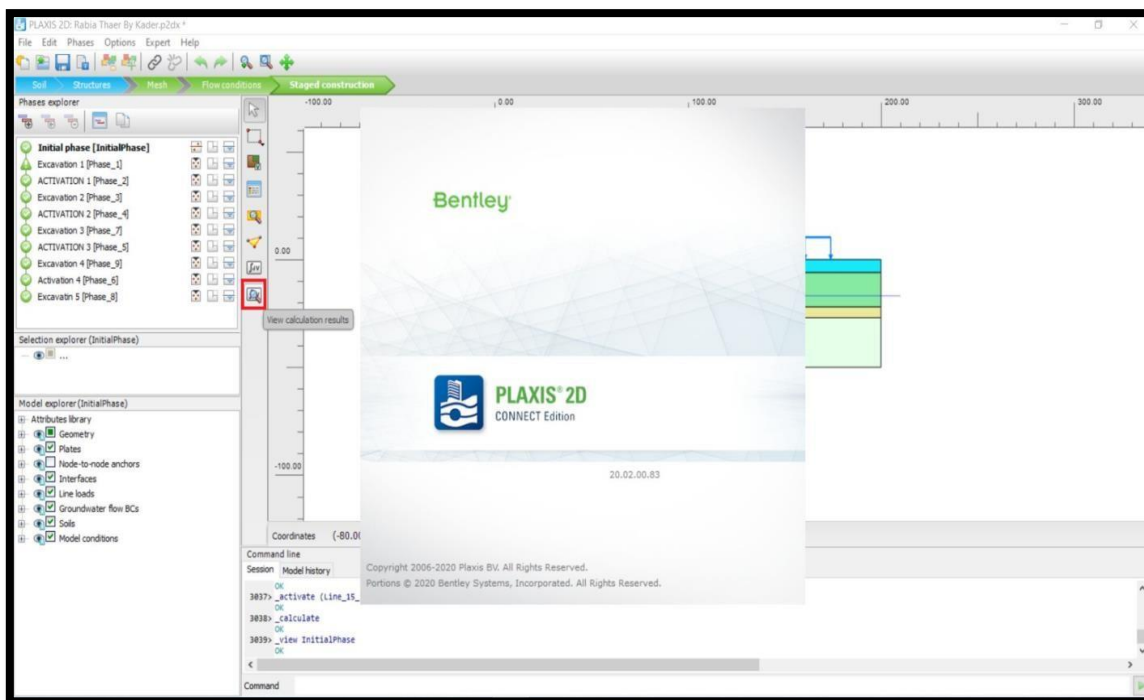
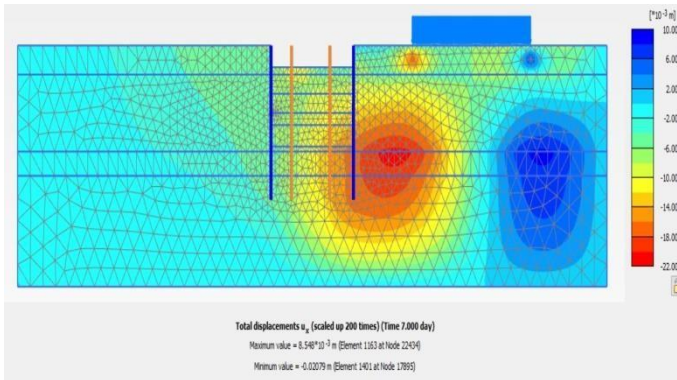


Fig III.23 affichages de résultant

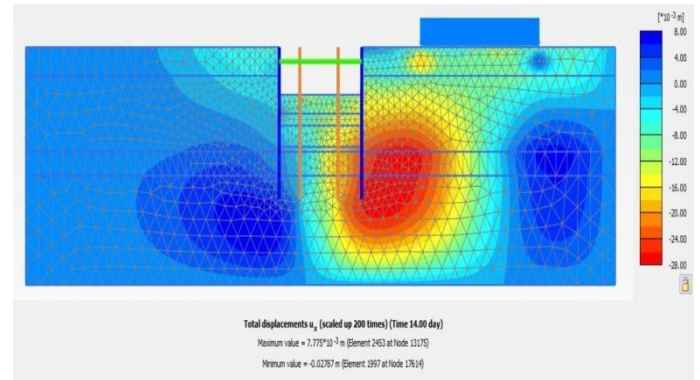
L'analyse par PLAXIS 2D s'impose comme une étape essentielle pour évaluer le comportement des structures géotechniques, telles que les pentes, les fondations, les tunnels et les parois moulées. Ce processus rigoureux s'appuie sur une succession d'étapes méthodiques visant à reproduire fidèlement le problème géotechnique et à générer des résultats fiables. Comme l'illustrent les figures (Figure III.3 ; Figure III.23), la modélisation par PLAXIS 2D implique la définition des propriétés du sol, la création de la géométrie du modèle, la spécification des conditions aux limites, le calcul et l'analyse des résultats, et enfin, la validation et la communication des conclusions.

### III.7 Les Résultats Dans PLAXIS 2D

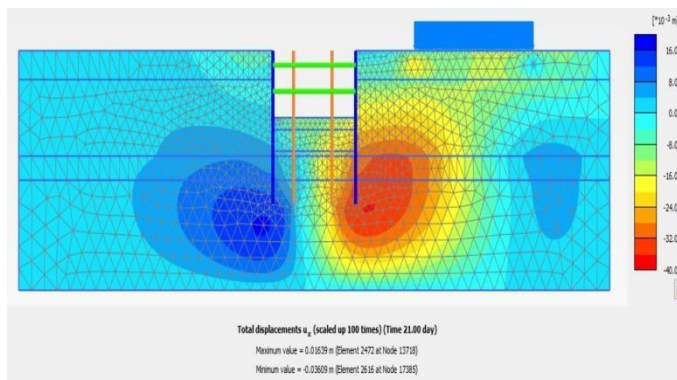
#### III.7.1 Le déplacement



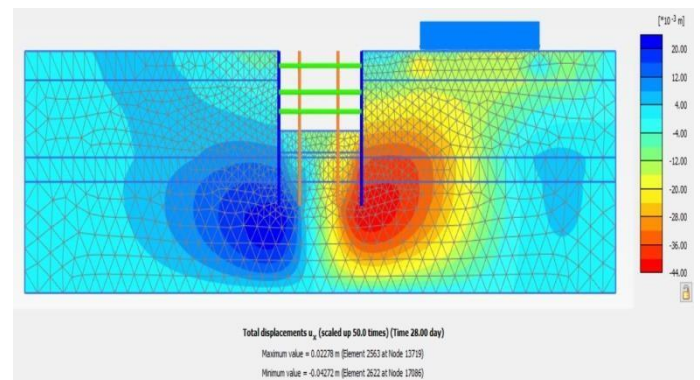
A) Contour du déplacement avec profondeur 4.5m



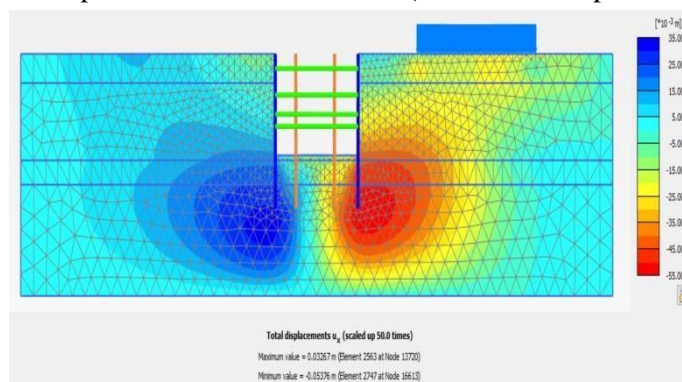
B) Contour du déplacement avec profondeur 9.98m



C) Contour du déplacement avec profondeur 13.98m



D) Contour du déplacement avec profondeur 16.48m

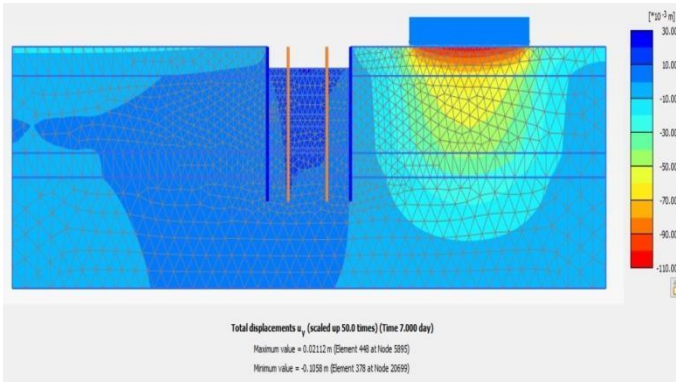


E) Contour du déplacement avec profondeur 20.94m

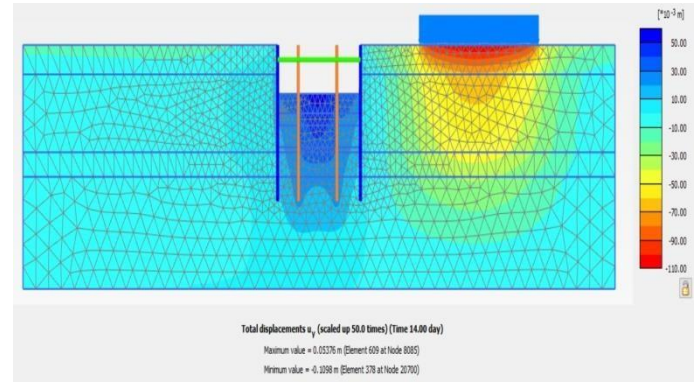
Figure III.24 - Contour du déplacement selon axe X en fonction de profondeur d'excavation

**Commentaire :**

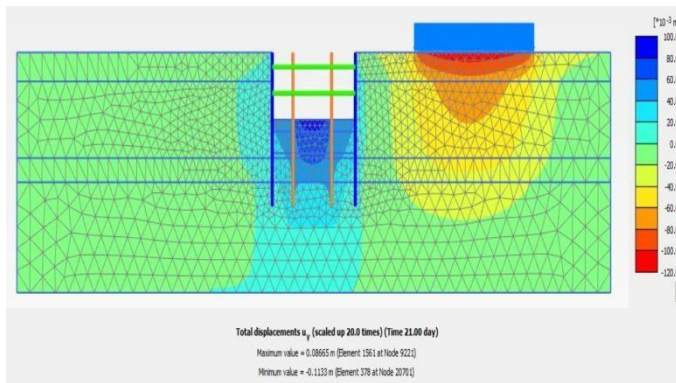
Effet de bâtiment sur les déplacements : les figures A, B, C, D et E illustrent l'effet de bâtiment sur les déplacements horizontaux dans les excavations 1 et 2. L'analyse révèle une diminution progressive des déplacements à mesure que l'on s'éloigne de l'excavation initiale. Ils sont admissibles.



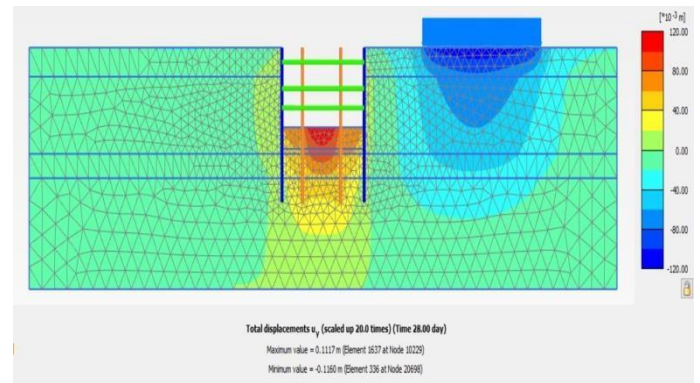
A) Contour du déplacement avec profondeur 4.5m



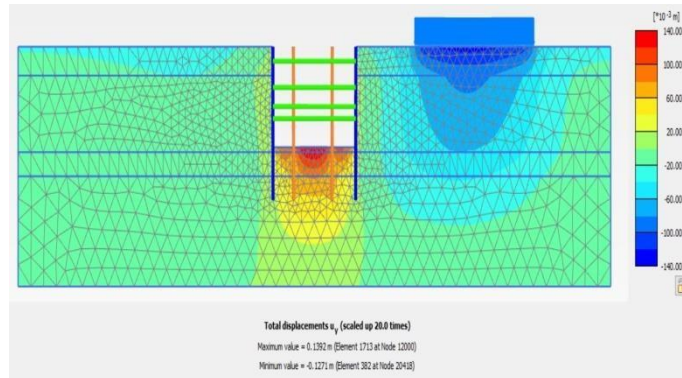
B) Contour du déplacement avec profondeur 9.98m



C) Contour du déplacement avec profondeur 13.98m



D) Contour du déplacement avec profondeur 16.48m



E) Contour du déplacement avec profondeur 20.94m

Figure III.25 - Contour du déplacement selon axe Y en fonction de profondeur d'excavation

- **Figure A:** Cette figure représente l'état initial, avant la construction du bâtiment. On observe une distribution des déplacements verticaux centrée sur l'excavation, avec des valeurs maximales proches de la paroi et diminuant graduellement avec la distance.
- **Figure B:** Cette figure montre l'état après la construction du bâtiment. La distribution des déplacements verticaux est modifiée par la présence de la structure. On remarque une

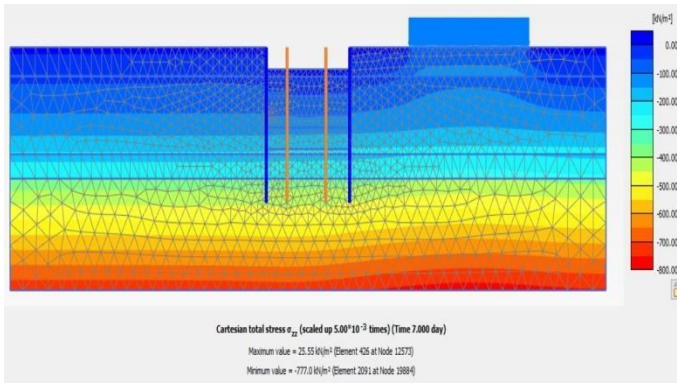
concentration des déplacements autour des fondations du bâtiment, indiquant une influence significative de la structure sur la répartition des contraintes dans le sol.

- **Figures C et D:** Ces figures illustrent les modèles de déplacement à des distances croissantes de l'excavation. La diminution progressive des déplacements avec la distance est clairement visible, confirmant l'effet atténuateur du bâtiment sur les mouvements du sol.
- **Figure E:** Cette figure représente l'état final après la construction complète du bâtiment. Les déplacements se sont stabilisés et le modèle global de distribution des déplacements est similaire à celui de la figure A, mais avec des magnitudes légèrement réduites en raison de la présence du bâtiment.

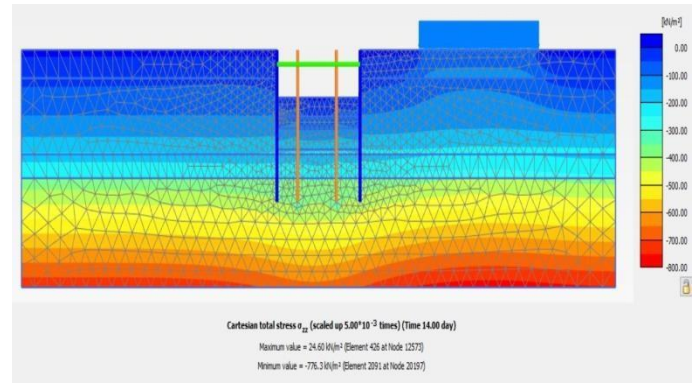
**En remarque :**

- La présence du bâtiment influence considérablement la distribution des déplacements verticaux autour des excavations.
- Le bâtiment agit comme une structure rigide, concentrant les déplacements autour de ses fondations et réduisant leur amplitude à mesure que la distance augmente.
- Cet effet est particulièrement évident dans la direction verticale, car les fondations et les murs du bâtiment résistent aux mouvements verticaux.

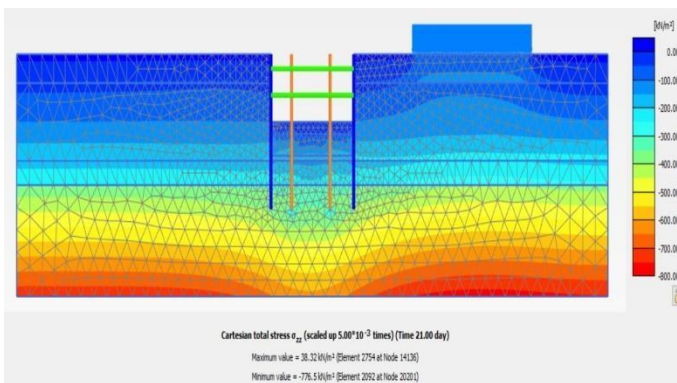
III.7.2 Les contraintes



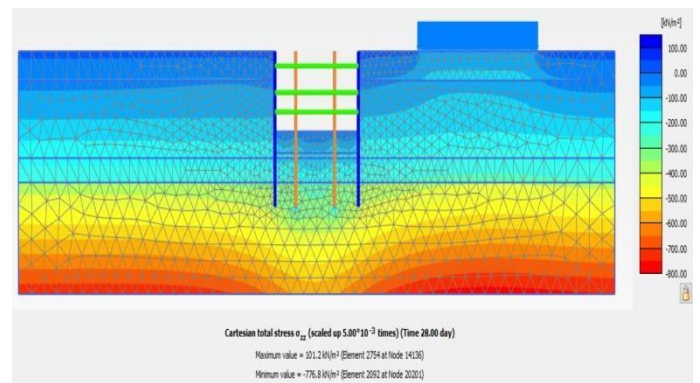
A) Contour du contraintes avec profondeur 4.5m



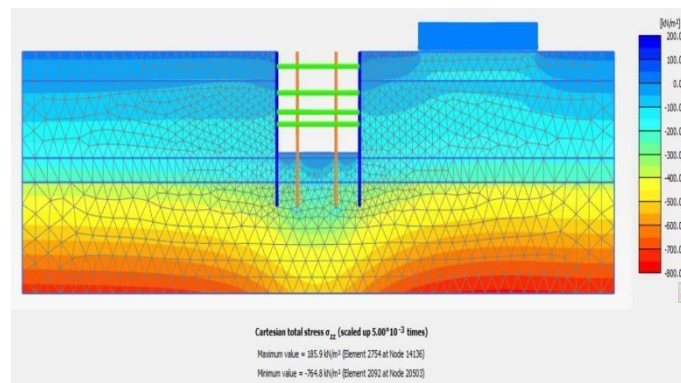
B) Contour du contraintes avec profondeur 9.98m



C) Contour du contraintes avec profondeur 13.98m



D) Contour du contraintes avec profondeur 16.48m

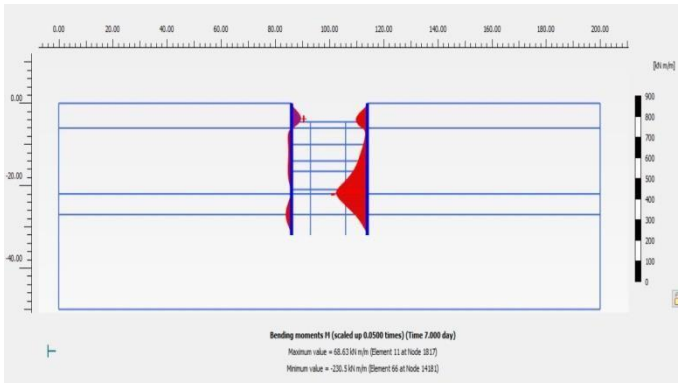


E) Contour du contraintes avec profondeur 20.94m

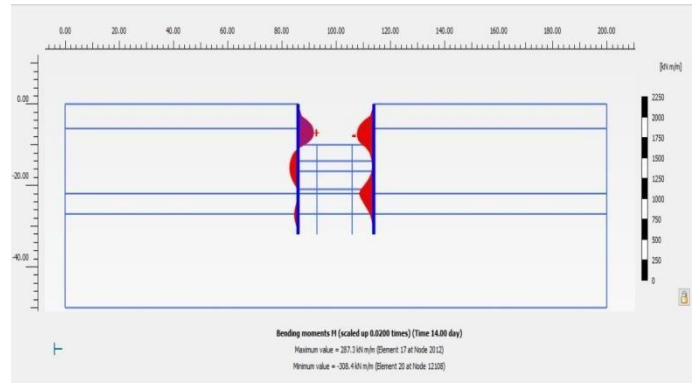
Figure III.26 - Contour du contraintes en fonction de profondeur d'excavation

Nous remarquons que la valeur de la contrainte maximale change après chaque excavation, elle atteint sa valeur la plus élevée lors de la dernière excavation.

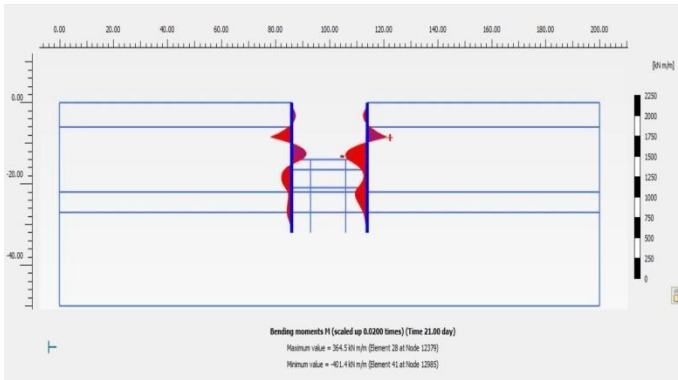
III.7.3 Les moments



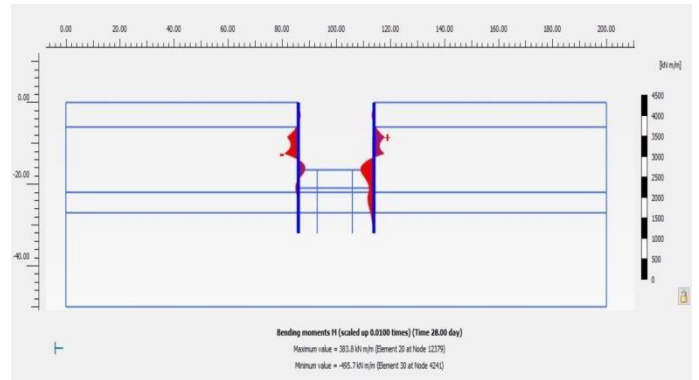
A) Diagramme des moments en fonction de profondeur d'excavation **4.5m**



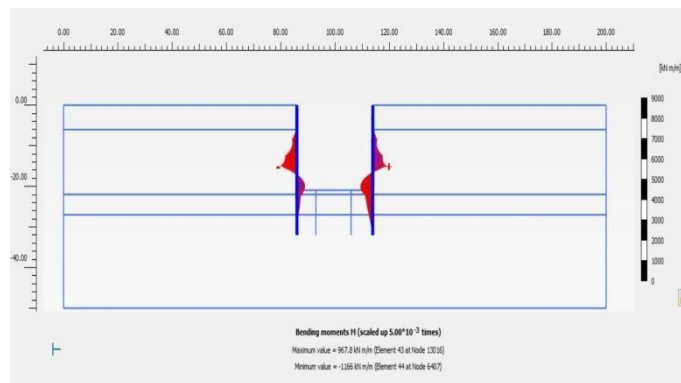
B) Diagramme des moments en fonction de profondeur d'excavation **9.98m**



C) Diagramme des moments en fonction de profondeur d'excavation **13.98m**



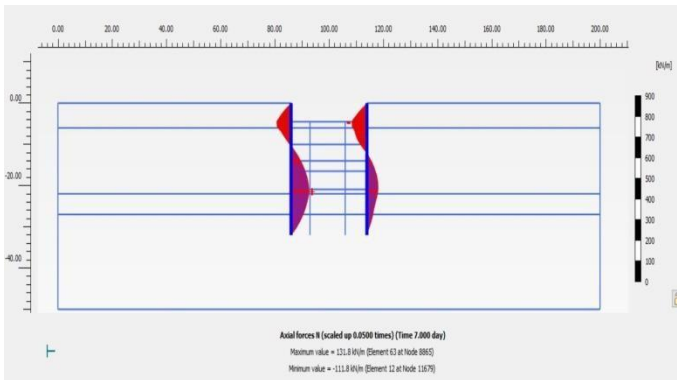
D) Diagramme des moments en fonction de profondeur d'excavation **16.48m**



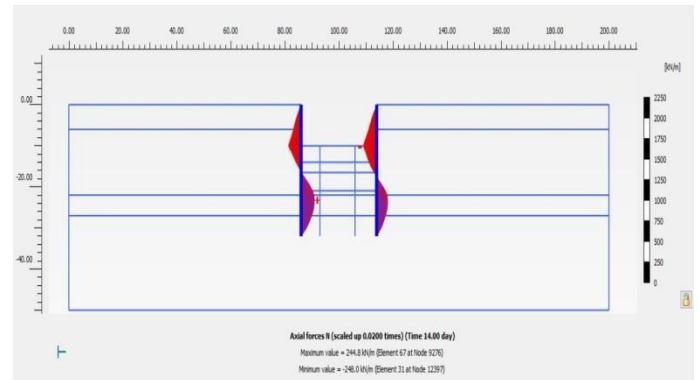
E) Diagramme des moments en fonction de profondeur d'excavation **20.94m**

Figure III.27 - Diagramme des moments affaissés sur la paroi moulée en fonction de profondeur d'excavation

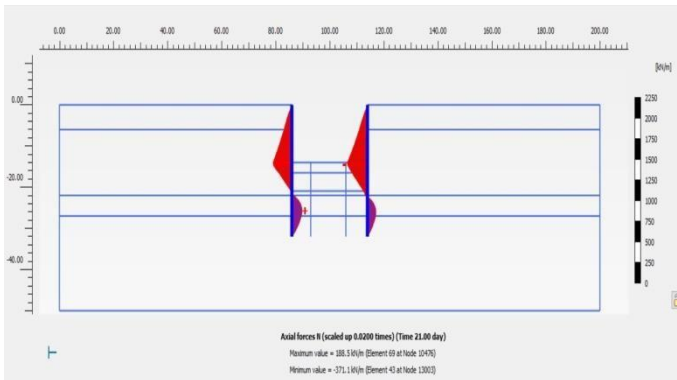
III.7.4 Les efforts normaux



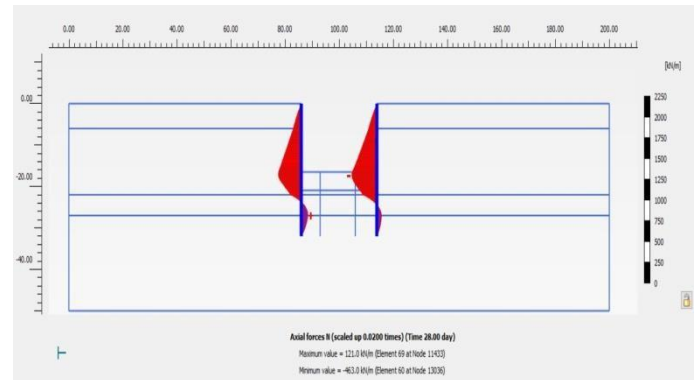
A) Diagramme d'efforts normaux en fonction de profondeur d'excavation **4.5m**



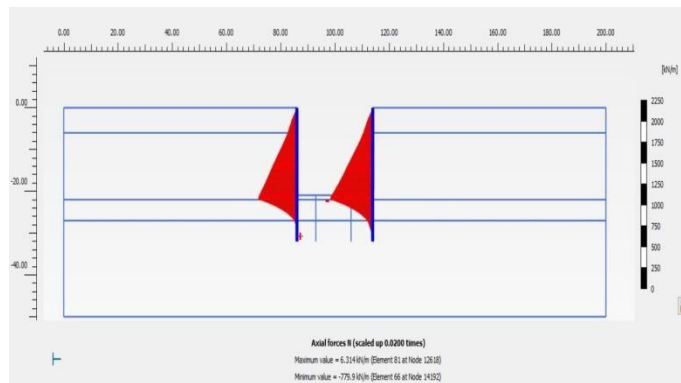
B) Diagramme d'efforts normaux en fonction de profondeur d'excavation **9.98m**



C) Diagramme d'efforts normaux en fonction de profondeur d'excavation **13.98m**



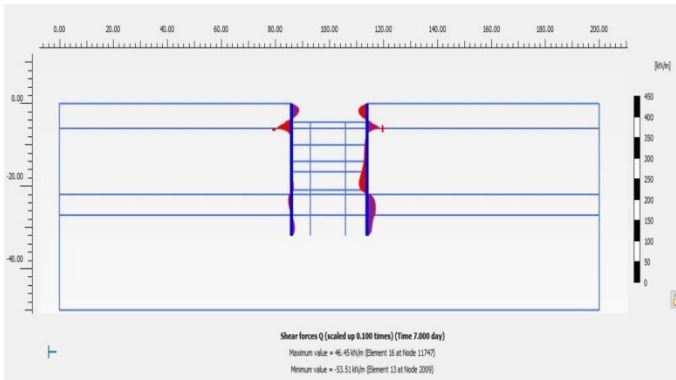
D) Diagramme d'efforts normaux en fonction de profondeur d'excavation **16.48m**



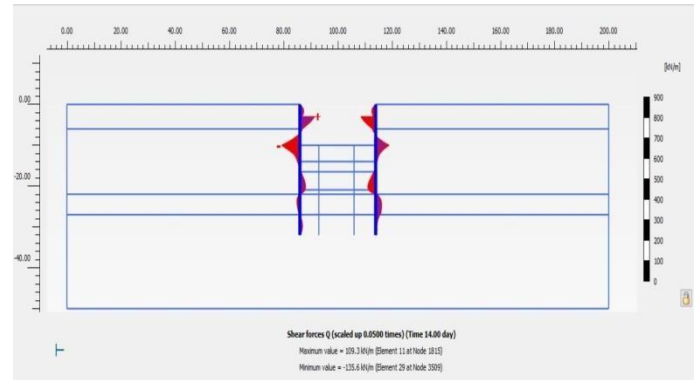
E) Diagramme d'efforts normaux en fonction de profondeur d'excavation **20.94m**

Figure III.28 - Diagramme des efforts normaux affaissent sur la paroi moulée en fonction de Profondeur d'excavation

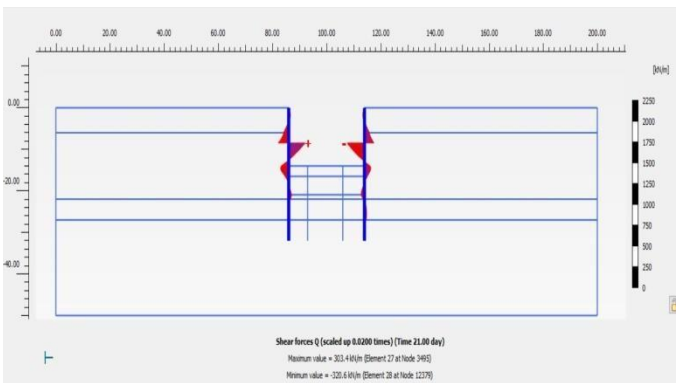
III.7.5 Les effets des cisaillements



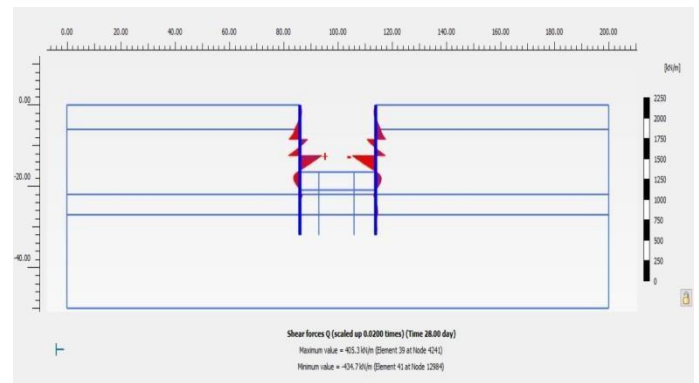
A) Diagramme des effets des cisaillements en fonction de profondeur d'excavation **4.5m**



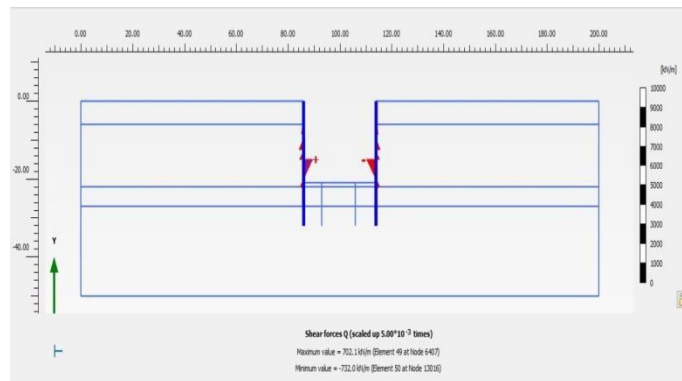
B) Diagramme des effets des cisaillements en fonction de profondeur d'excavation **9.98m**



C) Diagramme des effets des cisaillements en fonction de profondeur d'excavation **13.98m**



D) Diagramme des effets des cisaillements en fonction de profondeur d'excavation **16.48m**



E) Diagramme des effets des cisaillements en fonction de profondeur d'excavation **20.94m**

**Figure III.29 - Diagramme des effets des cisaillements affaissent sur la paroi moulée en fonction de profondeur d'excavation**

A partir de ces diagrammes (Figure III.27 , Figure III.28, Figure III.29) fournissent des informations précieuses sur le comportement de la paroi moulée sous l'effet des excavations. Ils sont essentiels pour la conception d'une paroi moulée sûre et économique.

### Conclusion Générale

Après avoir présenté en détail les caractéristiques de notre projet, telles que sa géométrie, son emplacement, ses accès, ses niveaux et ses sections, nous nous sommes penchés sur plusieurs aspects essentiels pour son développement. Cela inclut les données géotechniques, les matériaux de construction, les étapes de réalisation, le choix du type d'écran de soutènement et des types de boutonnage, ainsi que les méthodes de contrôle, en particulier en utilisant la valeur maximale pour surveiller les déplacements horizontaux de la paroi moulée.

Nous avons consacré une partie significative de notre étude au bétonnage, suivi de la modélisation numérique de notre profil à l'aide du logiciel PLAXIS 2D V20, en mettant l'accent sur le type de soutènement par paroi moulée avec l'utilisation de systèmes d'appuis horizontaux (butons). Cette analyse nous a permis d'évaluer l'admissibilité des déplacements horizontaux et des déformations du système paroi moulée-sol, tout en fournissant des données cruciales pour le dimensionnement de la paroi moulée et des butons. En se basant sur ces résultats, nous avons pu déterminer les positions d'intervention nécessaires, tout en comparant les déformations maximales de la section proposée. Nous concluons ainsi que la stabilité de la paroi est bien assurée au cours de la réalisation du projet.

Les résultats obtenus ont été utilisés de manière itérative pour ajuster notre approche, garantissant que le soutènement par mur moulé avec appuis horizontaux répond aux normes de sécurité les plus strictes. En fin de compte, cette méthodologie, combinant une analyse géotechnique approfondie et une modélisation numérique avancée, a assuré la fiabilité et la robustesse de la structure tout au long du projet.

Il est important de noter que l'interprétation de ces diagrammes dépend de plusieurs facteurs, tels que les caractéristiques géotechniques du sol, la géométrie de la paroi et les méthodes d'excavation. Il est donc recommandé de faire appel à un ingénieur géotechnique expérimenté pour analyser ces diagrammes et en tirer les conclusions adéquates.

### Références bibliographies

[1] NEHAOUA ADEL, "Les Ouvrages de soutènement (Murs de soutènement et blindages)",

SETS, Sétif, 21 février 2010, pp.1

[2] "Les ouvrages de soutènement," SETRA, France, Décembre 1988, pp. 4.

[3] "Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des rideaux", LCPC, 2003.

[4] Site internet <https://www.keller-algerie.com/expertise/techniques/parois-moulees-et-barrettes>

[5] E. DELAHAYE, G. H AI UN, A.L. MILLAN, les ouvrages de soutènement guide de Conception générale, Imprimerie de Montligeon, publications du CTOA : Jacqueline THIRION, France, 1998.

[6] SAADI RIADH, modélisation numérique d'une paroi de soutènement en zone urbaines, mémoire de magister, université e hadj Lakhdar, Batna, 2012.

[7] MEMOIRE DE MASTER ZERARKA DJILLALI NAHI MESSAOUD ABD ENNACEUR Étude de la stabilité d'une paroi moulée Cas : projet de la station métro d'Alger

[8] TEDJINI SARRA, "Conception et vérification d'un mur de soutènement type cantilever par la méthode de chargement progressives (push over)", Master académique, Département de génie civil, Djelfa, 2017, Pp.18\_22

[9] COSIDAER COS M28

[10] PLAXIS 2D - Tutorial Manual - CONNECT Edition V20.02