

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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



## **Mémoire de Master**

**Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma**

**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de : Génie Civil & Hydraulique**

**Spécialité : Génie Civil**

**Option : GEOTECHNIQUE**

**Présenté par : NEMISSI OMAR FEKHR EL ISLAM**

---

**Thème : ETUDE DES DIFFERENTS TYPES DE  
BLINDAGE DE FOUILLE**

---

**Sous la direction de : BOUTAHIR NEE BENCHEIKH MESSAOUDA**

---

**Septembre 2020**

---

## Remerciement

*En premier lieu, je veux remercier le DIEU, pour m'avoir donné : le courage, la force et la patience pour accomplir ce travail.*

*Après Dieu, j'adresse à mes chers parents tous les mots de remerciements qui ne suffiront pas à exprimer ma gratitude pour leurs efforts et leur soutien envers moi tout au long de mon cheminement scolaire jusqu' à ce moment. À vous tout l'amour et l'appréciation.*

*Nous tenons à notifier un remerciement spécial à mon cher encadreur Docteur " **Bencheikh** " à qui j'exprime ma profonde gratitude pour tous les conseils et encouragement qu'elle me prodiguées pendant toute la durée de ce travail.*

*Je remercie très vivement tous mes professeurs qui ont contribué à notre formation de master, et tous les professeurs au département de Génie civile de l'université de Guelma.*

*Je remercie aussi très sincèrement Monsieur le président et les membres de jury.*

*Enfin je dis merci vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.*

*Omar Fekhr El Islam*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail à :*

*Mon cher père (SALAH), qui était et restera*

*l'épaule qui me soutient et ne se penche pas.*

*À ma fontaine d'amour ma mère (HABIBA), qui m'a*

*toujours accompagnée de ses prières sincères*

*À mon frère et mes sœurs, à mes amis, à mes*

*collègues, à toutes mes connaissances et à tous ceux qui*

*m'ont accompagné dans ma carrière universitaire.*

*Omar Fekhr El Islam*

# Résumé

Une fouille blindée est une excavation comportant sur ses deux parois deux soutènements opposés butés l'un contre l'autre par des butons ou des étais pratiquement indéformables. Le mur de soutènement est souvent en rideaux de palplanches ou en paroi (moulée, préfabriqué, en pieux sécants, etc).

La technique de blindage des fouilles a trouvé très large champ d'applications dans les projets de génie civil en site urbain, où la nécessité d'exploitation maximale de l'espace constructible a poussé les ingénieurs à concevoir des structures comportant une partie enterrée dans le sol, telles que les parkings souterrains, les tours comportant des sous-sols, les centrales nucléaires, les réseaux enterrés, et les tunnels.

L'étude porte tout d'abord sur les différentes méthodes de soutènement employées habituellement sur les chantiers de construction. Ensuite, une fois ce travail de recherche effectué, la suite de l'étude consiste à le mettre en application des exemples de calculs d'une part, d'autre part on a étudié la stabilité au moyen du code de calcul GEO 5.

**Mots clés :** *Blindée, Butons, Étais, Fouille, Geo 5, Stabilité, Soutènement,*

summary

An armored excavation is an excavation comprising on its two walls two opposing supports abut one against the other by struts or practically undeformable props. The retaining wall is often in sheet pile curtains or as a wall (diaphragm, prefabricated, secant piles, etc.).

The excavation shielding technique has found a very wide field of applications in civil engineering projects in urban sites, where the need for maximum use of the building space has led engineers to design structures comprising a part buried in the ground, such as underground car parks, towers with basements, nuclear power plants, underground networks, and tunnels.

The study first focuses on the different support methods usually used on construction sites. Then, once this research work is done, the rest of the study consists of applying it to the example calculations on the one hand, and on the other hand we studied the stability using the GEO 5 calculation code.

Key words: Armored, struts, props, Excavation, Geo 5, stability, support,

### ملخص

الحفريات المصفحة عبارة عن حفريات تشتمل على دعامتين متعارضتين متجاورتين مع الأخرى بواسطة دعامات أو دعامات غير قابلة للتشكيل عملياً غالباً ما يكون الجدار الاستنادي في ستائر من الألواح الورقية أو كجدار (الحجاب الحاجز ، مسبقة الصنع ، أكوام قاطعة ، إلخ...)

لقد وجدت تقنية التدريع في أعمال الحفر مجالاً واسعاً جداً من التطبيقات في مشاريع الهندسة المدنية في المواقع الحضرية ، حيث أدت الحاجة إلى الاستخدام الأقصى لمساحة المبنى إلى قيام المهندسين بتصميم هياكل تتألف من جزء مدفون في الأرضية ، مثل مواقف السيارات تحت الأرض ، والأبراج ذات الأقبية ، ومحطات الطاقة النووية ، والشبكات الأرضية ، والأنفاق.

تركز الدراسة أولاً على طرق الدعم المختلفة المستخدمة عادةً في مواقع البناء. بعد ذلك ، بمجرد الانتهاء من هذا العمل البحثي ، تتكون بقية الدراسة من تطبيقه على أمثلة الحسابات من ناحية ، ومن ناحية أخرى قمنا بدراسة الثبات باستخدام كود حساب GEO5

الكلمات الأساسية: Geo 5 ، استقرار ، دعم ، مدرعة ، دعامات ، حفر

# TABLE DES MATIERES

---

## TABLE DES MATIERES

|  |          |
|--|----------|
| Remerciement   |          |
| Dédicaces  |          |
| Résumé.....  | i        |
| Abstract.....  | ii       |
| ملخص .....   | iii      |
| <b>TABLE DES MATIERES</b>  |          |
| <b>TABLE DES FIGURES</b>   |          |
| <b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....                                     | <b>1</b> |
| <b>CHAPITRE I : Notions générales sur les fouilles</b>                 |          |
| I.1. Introduction. ....  | 3        |
| I.2. Définition des fouilles. ....                                     | 3        |
| I.3. Types de fouilles.....  | 3        |
| I.3.1. Fouilles en rigole.....   | 3        |
| I.3.2. Fouilles en tranchées. ....                                     | 4        |
| I.3.3. Fouilles en excavation.....                                     | 5        |
| I.3.4. Fouilles en puits. ....   | 5        |
| I.3.5. Fouilles en pieux. ....   | 5        |
| I.3.6. Fouilles en pleine masse.....                                   | 5        |
| I.4. Condition de sécurité.....  | 5        |
| I.5. Consignes générales d'utilisation des blindages.....              | 6        |
| I.5.1. Préparation de chantier.....                                    | 6        |
| I.5.2. Détermination du nombre de blindages. ....                      | 7        |
| I.5.3. Au démarrage du chantier. ....                                  | 7        |
| I.5.4. Réalisation des travaux. ....                                   | 7        |
| I.5.5. Manutention – Stockage des blindages sur chantier. ....         | 8        |
| I.5.6. Travaux au voisinage de réseaux. ....                           | 8        |
| <b>CHAPITRE II: Les différents types de blindages</b>                  |          |
| II.1. Introduction.....  | 12       |
| II.2. Fonction .....   | 12       |
| II.3. Les différents types de blindages.....                           | 13       |
| II.3.1. Blindages ponctuels. ....                                      | 13       |
| II.3.2. Blindage grandes surfaces. ....                                | 16       |
| II.4. Excavation par blindage en cours de terrassement. ....           | 22       |
| II.4.1. Blindage par Panneaux ou caissons. ....                        | 22       |
| II.4.2.Paroi cloutée. ....   | 23       |
| II.4.3.Paroi berlinoise. ....  | 24       |
| II.4.4.paroï Parisienne (ou lutécienne). ....                          | 25       |
| Tableau I.1.Tableau comparatif des principales parois composites. .... | 26       |

---

---

## TABLE DES MATIERES

---

|  |    |
|--|----|
| II.5. Excavation par blindage avant terrassement.....                    | 27 |
| II.5.1. Rideau de palplanches.....                                       | 27 |
| II.5.2. Rideau de pieux.....   | 27 |
| II.5.3. Paroi moulée.....  | 29 |
| II.5.4. Paroi soil mix.....  | 30 |
| <b>CHAPITRE III : Dimensionnement des fouilles blindées</b>              |    |
| III.1. Introduction.....   | 33 |
| III.2. Réalisation.....  | 33 |
| III.2.1 Méthode empirique de calcul des fouilles blindées.....           | 33 |
| III.3. L'école allemande.....  | 34 |
| III.3.1 L'école américaine.....  | 36 |
| <b>CHAPITRE IV:Etude paramétrique</b>                                    |    |
| <b>Application 1</b> .....   | 41 |
| <b>Application2.</b> ....  | 48 |
| <b>chapitre V :Modélisation des fouilles blindée avec le code PLAXIS</b> |    |
| V. 1. Introduction.....  | 52 |
| V.2. Présentation du logiciel.....                                       | 52 |
| V.2.1. Programme d'entrée des données (input).....                       | 52 |
| V.2.2. Programme des résultats.....                                      | 53 |
| V.2.3. Modélisation de la fouille blindée.....                           | 53 |
| V.3. Caractéristiques des matériaux utilisés.....                        | 55 |
| V.3.1. Propriétés de la couche d'argile molle.....                       | 55 |
| V.3.2. Propriétés de la paroi.....                                       | 56 |
| V.3.3. Propriétés des butons.....  | 56 |
| V.4. Génération des maillages.....                                       | 56 |
| V.5. Conditions initiales.....   | 57 |
| V.6. Phase de calcul.....  | 58 |
| V.7. Les résultats obtenus.....  | 58 |
| V.8. Modèle 2.....   | 61 |
| <b>Conclusion générale</b> .....   | 65 |
| <b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....   | 67 |

---



---

## TABLE DES FIGURES

---

### TABLE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure I 1 : Fouille en rigole.....   | 4  |
| Figure I 2: Fouille en tranchées.....   | 4  |
| Figure I 3: Fouille en puit.....  | 5  |
| Figure II 1: Planches verticales.....   | 13 |
| Figure II 2: Caisson modulaire.....   | 13 |
| Figure II 3: Les caissons métalliques.....  | 14 |
| Figure II 4. Les caissons en bois.....  | 15 |
| Figure II 5: Cadres verticaux (avec ceinture hydraulique).....  | 15 |
| Figure II 6: Panneaux préfabriqués légers.....  | 16 |
| Figure II 7. Ceinture de blindage( ou guide palfeuilles).....   | 17 |
| Figure II 8: Caisson à étaieement latéral.....  | 17 |
| Figure II 9: Caissons à étaieement central (privilégier le caisson à étaieement latéral). ....  | 18 |
| Figure II 10: Blindage coulissant.....  | 18 |
| Figure II 11: Machine à blinder.....  | 19 |
| Figure II 12 Palplanches métalliques.....   | 20 |
| Figure II 13: Palplanches métalliques.....  | 20 |
| Figure II 14. Profilés métalliques.....   | 21 |
| Figure II 15: Mode d'exécution des Palplanches.....   | 22 |
| Figure II 16: Parois cloutée.....   | 24 |
| Figure II 17: Paroi berlinoise.....   | 24 |
| Figure II 18: Mode d'exécution des parois Parisiennes.....  | 25 |
| Figure II 19: Mode d'exécution.....   | 26 |
| Figure II 20: Rideau de palplanche.....   | 27 |
| Figure II 21: Mode d'exécution des pieux à tarière continue tubée.....  | 28 |
| Figure II 22: Mode d'exécution des pieux à tarière creuse PCS.....  | 28 |
| Figure II 23: Mode d'exécution Le pieu foré de grand diamètre avec tubage.....  | 29 |
| Figure II 24: Paroi moulée.....   | 30 |
| Figure II 25: Paroi du type mixed in place.....   | 30 |
| Figure II 26: Paroi du type cutter soil mix.....  | 31 |
| Figure II 27: Paroi en soilmix (paroi CSM).....   | 32 |
| Figure III 1 Schémas de redistribution pour des parois en béton coulé en place avec 1 appui.....                                      | 34 |
| Figure III 2: Schémas de redistribution pour des parois en béton coulé en place avec 2 appuis.....                                    | 35 |
| Figure III 3: Schémas de redistribution pour des parois en béton coulé en place avec 3 appuis ou plus....                             | 36 |
| Figure III 4: Transformation d'une distribution triangulaire de poussée à une distribution rectangulaire d'une paroi berlinoise.....  | 38 |
| Figure III 5: Transformation d'une distribution triangulaire de poussée à une distribution rectangulaire d'une paroi moulée.....      | 40 |
| Figure III 6: Blindage du tunnel ferroviaire à Gravesend (Angleterre).....  | 40 |
| Figure III 7: Le coefficient Nb (Janbu et al 1956).....   | 41 |
| Figure III 8: Schéma d'instabilité du fond de fouille.....  | 41 |
| Figure III 9: Diagrammes des pressions à considérer pour le dimensionnement des blindages des fouilles, d'après Terzaghi et Peck..... | 44 |
| Figure IV 1: Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (Mode de création géométrique).....                         | 53 |
| Figure IV 2 : Géométrie du modèle.....  | 54 |

---

## TABLE DES FIGURES

---

|  |    |
|--|----|
| Figure IV 3 : Définition de la géométrie avec les conditions aux limites. .... | 55 |
| Figure IV 4: Génération de maillage du modèle géométrique. ....                | 57 |
| Figure IV 5: Pression interstitielle.....                                      | 57 |
| Figure IV 6: Fenêtre principale du programme de calcul.....                    | 58 |
| Figure IV 7: Déplacement total. ....   | 59 |
| Figure IV 8: Les directions principales des contraintes. ....                  | 59 |
| Figure IV 9: Maillage déformé à la fin d'excavation. ....                      | 60 |
| Figure IV 10: Moment fléchissant dans la paroi. ....                           | 60 |
| Figure IV 11: Définition de la géométrie avec les conditions aux limites. .... | 61 |
| Figure IV 12: Génération de maillage du modèle géométrique. ....               | 61 |
| Figure IV 13: Maillage déformé à la fin d'excavation. ....                     | 62 |
| Figure IV 14: Maillage déformé à la fin d'excavation. ....                     | 62 |
| Figure IV 15: Maillage déformé à la fin d'excavation. ....                     | 63 |
| Figure IV 16 : Les directions principales des contraintes. ....                | 63 |
| Figure IV 17: Moment fléchissant dans la paroi. ....                           | 64 |

---

### *Introduction générale*

La technique des fouilles blindées consiste à creuser manuellement une tranchée dans le sol. De petits panneaux en béton préfabriqués étançonnet en continu les parois et des étais maintiennent ces panneaux coincés si bien que les parois de la tranchée ne peuvent pas s'effondrer. Le sol qui est excavé dans la tranchée étroite est amené à la superficie via un seau et une poulie.

La diversité des environnements à protéger et des risques nécessite l'emploi de différentes techniques de blindage : l'industrie minière possède notamment une longue expérience dans la pose d'étais et les grands projets de construction de tunnel ont permis de faire avancer l'état des techniques de blindage

Le choix du mode opératoire doit être fait en fonction des conditions géotechniques et hydrologiques et des contraintes d'environnement. Les entreprises ont maintenant à leur disposition toute une gamme de procédés permettant d'exécuter les blindages dans de bonnes conditions, quelles que soient la nature et l'importance des travaux à exécuter.

L'avantage non négligeable des parois de soutènement est qu'elles permettent de garantir la sécurité des personnes et des biens situés dans la fouille. Il n'est en effet pas inhabituel de constater la rupture d'un talus d'une fouille menaçant la sécurité en fond de fouille (risque d'ensevelissement).

### **Organisation du mémoire :**

Pour bien présenter les informations sur les fouilles blindées et éclairer les axes de notre étude, le mémoire a été articulé suivant les points suivants:

- Une introduction générale concernant le travail effectué est présentée.
- *Chapitre I : Notions générales sur les fouilles* : dans ce chapitre On a essayé de donner une définition et une classification des différentes fouilles.
- *Chapitre II: Les différents types de blindages*: on a présenté dans ce chapitre les différentes techniques utilisées pour blindées les fouilles,
- *Chapitre III: Dimensionnement des fouilles blindées* : dans ce chapitre on a présenté les différentes méthodes de calculs qui peuvent être utilisées dans l'analyse de la stabilité des fouilles ainsi leur dimensionnement.

## Introduction générale

---

- *Chapitre IV : Etude des exemples d'application* : dans ce chapitre une application directe des théories classique de calcul des fouilles blindées a été présentée .
- *Chapitre V* : Dans le cinquième chapitre on a procédé à une simulation numérique a travers le logiciel de calcul GEO5.

*Enfin* les conclusions principales tirées de cette étude ont été présentées à la fin de ce mémoire.

# **CHAPITRE I**

## Notions générales sur les fouilles

---

## Notions générales sur les fouilles

### I.1. Introduction.

Toute excavation non blindée représente un danger en puissance pour les personnes qui travaillent sur ces chantiers. Être enseveli sous les décombres d'une fouille est aussi dramatique qu'un accident d'avalanche. Par conséquent, la législation prévoit et prescrit les systèmes de blindages pour les travaux en fouille (sans talutage).

Suivant les conditions in-situ, il est impératif de sécuriser la fouille avec du blindage, En plus de la pression du sol, les systèmes de blindage doivent reprendre les charges induites par la circulation routière, ferroviaire, ainsi que celles des fondations des édifices environnants. Pour cette raison, ils doivent être dimensionnés et installés le système de blindage correctement.

### I.2. Définition des fouilles.

Dans le domaine du bâtiment, une fouille est un creusement réalisé dans le sol, en général après décapage de la terre végétale. Elle fait partie des travaux de terrassement et destinée à être remplie par le béton des semelles de fondation. Les fouilles sont destinées aux applications suivantes :

- Réalisation des fondations ;
- Dégagement des volumes des sous-sols ;
- Pose des canalisations.

### I.3. Types de fouilles.

On compte plusieurs types de fouilles dont :

#### I.3.1. Fouilles en rigole.

Elles sont destinées à recevoir les semelles filantes de fondations, leur profondeur n'excède pas un mètre et leur largeur deux mètres. Les fouilles en rigole sont creusées à des endroits spécifiques d'une construction et vont recevoir les semelles de fondation, contrairement aux fouilles en pleine masse. Après avoir creusé la fouille (un minimum de 25 centimètres de profondeur est nécessaire), on coule du béton au fond de celle-ci. Ce béton, dit « de propreté », fait l'objet d'un dosage précis ( $150 \text{ kg/m}^3$ ) et doit être épais de cinq centimètres. Ensuite, on pose la semelle proprement dite, qui reçoit un mur ou une colonne. Ce procédé est de première importance lors d'une construction puisqu'il permet de répartir les charges sur le sol de façon équilibrée.



**Figure I.1.** Fouille en rigole

### **I.3.2. Fouilles en tranchées.**

Leur profondeur est supérieure à un mètre et leur largeur n'excède pas deux mètres. Les fouilles en tranchées sont des **tranchées creusées dans le sol**. Lors de la construction de votre maison d'habitation, elles vont servir à faire passer des canalisations et les raccordements aux différents réseaux.

Techniquement, la fouille en tranchée répond à des caractéristiques précises :

- Sa **profondeur est supérieure à 1 m** et sa largeur n'excède pas **2 m** mais dans tous les cas, elle est plus haute que large. C'est par la fouille en tranchée que les **différents réseaux** vont transiter. Pour cela le fond de fouille doit être porteur et plan, afin que chaque tuyau ou gaine repose en totalité sur le sol.



**Figure I.2.** Fouille en tranchées

### I.3.3. Fouilles en excavation.

Elles ont une largeur de plus de deux mètres mais leur profondeur ne dépasse pas la moitié de la largeur.

### I.3.4. Fouilles en puits.

C'est dans le cas où la plus grande dimension horizontale d'un puits est inférieure à 1,20 m, cette dimension est mesurée entre les faces intérieures opposées des **étais** et **blindages**. Pour des raisons de sécurité, il est interdit qu'on descende au fond de la fouille au cours de son exécution.



**Figure I .3.** Fouille en puit

### I.3.5. Fouilles en pieux.

Est utilisée lors d'un sol bon très profond afin de récupérer des charges ponctuelles généralement. On peut aussi coupler les pieux avec des longrines afin de répartir les charges du bâtiment sur une surface plus grande, et aussi afin de limiter les effets de tassements.

### I.3.6. Fouilles en pleine masse.

Exécutée sur la totalité de la surface d'emprise d'une construction. Dans ce cas, le terrassement est descendu jusqu'au niveau de la sous-face du dallage du dernier sous-sol. On n'ouvre pas autant de fouille en tranchée que de réseau mais plusieurs réseaux passent par la même fouille si du moins la **configuration de terrain** et les points d'arrivée des réseaux le permettent (fouilles pour Le tuyau d'eau, gaz.....).

## I.4. Condition de sécurité.

Les fouilles en tranchée de plus de 1,30 mètre de profondeur et d'une largeur égale ou inférieure aux deux tiers de la profondeur sont, lorsque leurs parois sont verticales ou sensiblement verticales, blindées, étrépillonnées ou étayées.



Les parois des autres fouilles en tranchée ainsi que celles des fouilles en excavation ou en butte, sont aménagées, eu égard à la nature et à l'état des terres, de façon à prévenir les éboulements. À défaut, des blindages, des étrépillons ou des étais appropriés à la nature et à l'état des terres sont mis en place. Ces mesures de protection ne sont pas réduites ou supprimées lorsque les terrains sont gelés. Ces mesures de protection sont prises avant toute descente d'un travailleur ou d'un employeur dans la fouille pour un travail autre que celui de la mise en place des dispositifs de sécurité. Lorsque nul n'a à descendre dans la fouille, les zones situées à proximité du bord et qui présenteraient un danger pour les travailleurs sont nettement délimitées et visiblement signalées.

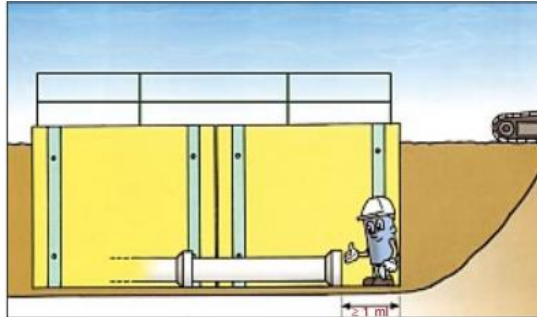
## **I.5. Consignes générales d'utilisation des blindages.**

### **I.5.1. Préparation de chantier.**

- Prévoir le type et le nombre de blindages en fonction du type de travaux à réaliser et de l'environnement du chantier :
  - Hauteur maximale à blinder (panneaux adaptés à la profondeur de terrassement avec 15 cm minimum de dépassement au-dessus du sol),
  - Largeur utile de la fouille à réaliser,
  - Nature du terrain, si possible d'après une étude de sols (terrains cohérents, stables à l'ouverture, terrains bouillants),
  - Longueur des tuyaux à poser ou du phasage des travaux,
  - Encombrement du sous-sol (réseaux, ouvrages, ...),
  - Possibilité de manutention du matériel,
- Prévoir les moyens d'accès, de protection et de franchissement (échelles, barrières, passerelles, ...).
- Définir le phasage d'exécution du chantier, en particulier prévoir le mode opératoire et le matériel complémentaire (bastaings, palfeuilles, étrépillons, butons, ...) pour le passage des points singuliers (présence de réseaux, siphons, pente importante...).
- Vérifier l'état du matériel. Seul du matériel en bon état et vérifié doit être utilisé.
- Vérifier l'adéquation PELLE / BLINDAGE. Les moyens de levage et de manutention doivent correspondre aux travaux à réaliser.
- Vérifier l'équipement de la pelle pour faire du levage (clapets de sécurité).
- Vérifier l'adéquation du blindage et des postes de travail (surcharges, position des salariés).
- Vérifier la compatibilité de la position des étrépillons avec le diamètre extérieur du tuyau à poser (espace libre sous étrépillons).

### I.5.2. Détermination du nombre de blindages.

Le nombre d'éléments de blindage doit être déterminé de telle façon que le blindage dépasse d'au moins 1 mètre l'extrémité de l'ouvrage à réaliser.



### I.5.3. Au démarrage du chantier.

- Vérifier que les conditions rencontrées sur le terrain sont bien les mêmes que celles retenues lors de la préparation du chantier.
- Vérifier, le cas échéant, l'état des ouvrages avoisinants (faire réaliser un constat si nécessaire).
- S'assurer que les blindages, les moyens d'accès, de protection et de franchissement sont présents.
- S'assurer que tous les salariés ont reçu une formation à la sécurité adaptée au chantier et à la mise en œuvre du blindage utilisé.
- Veiller à ce que le personnel porte les EPI (Équipements de Protection Individuelle) nécessaires : casque, gants, chaussures ou bottes de sécurité.
- Prévoir un crochet avec émerillon (type BKL par exemple) à l'extrémité d'une chaîne adaptée aux efforts pour la manutention du matériel.
- Approvisionner des élingues adaptées aux manutentions à effectuer.
- Approvisionner du petit matériel adapté aux travaux à réaliser de type : palfeuilles, étrésillons, liernes, cordes pour guider les panneaux... Ce matériel sera très utile dans le cas où l'utilisation du matériel prévu n'est pas possible, compte-tenu des obstacles rencontrés dans le sous-sol.
- Utiliser un godet adapté à la largeur du blindage et à la nature du terrain (plus le terrain est mauvais, plus le godet doit être étroit).
- Effectuer le montage des éléments de blindage selon les indications du fabricant.

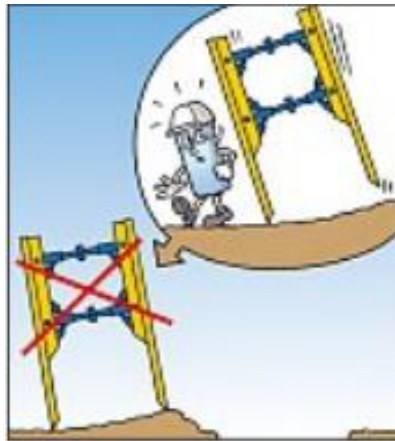
### I.5.4. Réalisation des travaux.

- Prendre en compte les conditions météorologiques (modification de la cohésion du terrain).

- Utiliser les blindages uniquement dans les conditions pour lesquelles ils ont été prévus.
- S'assurer que les étrépillons sont bien horizontaux lorsque le blindage est en position
- Vérifier régulièrement toutes les liaisons (axes, goupilles, boulonneries...).

#### **I.5.5. Manutention – Stockage des blindages sur chantier.**

- Manutentionner et stocker le matériel de blindage suivant les indications du fabricant.
- Stocker les panneaux de blindage de type « caisson » sur un terrain stable et horizontal pour éviter le risque de renversement.
- Ne manutentionner en aucun cas les panneaux de blindage par les étrépillons, utiliser les points d'ancrage prévus par les fabricants.
- Ne pas stationner à proximité du blindage lors de son stockage ou de son déplacement.

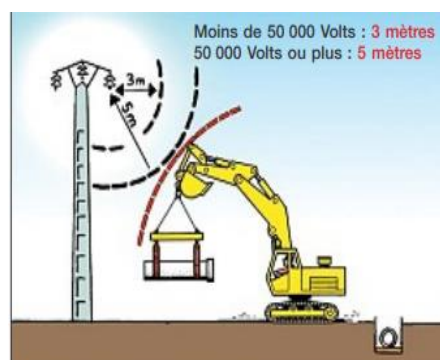


#### **I.5.6. Travaux au voisinage de réseaux.**

En cas de travaux au voisinage de réseaux électriques aériens ou souterrains, une demande de mise hors tension doit être effectuée. Si celle-ci n'est pas accordée, mettre en place les mesures de sécurité définies en accord avec l'exploitant.

##### **I.5.6.1. Travaux au voisinage de lignes électriques aériennes.**

La pelle en extension maximale doit respecter les distances de sécurité.



- Demander à l'exploitant du réseau :
  - La tension et la hauteur de la ligne ;
  - La mise hors tension ;
  - défaut la mise en place de protections (gaines, portiques...)
- Informer tous les salariés et en particulier les conducteurs d'engins des risques de travailler à proximité des lignes aériennes.
- Faire respecter les consignes de sécurité.
- Prévoir si nécessaire les mesures de protection complémentaires contre les contacts directs (limitation de l'amplitude de mouvement des engins, surveillance, ...).

### **I.5.6.2. Travaux au voisinage de réseaux souterrains.**



- S'assurer de la présence sur le chantier des renseignements relatifs aux réseaux (nature, positions, ...).
- En cas de travaux au voisinage de réseaux électriques, demander leur mise hors tension.
- S'assurer que les réseaux sont repérés et balisés avant de commencer le terrassement.
- Surveiller et guider les opérations de terrassement lorsqu'il existe un risque d'approche de canalisations et d'installations électriques souterraines.
- Prévoir et mettre en œuvre si nécessaire une protection complémentaire en cas de croisement de réseaux existants.

### **Les lignes électriques souterraines.**

Respecter les distances de sécurité

- De 0 à 1,50m d'une ligne sous tension Interdiction de travailler avec un engin mécanique Balisage visible du réseau (peinture , fanion ...) Surveillance permanente assurée par un opérateur désigné par le chef de chantier
- A plus de 1,50m
- Pas de prescription particulière, même avec un engin mécanique

### **Les lignes GAZ = Risque d'explosion.**

Respecter les distances de sécurité Accès aux ouvrages de distribution:

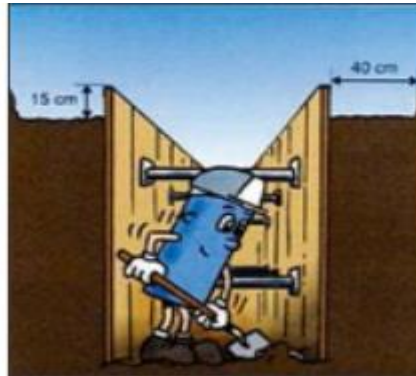
• vous devez maintenir libre l'accès aux ouvrages, en particuliers les regards, bouches à clef postes de détente, coffrets enterrés ou en façade Odeur et/ou fuite de gaz, vous devez **impérativement**.

- Interrompre les travaux et le fonctionnement de tous les engins ou matériel de chantier ;
- Eviter toute source d'inflammation ;
- Empêcher de fumer ;
- Aïre éloigner le personnel et les tiers
- Informer immédiatement le distributeur et si besoin les services d'urgences (pompiers, police, ...).

Lorsque des canalisations ou couches de canalisations sont superposées, un dispositif avertisseur doit être placé au dessus de chacune d'elles

#### **I.5.6.3. Aménagement des abords.**

Afin d'empêcher les chutes de déblais, de matériaux, d'outils ou d'objets de toute nature à l'intérieur des fouilles en tranchée de plus de 1,30 mètre de profondeur, celles-ci sont entourées de plinthes d'une hauteur de 15 cm au moins ou comportent un blindage dont les éléments constituant dépassent le niveau du sol d'une hauteur minimale de 15 cm.

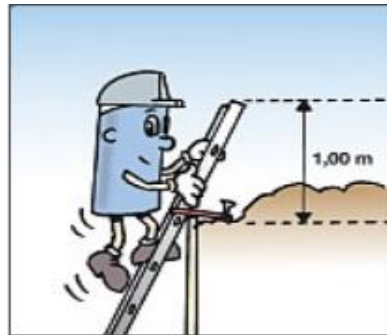


Des déblais ou du matériel ne peuvent être déposés le long d'une tranchée de plus de 1,30 mètre de profondeur que s'il est possible de ménager une berme d'une largeur de 40 cm au moins. Cette berme reste constamment dégagée de tout dépôt.

#### **I.5.6.4. Accès au fond de fouille.**

- Prévoir et aménager les accès au fond de fouilles (échelles...) et les abords de la tranchée.
- Protéger les abords des fouilles contre les chutes des salariés et des tiers (palissades, barrières, garde-corps, balisage, signalisation...).

- Prévoir une bande de circulation protégée en tête de fouille.
- Limiter la durée de l'ouverture des fouilles.



#### I.5.6.5. Passerelles.

- Lorsque des travailleurs sont appelés à franchir une tranchée de plus de 40 cm de largeur, des moyens de passage sont mis en place (Article R. 4534-36).
- Ces passerelles doivent être résistantes, appropriées à la largeur de tranchée, d'un poids adapté aux conditions de mise en œuvre.
- Lorsque des travailleurs sont appelés à franchir une tranchée de plus de 40 cm de largeur, des moyens de passage sont mis en place (Article R. 4534-36).
- Ces passerelles doivent être résistantes, appropriées à la largeur de tranchée, d'un poids adapté aux conditions de mise en œuvre.



# **CHAPITRE II**

## Les différents types de blindages

---

## Les différents types de blindages

### II.1. Introduction

Sauf dans les terrains ne possédant aucune cohésion, la plupart des tranchées peuvent être creusées à la pelle hydraulique et leurs parois restent stables, mais pendant une durée malheureusement impossible à déterminer. C'est pourquoi il est impératif de les blinder pour protéger les travailleurs contre les risques d'éboulement.

Le choix du mode opératoire doit être fait en fonction des conditions géotechniques et hydrologiques et des contraintes d'environnement. Les entreprises ont maintenant à leur disposition toute une gamme de procédés permettant d'exécuter ce blindage dans de bonnes conditions, quelles que soient la nature et l'importance des travaux à exécuter.

### II.2. Fonction

Le blindage permet de sécuriser un espace excavé contre un éboulement de l'environnement immédiat soit par glissement de terrain, par rupture de talus ou par infiltration d'eau. Il permet aussi de protéger des passages, des espaces de travail pour les hommes et les machines. La réalisation des blindages nécessaires fait partie des règlements relatifs aux conditions de travail et à la sécurité au travail et est encadrée par des normes. (10)

La diversité des environnements à protéger et des risques nécessite l'emploi de différentes techniques de blindage : l'industrie minière possède notamment une longue expérience dans la pose d'étais et les grands projets de construction de tunnel ont permis de faire avancer l'état des techniques de blindage.

Dans le domaine du terrassement, on distingue schématiquement deux types de techniques. Pour la sécurisation de tranchées, on utilise des éléments de support étayés qui se font face. Pour la stabilisation d'excavations plus larges, la paroi est forée de pieux sécants permettant de stabiliser le sol en l'ancrant profondément. (11)

Les critères qui engendrent la nécessité de blinder une fouille sont les suivants.

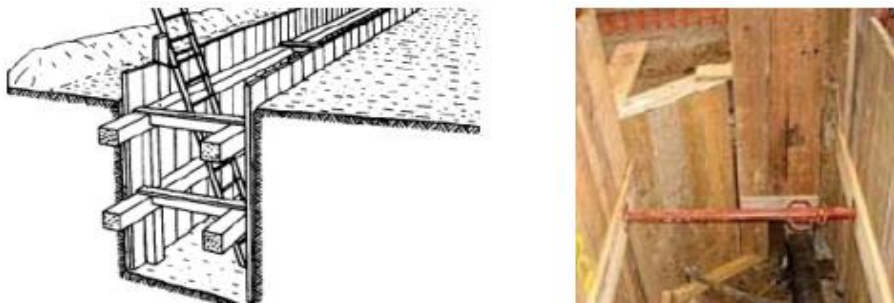
- La profondeur
- La nature du terrain
- Les vibrations voisines (travaux voisins)
- Les conditions hydrologiques
- Les surcharges de toute nature avoisinante (construction dans le voisinage, matériaux divers, déblais...)
- Les ébranlements dus à la circulation sur les voies carrossables, les pistes et les voies avoisinantes
- La configuration des tranchées (ex : croisement de tranchées)
- La nature des travaux à exécuter
- La stabilité globale du terrain



### II.3. Les différents types de blindages.

#### II.3.1. Blindages ponctuels.

##### II.3.1.1. Enfilage de planches verticales.



**Figure II.1.** Planches verticales.

Procédé ancien et peu utilisé (excepté dans les reprises en sous-œuvre) mais intéressant par le fait que son principe inspire beaucoup de procédés modernes qui utilisent des éléments préfabriqués métalliques. Ce procédé est le seul qui sans traitement de sol (sauf pour les terrains aquifères) permet d'effectuer une fouille quelque soit la profondeur. Il est également indispensable dans les cas de travaux urbains pour lesquels il faut éviter les décompressions du terrain à cause des constructions présentes autour de la zone de travaux.

Ce procédé offre le plus de sécurité à la pose et à la dépose et il convient aux terrains bouillants. Désormais afin de faciliter la pose, l'ossature bois est souvent remplacée par des longrines et des étrépillons en profilés métalliques boulonnés entre eux.

##### Avantage d'enfilage de planches verticales.

- Adaptable à tout type de terrain, sauf en terrain aquifère,
- Blindage mis en place à l'avancement.

##### II.3.1.2. Caisson modulaire.

###### Avantage :

- Adapté à la présence de réseaux en travers,
- Adaptable à la longueur du terrassement (évolutif),
- Mise en œuvre à la main



**Figure II.2.** Caisson modulaire

### Critères de choix.

#### Nature du terrain • Terrain cohérent

- Possibilité d'utilisation en terrain sans cohésion ;
- Profondeur maximale de terrassement : 2 m

#### Nature des travaux : • Petites fouilles d'exploitation (largeur de 0,55 à 1,8 m) Présence d'ouvrages et/ou bâtiments

- Adapté aux sous-sols moyennement encombrés

#### Durée des travaux : • Assemblage du (des) caissons : < 5 min ;

- Mise en place : < 5 min

Ce système peut rester installé quelques jours en terrain cohérent

### II.3.1.3. Blindage par caissons métalliques.

Le caisson comprend deux panneaux latéraux reliés entre eux par des étrépillons. Ces panneaux sont constitués de profilés métalliques soudés entre eux sur toute leur longueur. Ils sont renforcés par un montant central vertical sur lequel sont fixés les étrépillons. Leur base est biseautée pour faciliter la pénétration dans le sol.

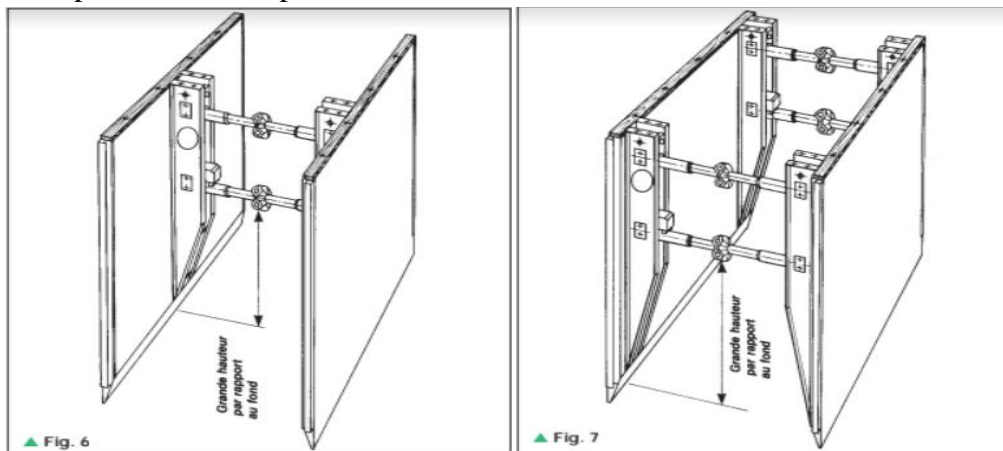


Figure II.3. Les caissons métalliques

Les étrépillons, au nombre de deux, sont de robustes vérins à vis. Leur fixation sur le panneau est articulée, permettant ainsi de légères déformations du caisson qui facilitent sa mise en place par havage. La fixation du vérin inférieur est réglable en hauteur afin de pouvoir disposer d'un espace suffisant pour la pose des tuyauteries. (12)

Un autre type de caissons comporte 4 vérins, ceux-ci tant alors fixés par paire aux deux extrémités. Toutes conçues suivant le même principe, il existe plusieurs catégories de caissons, chacune ayant une robustesse adaptée aux efforts auxquels ils seront soumis. Pour chaque type, des jeux d'accessoires (rehausse de panneaux, entretoises de vérins) permettent d'ajuster exactement les dimensions du caisson à celles de la tranchée à blinder.

### II.3.1.4. Blindage par caisson en bois.

Ce type de blindage est à utiliser dans des petites tranchées. Les éléments du blindage (deux parois de planches horizontales assemblées par des montants métalliques et des vérins à vis spécialement conçus) sont descendus dans la tranchée avec un engin de levage. Il faut les empiler les uns sur les autres en sachant que le dernier doit dépasser d'au moins 15 à 20 cm du haut de la tranchée. Les éléments supérieurs doivent ensuite être bloqués et les montants verticaux solidarisisés entre eux.



Figure II.4. Les caissons en bois.

Les éléments du blindage ont une longueur de 2.50 m avec des planches de 6 cm d'épaisseur. La hauteur est de 50 ou 90 cm. L'assemblage des parois et le réglage approximatif des étréssillons se fait à côté de la tranchée. Dans certains cas l'ensemble des opérations de montage du blindage sont effectuées à l'extérieur de la tranchée puis introduit en une seule pièce dans celle-ci. Lors de la dépose, le démontage est effectué dans la tranchée en prenant garde à commencer par les éléments inférieurs tout en remblayant au fur et à mesure.

### II.3.1.5. Blindage par cadre vertical.

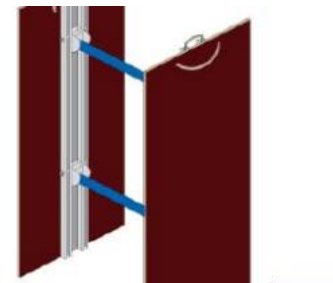


Figure II.5. Cadres verticaux (avec ceinture hydraulique)

#### Critères de choix.

Nature du terrain : • Terrain cohérent

Profondeur maximale de terrassement : • Jusqu'à 2 m

Nature des travaux : • Petites fouilles (branchements, fouilles d'exploitation...)  
• Largeur de tranchée de 0,50 à 1,70 m

Présence d'ouvrages et/ou bâtiments : • Non adapté aux sous-sols encombrés  
(croisement d'ouvrages existants ou d'obstacles)

Durée des travaux : • Mise en place très rapide, de l'ordre de 20 min  
• Priorité aux interventions courtes d'une journée (au-delà, nécessité de contrôler la pression de la ceinture régulièrement).

### II.3.1.6. Panneaux préfabriqués légers.



Figure II.6. Panneaux préfabriqués légers

#### Critères de choix.

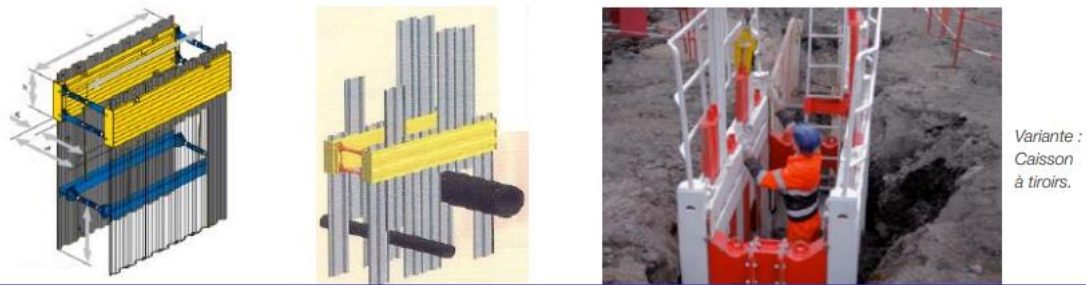
Nature du terrain : • Terrain cohérent  
Profondeur maximale de terrassement : • Jusqu'à 3 m  
Nature des travaux : • Petites fouilles d'exploitation  
• Pose de réseau en tranchée ouverte, largeur de 0,6 à 2,5 m  
Durée des travaux : • Mise en place rapide  
• Adapté aux interventions de quelques jours

### II.3.2. Blindage grandes surfaces.

#### II.3.2.1. Ceinture de blindage.

Cadre rigide servant de guide pour l'enfilage de palfeuilles ou profilés spéciaux. Les deux côtés du cadre guide sont reliés entre eux par des étrésillons.

Dimensions : • Hauteur 3-6 m ; longueur 2-6 m ; largeur 1-4 m  
• L'équipement est constitué : - d'un châssis (ceinture ou guide)  
- de palfeuilles indépendantes



**Figure II.7.** Ceinture de blindage( ou guide palfeuilles).

### Critères de choix.

Nature du terrain : • Tous types de terrain ; particulièrement adaptée aux terrains sans cohésion

Profondeur maximale de terrassement : • Jusqu'à 4,5 m

Nature des travaux : • Terrassement profond et non continu, de largeur maxi 4 m

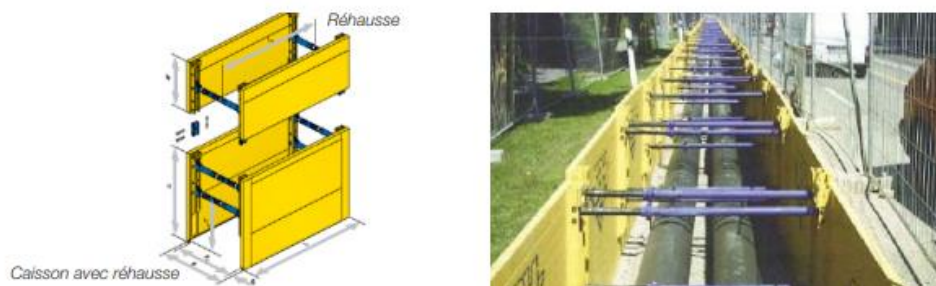
- Croisement de conduite
- Permet de réaliser des blindages non symétriques, grâce aux palplanches
- Permet de s'adapter à un fond de fouille à différents niveaux ou en dénivelé

Présence d'ouvrages et/ou bâtiments : • Adapté pour le croisement d'ouvrages existants ou d'obstacles

Durée des travaux ;

- Mise en place demandant une durée importante
- Ce système peut rester installé durablement

### II.3.2.2. Caisson a étaieement latéral.



**Figure II.8.** Caisson a étaieement latéral.

### Critères de choix.

- En terrain stable à l'ouverture : mise en place après terrassement.
- En terrain sans cohésion : mise en place par havage.
- La longueur des panneaux de blindage doit être déterminée de telle façon que l'extrémité de la portion blindée soit supérieure ou égale à 1m de l'extrémité du tuyau à poser.
- Profondeur maximum suivant préconisations du fabricant. (13)

### II.3.2.3. Caisson à étaieement central.



**Figure II.9.** Caissons à étaieement central  
(Privilégier le caisson à étaieement latéral).

#### Critères de choix.

- La profondeur maximum de la tranchée sera définie conformément à la notice d'utilisation du fabricant.
- L'utilisation de trois caissons au minimum sera systématique : un caisson à étaieement central ne doit jamais être utilisé seul, le troisième caisson permet d'assurer la rotation des caissons.
- La mise en place de caissons après terrassement (pas de havage) ne peut se faire que si :
  - Le sol est cohérent et de bonne tenue passagère (stable à l'ouverture),
  - Les parois de fouilles sont bien verticales,
  - La largeur de la tranchée reste constante.

### II.3.2.4. Blindage à glissière ou coulissant.



**Figure II.10.** Blindage coulissant.

Les blindages coulissants permettent d'échapper aux contraintes de volumes, de poids et de puissance de levage et d'excavation que nécessiteraient des caissons d'aussi grande taille Les différentes familles de classement suivant :

- Les profondeurs à atteindre (résistance)
- Les méthodes de mise en place
- Leurs dimensions

Blindage composé de panneaux qui sont enfilés sur des poteaux comportant une ou plusieurs glissières, ces poteaux étant reliés entre eux par des étrésillons

**Critères de choix.**

- Le blindage coulissant est conçu pour être mis en place par havage.
- L'utilisation du blindage coulissant n'est pas réservée aux grandes profondeurs. Il peut être judicieux d'utiliser du blindage coulissant pour des profondeurs moyennes (entre 3 et 4 m).

**Les Avantages.**

- Les différents éléments à manutentionner ont un poids unitaire nettement inférieur à un blindage équivalent de type « caisson ».
  - Continuité des différents éléments du blindage.
  - Peu de décompression du sol à l'arrachage.
  - L'arrachage des panneaux inférieurs se fait avant celui des panneaux supérieurs (le haut de la fouille reste blindé).

**Les Inconvénients.**

- Peu utilisable lorsqu'il y a beaucoup de canalisations en travers.
- Plus de manutention que les blindages caissons.

**II.3.2.5. Machine à blinder.****Figure II.11.** Machine à blinder

Les canalisations transversales, les bâtiments nombreux et rapprochés et la circulation sont des problèmes courants dans les projets de blindage en milieu urbain. A cela s'ajoutent les exigences en matière de bruit et de vibrations lors de l'installation des profils ou encore l'absence d'affaissements lors des travaux ou le compactage du sol, qui sont autant de défis inhérents au soutènement d'excavations réalisées en ville.

**Critère de choix.**

Nature du terrain : • Tous types de terrain particulièrement adaptée aux terrains sans cohésion

Profondeur maximale de terrassement : • Jusqu'à 8 m

Nature des travaux : • Terrassement profond et non continu, de largeur maxi 2,5 m

- Croisement de conduite en fond de fouille
  - Permet de réaliser des blindages non symétriques, grâce aux palpeuilles
  - Permet de s'adapter à un fond de fouille à différents niveaux ou en dénivelé
- Présence d'ouvrages et/ou bâtiments

- Adapté pour le croisement d'ouvrages existants ou d'obstacles

- Adapté pour une utilisation proche des bâtiments (pas de vibrations)

Durée des travaux : 

- Mise en place demandant une durée importante
- Ce système peut rester installé durablement

### I.3.2.6. Palplanches métalliques.



**Figure II.12.** Palplanches métalliques.

Les rideaux de palplanches ont un domaine d'emploi assez large dû en particulier à la possibilité qu'ils offrent de construire des soutènements en remblai aussi bien qu'en déblai, aux facilités qu'ils offrent en site aquatique et à leur relative étanchéité, qui permet généralement d'éviter le transport par l'eau des fines contenues dans le massif soutenu.

Dans le domaine terrestre, leur emploi a longtemps été limité au blindage des fouilles sous la nappe, domaine pour lesquels les techniques plus traditionnelles de blindage de fouilles sont inopérantes. Ils sont également utilisés, de façon moins courante, pour la réalisation d'ouvrages de soutènement (de déblai essentiellement), de piédroits de passages souterrains ou de tranchées, voire de culées d'ouvrages.



**Figure II.13.** Palplanches métalliques.

#### Critère de choix.

Nature du terrain : 

- Tous types de terrain (sauf si très caillouteux) ; bien adapté aux terrains sans cohésion
- Adapté aux changements de nature des terrains



Profondeur maximale de terrassement : • Couramment jusqu'à 6 m ; exceptionnellement jusqu'à 12 m, voire 20-30 m

Nature des travaux : • Pose de réseau en tranchée ouverte, même de grande largeur  
• Terrassement profond et continu de grandes dimensions  
• Fouille profonde, puits  
• Permet de réaliser des blindages non symétriques, grâce aux palplanches ;  
• Permet de s'adapter à un fond de fouille à différents niveaux ou en dénivelé,

Présence d'ouvrages et/ou bâtiments • Adapté pour le croisement d'ouvrages existants ou d'obstacles.

Durée des travaux : • Ce système peut rester installé durablement (jusqu'à plusieurs mois)  
• Mise en place et retrait relativement rapide.



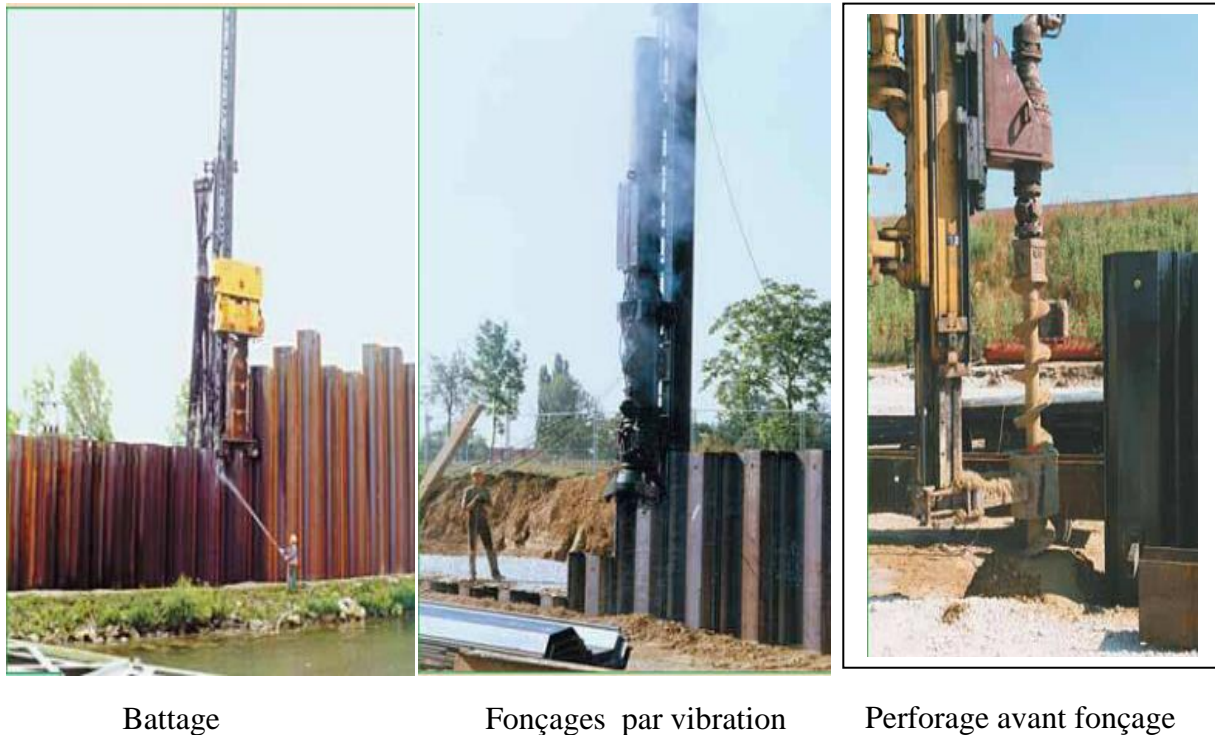
**Figure II.14.** Profilés métalliques.

#### Mise en œuvre :

1. **Le battage** : (fréquence d'environ 40 à 60 coups/mn) constitue la technique la plus ancienne. On utilise aujourd'hui un mouton de battage, diesel ou hydraulique. Il est bien adapté à tous les types de sols mais, à cause des nuisances sonores, son emploi en site urbain est limité.
2. **Le fonçage par vibrage**, ou « vibrofonçage », est apparu plus récemment. Cette technique fait appel à un vibreur transmettant au sol des vibrations (fréquence d'environ 1500 à 3000 Hz) par l'intermédiaire de la palplanche.

Le trépidage constitue une technique intermédiaire faisant appel à une fréquence de vibrations de 150 à 300 Hz environ.

Le vérinage ou fonçage direct, technique la plus récente, consiste à mettre en place les palplanches en leur appliquant un effort statique en tête au moyen d'un système prenant appui sur les palplanches déjà en place. Cette technique est bien adaptée à la mise en place de palplanches de faible hauteur dans des sols peu à moyennement consistants exempts d'obstacles.



Battage

Fonçages par vibration

Perforage avant fonçage

**Figure II.15.** Mode d'exécution des Palplanches.

#### II.4. Excavation par blindage en cours de terrassement.

La réalisation d'une fouille blindée peut être mise en œuvre en cours d'exécution. Le blindage doit avoir les qualités suivantes :

- pouvoir être mis en place et déposé sans exposer les exécutants au risque d'éboulement. Le sol doit assurer une cohésion pendant la durée du terrassement sous le blindage et pendant la phase de pose du blindage. Dès lors, la pose en milieu saturé n'est pas recommandée .
- Etre suffisamment résistant à la poussée des terres et aux efforts obliques.

Plusieurs types de blindages peuvent être mis en place en cours de terrassement et sont présentés ci après.

##### II.4.1. Blindage par Panneaux ou caissons.

Le blindage par panneaux en bois/béton ou par caissons en bois ou métalliques est réalisé au fur à mesure du terrassement. Les blindages mettant en œuvre des panneaux en bois ou béton sont souvent utilisés lors de terrassements manuels étant donné la gêne qu'occasionnent les étançons (vérins à vis). Dans certains cas, le blindage est de type « perdu ». Lorsque la technique fait appel à des caissons métalliques, le terrassement à l'aide d'excavatrice est possible. Les largeurs de fouilles peuvent alors être plus importantes. Pour le

dé-blindage, les éléments inférieurs sont démontés ou remontés au fur et à mesure du remblayage.



EXCAVATION EN FOUILLE



CAISSON METALLIQUE

#### II.4.2. Paroi cloutée.

Le blindage à l'aide d'une paroi cloutée est un type de soutènement léger hors d'eau, sous forme d'une paroi en béton projeté, armée d'un treillis, et ancrée dans le sol par des clous disposés subhorizontalement.

##### II.4.2.1. Mode d'exécution.

Excavation par phases descendantes successives :

- Terrassement de la première passe sur une profondeur limitée (typiquement de 1 à 2 m de profondeur) et placement de treillis d'armatures ;
- Renforcement du sol par la mise en place de barres passives (= clous), suivi immédiatement de la mise en œuvre d'un béton projeté ;
- Terrassement des passes suivantes, avec mise en place de clous et de béton projeté jusqu'à stabilisation de la paroi ;
- Paroi clouée terminée.



**Figure II.16.** Parois cloutée.

#### II.4.2.2. Domaine d'application.

- Inutilisable dans des sols sans cohésion à court terme car ce type de paroi nécessite la mobilisation du sol pour assurer le frottement des clous
- Renforcement du sol, retenue des terres
- Accès très limité, espaces exigus
- Reprise en sous-œuvre et stabilisation
- Réalisation de talus profonds et/ou raides ;
- 

#### II.4.3. Paroi berlinoise.

La technique de blindage à l'aide d'Une paroi berlinoise est un type de soutènement, Lors de la réalisation de travaux de terrassement, plus particulièrement en milieu urbain, par manque de recul ou de proximité des habitations, il peut être impossible ou risqué de réaliser les fouilles en talutant. On fait alors le choix de réaliser un soutènement provisoire ou définitif, au moyen de parois mises en œuvre avant le terrassement.

Deux méthodes différentes peuvent alors être mises en place. La paroi berlinoise et la paroi parisienne, avec tous les ajustements et mélanges entre les deux méthodes possibles. (14)



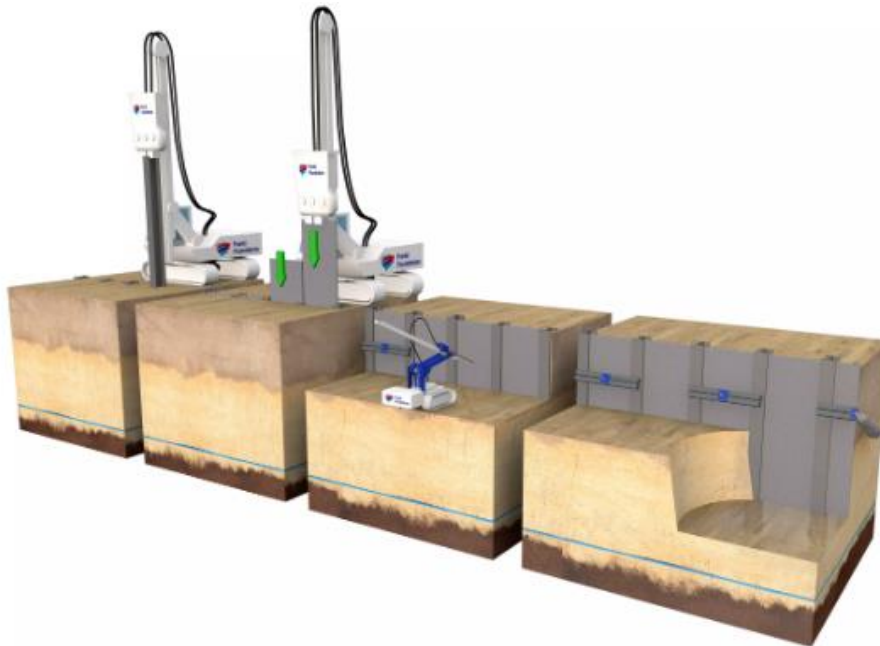
**Figure II.17.** Paroi berlinoise.

#### II.4.3.1. Mise en œuvre du blindage (bois ou prédalle béton).

- **Le boisage** : les madriers sont positionnés entre les fers au fur et à mesure de la purge. Un remblaiement dans la partie arrière de la paroi est réalisé pour éviter tout désordre du terrain aux alentours. Un compactage hydraulique est réalisé si nécessaire.

- **Prédalles béton** : les prédalles sont insérées entre les poutrelles aciers à l'aide de la pelle mécanique. Un procédé similaire, avec la descente d'éléments verticaux en périphérie de la zone à terrasser. Le terrassement s'effectue ensuite par passes, avec mise en place d'éléments de renforts (bastaings ou panneaux en béton préfabriqués pour la berlinoise, paroi projetée pour la parisienne) entre ces éléments verticaux. Les porteurs verticaux différents entre les deux méthodes: des pieux forés ou tubés sont utilisés sur les parois parisiennes, alors que des profilés métalliques (en I ou en H) rigidifient la paroi berlinoise.

La paroi Parisienne où les poteaux sont en béton armé. Après terrassement de la passe, un béton est coulé entre les poteaux.



**Figure II.18.** Mode d'exécution des parois Parisiennes.

#### **Domaine d'application :**

- Blindage très économique pour fouilles ;
- Paroi de retenue des terres, sans nappe d'eau sur la hauteur de l'excavation ;
- Pas étanche (paroi perméable) ;
- Excavations plutôt limitées (constructions dans des emplacements restreints) ;

#### **II.4.4. paroi Parisienne (ou lutécienne).**

La paroi parisienne est un type de soutènement, formée d'éléments offrant une résistance verticale, réalisée soit par des pieux soit par des profilés métalliques et un blindage en béton projeté légèrement armé.

##### **II.4.4.1. Mise en œuvre.**

Exécution du pieu foré, moulé dans le sol, armé et bétonné ou d'un forage pour la mise en place du profilé métallique.

- Première passe de terrassement, blindage en béton projeté légèrement armé Ancreage éventuel de la paroi.
- Phase finale de terrassement, finition du blindage avec du béton projeté.



Figure II.19 . Mode d'exécution.

Tableau I.1. Tableau comparatif des principales parois composites.

|                             | Paroi berlinoise   | Paroi micro-berlinoise  | Paroi parisienne   | Paroi lutétienne   | Paroi rennaise (pieux tangents/sécants)  |
|-----------------------------|--|---|--|--|--|
| Structure des poteaux       | Profilés métalliques   | Profilés métalliques  | Pieux en béton armé préfabriqués   | Pieux en béton armé coulés en place  | Pieux en béton armé coulés en place  |
| Forage                      | Ø ou h ≥ 600 mm  | Ø ou h ≤ 250 mm   | Ø ou h ≥ 600 mm  | Ø ≥ 400 mm   | Ø ≥ 400 mm   |
| Vibro-fonçage ou battage    | oui  | oui   | oui  | non  | non  |
| Parement                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton projeté</li> <li>• Béton coffré</li> <li>• Plaques préfabriquées en béton</li> <li>• Plaques métalliques</li> <li>• Planches en bois</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton projeté</li> <li>• Béton coffré</li> <li>• Plaques préfabriquées en béton</li> <li>• Plaques métalliques</li> <li>• Planches en bois</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton projeté</li> <li>• Béton coffré</li> <li>• Plaques préfabriquées en béton</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton projeté</li> <li>• Béton coffré</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton projeté</li> <li>• Rien</li> </ul>  |
| Éléments de stabilité       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auto-stables</li> <li>• Tirants</li> <li>• Butons</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auto-stables</li> <li>• Tirants</li> <li>• Butons</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auto-stables</li> <li>• Tirants</li> <li>• Butons</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auto-stables</li> <li>• Tirants</li> <li>• Butons</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auto-stables</li> <li>• Tirants</li> <li>• Butons</li> </ul>  |
| Domaine d'emploi            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ouvrages provisoires</li> <li>• Ouvrages définitifs</li> <li>• pour des hauteurs de poteaux &gt; 15 m, prévoir des dispositions constructives spécifiques pour garantir la verticalité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ouvrages provisoires</li> <li>• Ouvrages définitifs</li> <li>• pour des hauteurs de poteaux &gt; 15 m, prévoir des dispositions constructives spécifiques pour garantir la verticalité</li> <li>• Petits ouvrages</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ouvrages provisoires</li> <li>• Ouvrages définitifs</li> <li>• pour des hauteurs de poteaux &gt; 15 m, prévoir des dispositions constructives spécifiques pour garantir la verticalité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ouvrages provisoires</li> <li>• Ouvrages définitifs</li> <li>• pour des hauteurs de poteaux &gt; 15 m, prévoir des dispositions constructives spécifiques pour garantir la verticalité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ouvrages provisoires</li> <li>• Ouvrages définitifs</li> <li>• pour des hauteurs de poteaux &gt; 15 m, prévoir des dispositions constructives spécifiques pour garantir la verticalité</li> </ul> |
| Particularités / berlinoise |  |   |  | Possibilité de hauteurs plus importantes   | Sol présentant une cohésion à long terme   |
| Inconvénients               | Mal adaptée aux fouilles de très grande profondeur   | Réservée aux fouilles de faible profondeur  | Mal adaptée aux fouilles de très grande profondeur   | Pas d'inconvénient majeur  | Limitation due à la nature du sol  |

## II.5. Excavation par blindage avant terrassement.

Dans le cas de fouilles de grande taille, profondes ou dans des sols de faibles cohésions, le système de blindage sera mis en œuvre avant la réalisation du terrassement. Plusieurs types de blindages pouvant être mis en œuvre avant de procéder au terrassement sont présentés ci-après. L'étude d'une paroi de soutènement nécessite un dimensionnement de plusieurs paramètres en fonction de la profondeur du terrassement, de la nature du sol, de la présence d'une nappe, d'infrastructures environnantes... Les paramètres clés sont :

- Calcul de la fiche (partie du blindage qui sera sous le niveau du terrassement) ;
- Détermination des ancrages et dimensionnement des tirants ;
- Détermination de la flexibilité maximale du blindage.

### II.5.1. Rideau de palplanches.

Une palplanche est un pieu profilé destiné à être battu ou vibrofoncé dans le sol meuble. Elle est solidaire des pieux voisins par l'intermédiaire de nervures latérales appelées « serrures ». Un rideau de palplanches permet la réalisation d'un mur imperméable lorsqu'un produit d'étanchéité est appliqué dans la serrure. En milieu urbain, on peut également enfoncer les palplanches en force avec un vérin hydraulique. Cette méthode, silencieuse et n'exerçant aucune vibration sur les ouvrages adjacents, entraîne cependant un remaniement du sol susceptible de tassements différentiels à long terme.

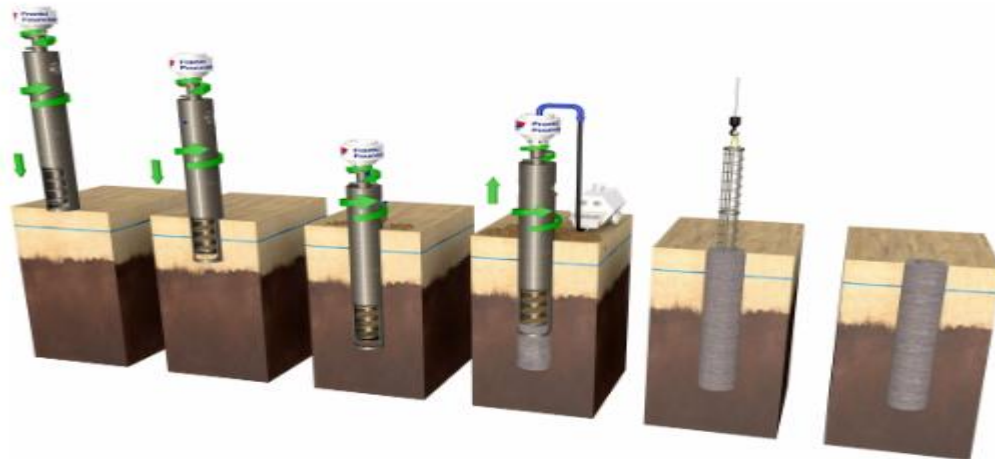


Figure II.20. Rideau de palplanche.

### II.5.2. Rideau de pieux.

La paroi de pieux est constituée d'une série de pieux en béton tangents (ou jointifs) ou sécants (ou coupants) . C'est une mesure de soutènement des terres en sol meuble ou induré en fonction de la technique de forages (tarière ou pieu foré). Cette technique est souple, flexible (par exemple, en forme arrondie) et permet de traverser des horizons de béton ou de roche. Lorsque les pieux sont sécants, le rideau est étanche. En cas de pose en milieu saturé, la quantité en béton doit être supérieure à 375 kg/m<sup>3</sup>.

### II.5.2.1. Pieux à la tarière continue tubée .



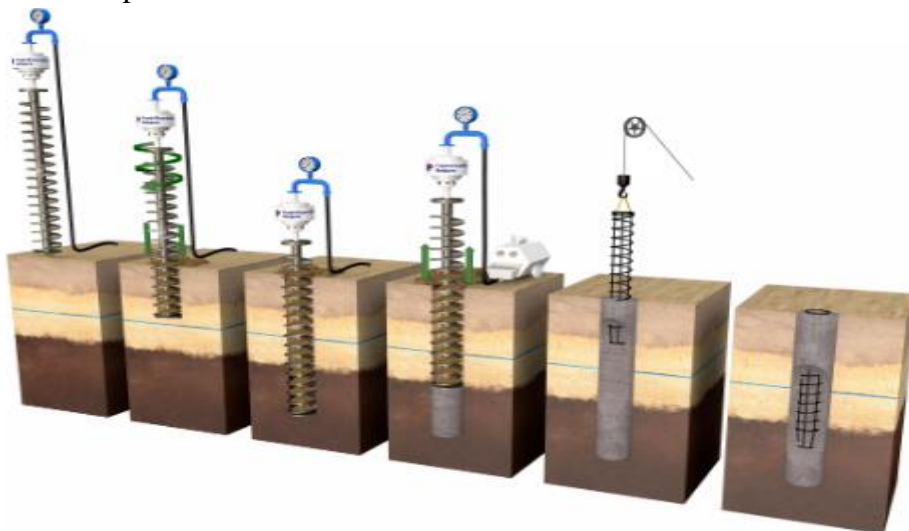
**Figure II.21.** Mode d'exécution des pieux à la tarière continue tubée .

#### Domaine d'application.

- Utilisé en particulier pour la réalisation de murs de soutènement et/ou d'étanchéité (voir paroi de pieux sécants)
- Peut être exécuté à travers d'anciennes fondations (maçonnerie).
- Réalisation des pieux très près de bâtiments adjacents (quelques centimètres)

### II.5.2.2. Pieu à tarière creuse PCS ("Pressurized Concrete Screw" pile).

Le pieu vissé tarière creuse dit PCS est un pieu vissé à faible décompression des terres et refoulement latéral du sol par bétonnage sous pression. Le pieu est réalisé à l'aide d'une tarière continue à axe creux. Le bétonnage est effectué au moyen d'une pompe qui injecte le béton fluide sous pression au travers du tube central creux.



**Figure II.22.** Mode d'exécution des pieux à tarière creuse PCS.

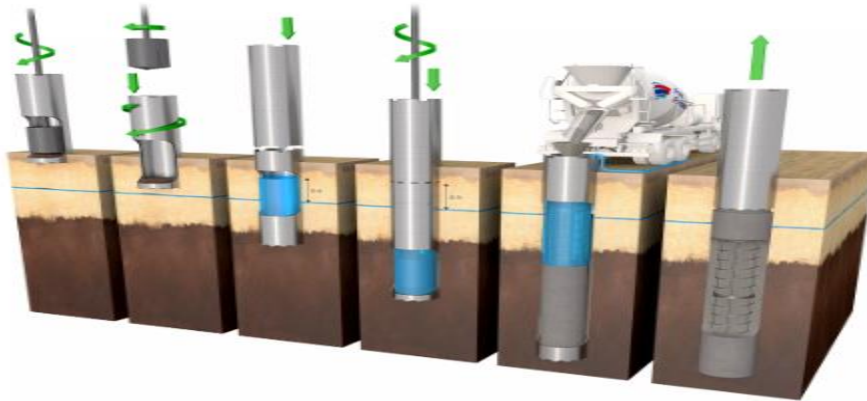


**Domaine d'application.**

- Exécution dans des sols fortement stratifiés comprenant des couches de résistances élevées
- Comme pieu solitaire ou comme élément d'une paroi en pieux (rideau de pieux tangents)
- Comme solution alternative pour des pieux forés de grand diamètre.
- Infrastructure et projets industriels

**II.5.2.3. Le pieu foré de grand diamètre avec tubage.**

Le pieu foré de grand diamètre avec tubage louvoyé est un pieu cylindrique en béton moulé dans le sol. Il est réalisé par forage préalable sous la protection d'un tube de guidage provisoire, éventuellement sous surpression d'eau.



**Figure II.23.** Mode d'exécution Le pieu foré de grand diamètre avec tubage.

**Domaine d'application.**

- Pieu solitaire, tangent (paroi de pieux tangents) ou sécant (paroi de pieux sécants) ;
- Convient pour des charges ponctuelles concentrées élevées, des efforts horizontaux et des moments de flexion.
- Assise ou encastrement possible dans des couches plus résistantes ou rocheuses.
- Percement d'obstacles dans le sous-sol, qui empêchent l'application d'autres techniques.
- Très grandes profondeurs d'assise (jusqu'à > 50 m)
- Niveau de coulage (= arrêt bétonnage) sous le niveau de plate-forme de travail possible (« contrebas »)
- Travaux d'infrastructure, projets industriels importants, grands immeubles
- Réalisation de construction 'top-down'

**II.5.3. Paroi moulée.**

Une paroi moulée (mur emboué de 0,5 à 1,5 m d'épaisseur) est un écran formé soutènement dans le sol meuble, réalisé par la mise en place de béton et d'une armature en acier dans une tranchée creusée à l'aide d'une benne d'excavation sous fluide de support (boue thixotropique comme la bentonite par exemple).



**Figure II.24.** Paroi moulée

### **Domaine d'application**

- La paroi moulée remplit soit la fonction de paroi étanche et/ou de mur de soutènement. Elle peut aussi faire fonction d'élément porteur vertical.
- Des panneaux de parois moulées peuvent être réalisés en paroi continue ou en éléments porteurs isolés (barrettes).
- Reprise de charges verticales élevées
- Soutènement d'excavations profondes à proximité immédiate de constructions existantes.
- Projets de tunnels et de parkings en environnement urbain, murs de quai

### **II.5.4. Paroi soil mix.**

La paroi Soil Mix est une paroi de soutènement continue composée de panneaux parallélépipédiques.

- Technique de Cutter Soil Mix (paroi CSM)
- De panneaux cylindriques
- Technique Mixed In Place (paroi MIP)

#### **II.5.4.1. La paroi du type 'mixed in place' (ou paroi MIP) .**

La paroi du type 'mixed in place' (ou paroi MIP) est une paroi de soutènement constituée de colonnes cylindriques à recouvrement, exécutée sans tubage en réalisant trois pieux simultanément. Le sol en place est mélangé mécaniquement avec un coulis de liant.



**Figure II.25.** Paroi du type mixed in place.

**Domaine d'application.**

- Alternative à la paroi berlinoise ou à la paroi de pieux sécants
- Solution économique
- Sans décompression du sol
- En fonction des calculs et du but recherché de la paroi, on peut:
  - vibrer des palplanches
  - enfoncer des profilés (paroi berlinoise par formation de voûte)
  - réaliser des ancrages pour une fonction de soutènement

**II.5.4.2. La paroi du type cutter soil mix (paroi CSM).**

La paroi du type cutter soil mix (paroi CSM) est une paroi de soutènement continue composée de panneaux parallélépipédiques se juxtaposant ou s'intersectant. Les panneaux sont formés par le mélange mécanique intense (malaxage) du terrain en place avec un liant hydraulique injecté en continu. La fonction de soutènement de la paroi en sol mixé CSM apparaît par l'effet de voûte après durcissement du mélange "sol-liant" entre les profilés d'acier, mis en place dans la phase liquide.



**Figure II.26.** Paroi du type cutter soil mix.

**Domaine d'application.**

- Convient comme paroi de soutènement et paroi d'étanchéité, ou comme amélioration de sol.
- La mise en place des profilés d'acier, destinés à reprendre les contraintes de cisaillement et de flexion agissant sur le mur de soutènement, assure la fonction portante et la stabilité de la paroi.
- Alternative à la paroi berlinoise ou à la paroi de pieux
- Meilleurs résultats dans des sols à pourcentage de fines limité (peu propice aux sols argileux).

**II.5.4.3. La paroi du type soilmix.**



**Figure II.27.** Paroi en soilmix (paroi CSM).

# **CHAPITRE III**

Dimensionnement des fouilles  
blindées.

---

## Dimensionnement des fouilles blindées.

### III. 1. Introduction

Tous les ouvrages de soutènement qui doivent résister à la pression latérale des terres nécessitent la détermination de la répartition des contraintes auxquelles ils sont soumis ou qu'ils mobilisent.

Ces ouvrages de soutènement concernent les murs (mur-poids, murs cantilevers, murs cellulaires..) et les écrans (parois moulées, parois berlinoises et dérivées, rideaux des palplanches, fouillées blindées...). Suivant le problème traité, on fera un calcul à la rupture (sol dans un comportement rigide-plastique) ou un calcul en déplacement (sol dans un comportement élasto-plastique, ou autre...).

### III.2. Réalisation

Une fouille blindée est une excavation comportant sur ses deux parois deux soutènements opposés butés l'un contre l'autre par des butons ou des étais pratiquement indéformables. Le mur de soutènement est souvent en rideaux de palplanches ou en paroi (moulée, préfabriqué, en pieux sécants, etc). (15)

Le blindage des fouilles rencontrent deux problèmes majeurs, à savoir :

- L'excavation perturbe l'équilibre initial du terrain, ce qui menace la stabilité du site au cours des travaux au sein de l'excavation,
- L'excavation menace la stabilité des ouvrages adjacents et peut leur causer des désordres en termes de tassement, de glissement ou autre forme d'instabilité.

La fouille est généralement blindée selon les étapes suivantes :

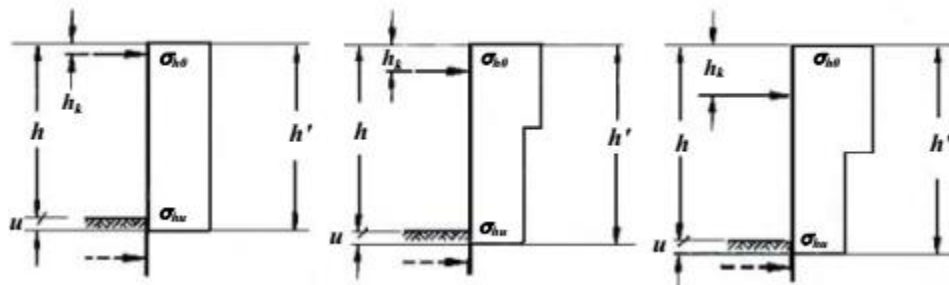
1. Réalisation préalable du mur soutènement sous forme de rideaux de palplanches ou de paroi moulée,
2. Excavation de la fouille à une certaine profondeur,
3. Les deux faces opposées de la fouille sont renforcées par le blindage sous forme d'étais, des butons ou de tirants précontraints,
4. Au fur et à mesure de l'avancement dans le creusement, répéter les étapes 2 et 3 .

#### III.2.1 Méthode empirique de calcul des fouilles blindées

L'approche par le calcul de la distribution des poussées sur des écrans en rotation par rapport au haut de l'écran n'a jamais réellement abouti en pratique et s'est vite trouvée concurrencée par une approche nouvelle consistant à tirer directement de mesures sur ouvrages les répartitions de pressions à introduire dans le calcul des soutènements d'excavation.

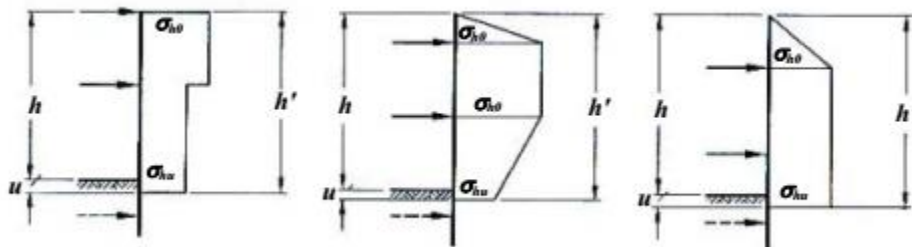
Cette approche a été développée essentiellement en Allemagne et aux états- unis, au cours de la deuxième partie du vingtième siècle.

**III.3. L'école allemande.**



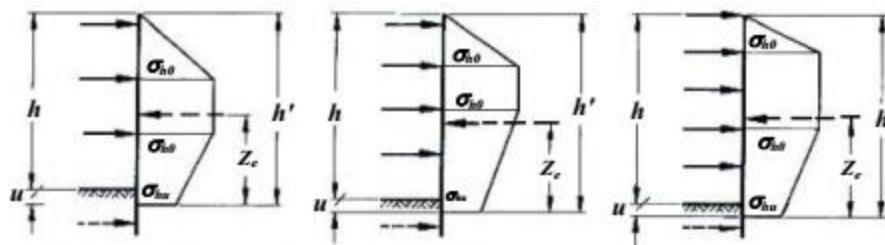
Appui à  $h_k \leq 0.1h$  Appui à  $0.1h < h_k \leq 0.2h$  Appui à  $0.2h < h_k \leq 0.3h$

**Schémas de redistribution pour des parois en béton coulé en place avec 1 appui**



Appuis situés en haut Appuis situés en bas Appuis à 1/4h et 3/4h

**Schémas de redistribution pour des parois en béton coulé en place avec 2 appuis**



3 appuis

4 appuis

5 appuis

**Schémas de redistribution pour des parois en béton coulé en place avec 3 appuis ou plus**

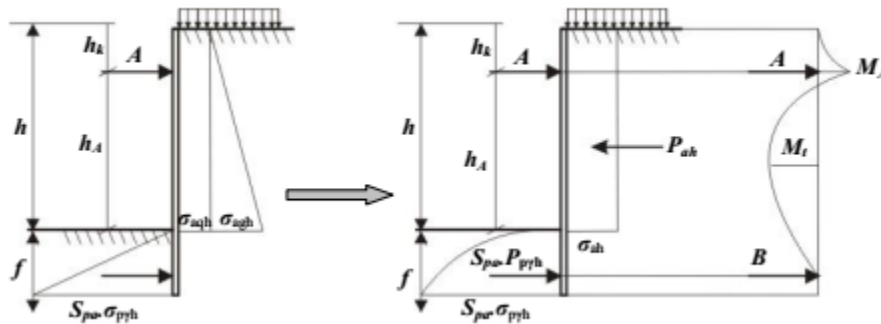
**Figure III.1.** La distribution approchée de la poussée en fonction de la Position et du nombre d'ancrages sur parois moulées.

La partie la plus connue en dehors de l'Allemagne traite de la redistribution de la poussée des terres selon le type de soutènement et les conditions d'appui. Les figures suivantes montrent la redistribution de la poussée pour des parois en béton coulé en place, c'est-à-dire des parois moulées ou des parois de pieux forée. (Fig.III.1).La poussée est fortement influencée par la présence et la disposition des ancrages. (16)

En effet, ces derniers empêchent l'écran de se déplacer de façon à ce qu'une zone de poussée de Rankine puisse s'établir, le diagramme des poussées n'est plus triangulaire.

❖ **Cas particulier de la distribution rectangulaire**

On utilise la distribution triangulaire classique de coulomb. Le diagramme de contrainte résiduelles après superposition de poussée et butée obtenu et ensuite transformé en une distribution rectangulaire comme suit :Paroi berlinoise ( $h_k \leq 0.3h$ ):



**Figure III.2.** Transformation d'une distribution triangulaire de poussée à une distribution rectangulaire d'une paroi berlinoise.

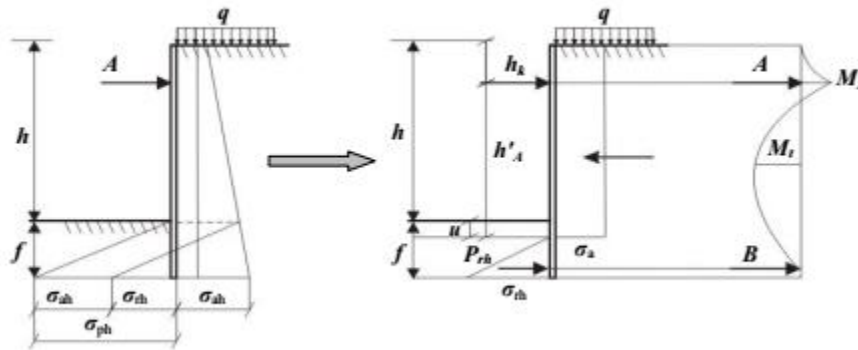
✓ Corrections :

- la force d'ancrage :  $A' = A \cdot \left(\frac{h}{h_A}\right)$  avec :  $A' \leq P_{ah}$  (III.1)

-Moment en travée:  $M'_t = M_t \cdot \left(\frac{h_A}{h}\right)$  (III.2)

Rideaux de palplanches et parois moulées ( $h_k \leq 0.3h$ ) :





**Figure III.3.** Transformation d'une distribution triangulaire de poussée à une distribution rectangulaire d'une paroi moulée.

$$\text{Correction : -la force d'ancrage } A' = A \sqrt{\frac{A}{h'_A}} \quad \text{avec } A' \leq P_{ak} \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Moment e travée : } M'_t = M_t \sqrt{\frac{A}{h'_A}} \quad (\text{III.4})$$

Le diagramme trapézoïdal est plus approprié que le diagramme rectangulaire pour les raisons suivantes :

- Les pressions des terres sont concentrées aux endroits d'ancrage résultant du courbement ;
- Les pressions des terres sont nulles due à la surface de sol en cas de sols pulvérulents et en absence de surcharges extérieurs.
- Les pressions des terres augmentent de la surface libre du sol à l'endroit supérieur du boulon d'ancrage ;
- Pour les sables à densité moyenne ou très denses les pressions des terres diminuent en dessous de l'ancrage inférieur à cause de la butée en contrepartie.

### III.3.1 L'école américaine.

#### ❖ Diagrammes des pressions des terres de Terzaghi et Peck

En 1967, Terzaghi et Peck avaient établi des diagrammes enveloppes donnant les poussées maximales se manifestant aux différents niveaux pendant les phases de terrassement. Ces diagrammes avaient été établis empiriquement à partir d'observations et de mesures faites sur des chantiers, pour trois types de sols. Le diagramme-enveloppe est alors rectangulaire et a une largeur:  $\bar{\sigma} = 0.65 K_a \gamma h$

La perturbation de l'équilibre naturel du sol lors de l'excavation de la fouille nécessite une analyse détaillée de la stabilité, tenant compte de plusieurs phénomènes se manifestant simultanément.

Le premier phénomène à étudier est la stabilité du fond de fouille. En fait, comme le schématise la figure III.4, si on considère que le sol adjacent à la fouille agit à la base de la fouille par une contrainte verticale  $\sigma_v$  égale à  $\gamma H$ , si cette contrainte est très importante, le sol est forcé de se déformer en se soulevant du fond de la fouille et en tassant en surface du sol, ce qui peut causer des désordres aux ouvrages adjacents à la fouille. Cassan (1978) a étudié la pression verticale en deçà de laquelle le soulèvement ne se manifeste pas. Selon la figure III.4, résumant le principe de la méthode de cet auteur, les lignes de rupture remontent verticalement au dessus du fond de fouille. Ce schéma correspond à la moitié de celui d'une fondation superficielle ayant une largeur  $B'$  et reposant à côté du fond de fouille.

La capacité portante d'une telle fondation, en considérant qu'elle est posée en surface ( $D=0$ ) d'un sol pulvérulent ( $C=0$ ) est :

$$q_L = \frac{1}{2} \gamma B \gamma(\varphi) (2B') \quad (\text{III.5})$$

La pression verticale  $q$  au fond de fouille, à l'état d'équilibre limite est égale à celle du poids des terres à laquelle on retranche la contrainte verticale due à la mobilisation de la résistance au cisaillement  $\tau$  le long du plan vertical, se trouvant à une distance  $B'$  de la fouille. La contrainte  $\tau$  en état d'équilibre limite (ou résistance au cisaillement) est donnée par :

$$\tau = k \gamma Z T g(\varphi) \quad (\text{III.6})$$

La pression  $q$  est alors donnée par :

$$q_L = \gamma B - \frac{1}{B'} \left[ \frac{1}{2} K \gamma H^2 T g(\varphi) \right] \quad (\text{III.7})$$

**Explication de la figure** : Dans le cadre de réalisation d'un tunnel ferroviaire à Gravesend (angle terre) long de 1.8 km, les travaux à ciel ouvert ont comporté la réalisation préalable de parois moulées en pieux jointifs de 1 m de diamètre, à une profondeur de 20 à 25 m. Les sections traversées par le tracé comportent un terrain argilo-sableux raide avec une nappe d'eau à 2 m de la surface. La fouille ainsi réalisée a été blindée par des butons formés de tubes en acier de 1 m de diamètre, espacés horizontalement de 4.5 m, et disposés en 2 lits le long de la paroi. Une particularité de ce projet est l'instrumentation des butons par des jauges de déformation en vue de mesurer les efforts repris par les butons et les confronter aux calculs prévisionnels effectués lors de l'étude géotechnique.

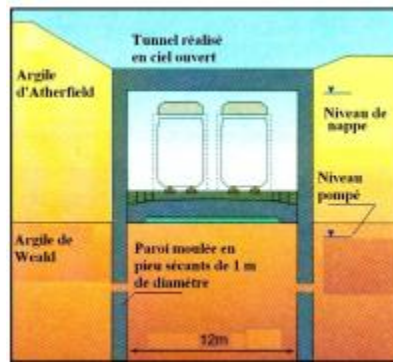


Figure III.4. Blindage du tunnel ferroviaire à Gravesend (angle terre)

$K$  est un *coefficient de pression des terres* variant entre  $K_0$  (pression des terres au repos) et  $K_a$  (pression ultime de poussée).

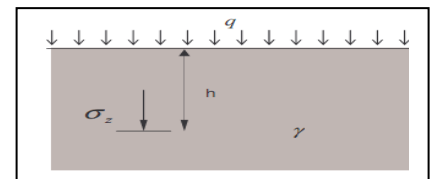
$K_0$  pression des terres au repos, Il est indépendant de l'état de saturation du massif. Il est constant pour une même couche de sol et une même masse volumique.

$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \tag{III.8}$$

**Cas 1. Surface horizontale uniformément chargée**

$$\sigma_v = \gamma h + q$$

$$\sigma_h = K_0(\gamma h + q)$$



**Cas 2. Dans un sol en place saturé**

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad ; \quad \sigma_h = U + \sigma'_h \quad \text{Avec : } \sigma'_h \text{ la contrainte effective horizontale}$$

$$\sigma_v = U + \sigma'_v \quad \text{Avec : } \sigma'_v \text{ la contrainte effective horizontale ; } U : \text{ pression interstitielle.}$$

Le coefficient  $K_0$  peut être déterminé expérimentalement par un essai triaxial pendant lequel on empêche toute déformation latérale. D'autre part, on peut trouver des relations analytiques donnant  $K_0$  en fonction des propriétés du sol. (17)

Il existe une formule empirique, due à Jaky, si le terre-plein est horizontal:  $K_0 = (1 - \sin\varphi)$

Pour les sables et graviers :  $K_0 = \frac{1 - \sin\varphi}{\cos\varphi}$

Tel que  $\varphi$  angle de frottement interne du sol.

$K_0$  varie en fonction de type de sol :

- $K_0$  : 0.45- 0.5 pour le sable lâche
- $K_0$  : 0.40- 0.45 pour le sable compact
- $K_0 = 1$  pour les argiles molles et les vases
- $K_0 = 0.5$  pour l'argile normalement consolidée
- $K_0 > 0.5$  argile sur consolidée.

**Ka** pression ultime de poussée, leurs formules sont résumées dans le tableaux en fonction des angles :  $\varphi$  : angle de frottement interne de sol,  
 $\delta$  : angle de frottement sol/mur ( la rugosité) ;  
 $\beta$  : angle d'inclinaison du terrain ;  
 $\gamma$  : angle d'inclinaison du mur ;

|                | Cas général   | Cas particulier  |
|----------------|---|--|
| $K_{ayh}$      | $\frac{\cos^2(\lambda + \varphi)}{\cos^2\lambda \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta)\sin(\varphi - \beta)}{\cos(\lambda - \delta)\cos(\lambda + \beta)}} \right]^2}$ | $\lambda = \beta = \delta = 0$<br>$\tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$ |
| $K_{aq\gamma}$ | $\frac{K_{ay} \cos\lambda \cos\beta}{\cos(\lambda + \beta)}$  | $K_{ayh}$  |
| $K_{ac\gamma}$ | $-2\sqrt{K_{ay}h}$  | $-2 K_{ayh} = -2 \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$                     |

En adoptant la valeur **Ka**, donnant selon l'auteur une évaluation pessimiste de la pression **q**, le coefficient de sécurité vis-à-vis du soulèvement de fond d'une fouille de sol pulvérulent est défini comme suit :

$$F_s = \frac{q_1}{q} = - \frac{2B'^2 N_\gamma}{2H B' - k_a H^2 \text{tg}\varphi} \quad (\text{III.9})$$

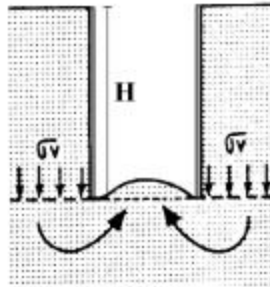


Figure III.5. Schéma de soulèvement du fond de fouille soutenu.

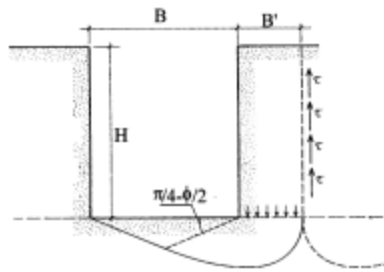


Figure III.6. Mécanisme de rupture du fond de fouille en cas de nappe en dessous du fond.

Ce coefficient est minimal pour une valeur de  $B'$  égale à  $KaHtg\phi$ , ce qui aboutit finalement à :

$$F_s = 2KaN\gamma tg\phi \tag{III.10}$$

En cas d'un sol fin saturé ( $\phi=0$ ), la capacité portante de la fondation fictive sera égale à :

$$q_f = (\pi+2)C_u \tag{III.11}$$

On aboutit à la définition suivante du coefficient de sécurité :

$$F_s = \frac{(\pi+2)C_u}{\gamma_{Sat}H - \frac{H'}{B}C_u} \tag{III.12}$$

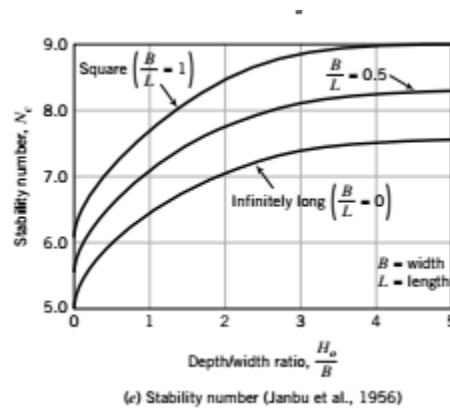
La largeur  $B'$  étant égale à  $B/\sqrt{2}$ , le coefficient  $F_s$  est alors donnée par :

$$F_s = \frac{(\pi+2)C_u}{\gamma_{Sat}H - \sqrt{2}\frac{H}{B}C_u} \tag{III.13}$$

Ou bien :

$$F_{sb} = \frac{N_b C_u}{\sigma_{z=H}}$$

Telque :  $N_b$  : coefficient tirer en fonction de  $H/B$  Selon l'abaque :



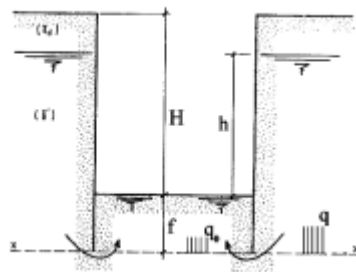
**Figure III.7.** Le coefficient Nb (Janbu et al 1956).

En état d'équilibre limite ( $F_s=1$ ), la hauteur limite  $H_c$  est alors égale à :

$$H_s = \frac{(\pi+2)c_u}{\gamma_{sat} - \sqrt{2} \frac{c_u}{B}} \quad (\text{III.14})$$

On retrouve ainsi l'équation relative à la stabilité d'une fouille de fondation sur radier, valable pour une fouille très longue ( $L \gg B$ ) et ayant une hauteur inférieure à sa largeur. De telles relations sont valables seulement aux massifs homogènes, c'est-à-dire ceux ne comportant pas d'horizon indéformable juste en dessous du fond de fouille. Selon Cassan (1978), dans le cas d'un sol fin saturé, si un tel horizon se trouve à une distance  $h$  du fond de fouille inférieure à  $B/\sqrt{2}$ , la largeur  $B'$  doit être prise égale à  $h$ .

Le deuxième phénomène, en relation directe avec le risque d'instabilité du fond de la fouille, est celui de l'écoulement de l'eau vers la fouille sous un gradient hydraulique ou lors du pompage, comme le schématise la figure III.8. En fait, le fond de fouille est stable tant que le niveau d'eau à l'intérieur de la fouille est supérieur à celui de l'eau à l'extérieur. L'instabilité se manifeste surtout en cas de pompage sans prendre des précautions.



**Figure III.8.** Schéma d'instabilité du fond de fouille.

Pour assurer l'équilibre du soutènement, particulièrement dans les sols sableux, il est nécessaire de faire descendre suffisamment le soutènement dans la fouille, soit de  $f$ , pour maintenir sa stabilité suite à la remontée de l'eau.

La stabilité du fond de fouille d'un sol pulvérulent, en présence des forces d'écoulement ascendantes, est assurée si la pression verticale appliquée  $q$  est inférieure à la capacité portante, soit :

$$q < q_l = q_0 Nq \quad (\text{III.15})$$

La contrainte verticale  $q$  appliquée à la base du mur à l'extérieur de la fouille est la somme de la contrainte due au poids des terres et celle due à l'écoulement des cendant de l'eau sous un gradient hydraulique  $i$  :

$$q = \gamma_d(H-h) + \gamma'(h+f) + i\gamma_w(h+f) \quad (\text{III.16})$$

La contrainte  $q_0$  est la somme de la contrainte due au poids des terres et celle due à l'écoulement ascendant de l'eau vers le fond de fouille :  $q_0 = \gamma'f - i\gamma_w f$

La condition de stabilité s'écrit ainsi :

$$\gamma_d(H-h) + \gamma'(h+f) + i\gamma_w(h+f) < (\gamma' - i\gamma_w)f \operatorname{tg}^2\left(\left(\frac{\pi}{4}\right) + \left(\frac{\varphi}{2}\right)\right) \exp(\pi \operatorname{tg} \varphi) \quad (\text{III.17})$$

En cas d'un sol fin saturé, la condition de stabilité du fond de fouille devient :

$$q < q_l = q_0 + (\pi + 2)Cu \quad (\text{III.18})$$

Ce qui peut se simplifier, en adoptant la formule de Couard pour le gradient hydraulique:

$$i = \frac{h}{h+2f} \quad (\text{III.19})$$

$$\gamma_d(H-h) + \gamma + \gamma_{\text{sat}}h < (\pi + 2)Cu \quad (\text{III.20})$$

Un troisième aspect d'instabilité lié à la construction d'une fouille blindée est le tassement engendré en surface. Selon Clough et O'Rourke (1990), la mesure de tassement d'une trentaine d'ouvrages à proximité des fouilles a montré que le tassement, exprimé en pourcentage de la hauteur  $H$  de la fouille, est en moyenne de 0.8% dans les argiles molles ou fermes, 0.3% dans les argiles raides ou consolidées, et 0.1% dans les sols sableux et/ou graveleux. Il est à préciser que le tassement maximum en surface était mesuré à une distance de la tête de fouille de 0.2 à 0.7 fois la hauteur  $H$ .

Enfin, ces auteurs ont constaté que l'influence de la proximité d'une fouille sur le tassement en surface est pratiquement négligeable pour une distance par rapport à la tête de la fouille entre 1.5 à 4 fois  $H$ .

Lors du dimensionnement d'une fouille blindée, on procède par l'évaluation des pressions du sol sur le soutènement, celle-ci étant très différente de celle en absence du blindage. En cas de projets importants, on a recours à un calcul selon la théorie aux modules de réaction ou à la méthode des éléments finis. Dans les projets courants, la pression du sol peut se déterminer d'une manière simple à travers les équations ci-après, donnant la résultante  $F$  du diagramme de pressions, et la figure IV.8:

### **Sable dense :**

Le diagramme de pressions est de forme trapézoïdale, contrairement au diagramme triangulaire en cas de soutènement sans blindage, la résultante des pressions est une charge répartie selon la longueur de la fouille, donnée par :

$F=0.65 K\gamma H^2$  et appliquée au milieu de la hauteur de fouille.

### **Sable lâche :**

Le diagramme de pressions est trapézoïdal, avec une résultante égale à :

$F=0.72 K\gamma H^2$  et appliquée à  $0.45H$  à partir du fond.

### **Sol purement cohérent :**

On utilise soit le diagramme de Peck (figure III.8-c) donnant directement la résultante :  $F=0.775H(\gamma H-4C_u)$ , appliquée à  $0.47H$  à partir du fond.

On peut aussi appliquer la méthode de la poussée au repos, due à Tchebotarioff, et basée sur un des diagrammes de pression de la figure III.8-d, en fonction de la compacité du sol argileux:

**Argile raide :**  $\gamma H/c_u < 4$

$p_1=0.3\gamma H$  et  $F_1=0.15\gamma H^2$  appliquée à  $0.47H$ .

**Argile plastique :**  $p_2=0.425\gamma H$  et  $F_2=0.21\gamma H^2$  appliquée à  $0.38H$ .

**Argile molle :**  $\gamma H/c_u > 4$

$p_3=0.50\gamma H$  et  $F_3=0.25\gamma H^2$  appliquée à  $0.33H$ .

Dans un sol purement cohérent, il est recommandé d'appliquer simultanément les deux méthodes et de retenir les efforts les plus défavorables [3], [5].

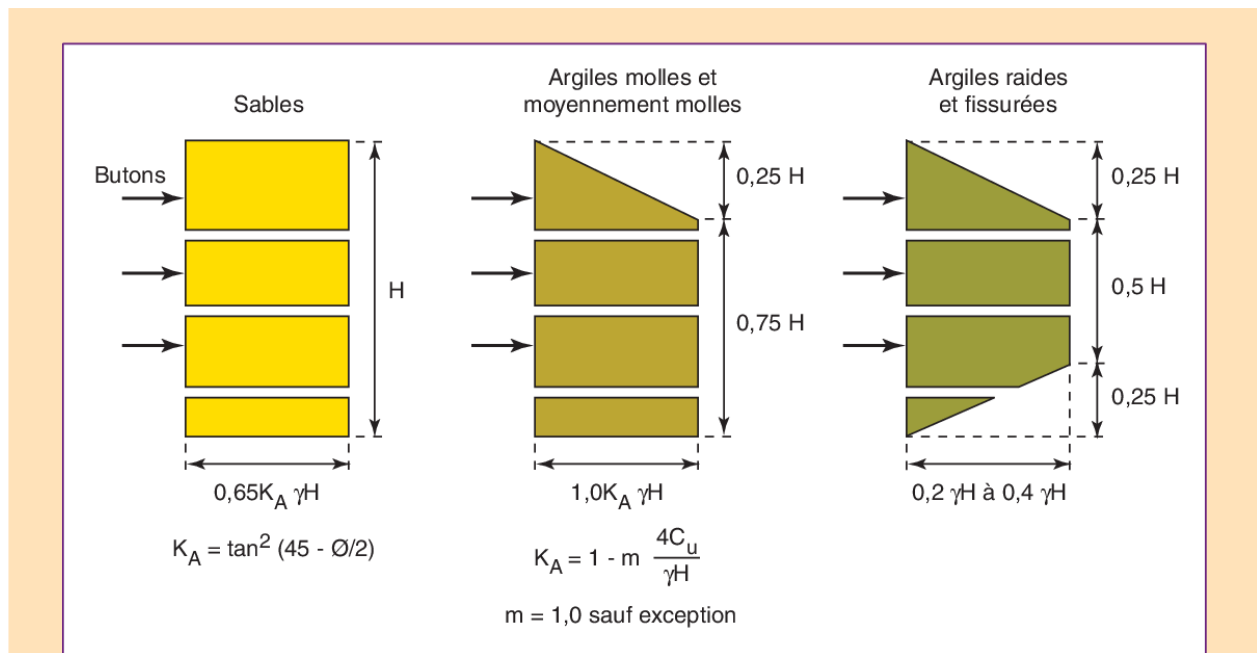
En cas d'un sol argileux hétérogène, composé de  $N$  couches, chaque couche  $k$  étant caractérisée par une cohésion  $C_u^k$ , un poids volumique  $\gamma_k$  et une épaisseur  $H_k$ ,



on détermine le diagramme de pressions avec les méthodes vues précédemment à partir d'un sol argileux homogène équivalent, caractérisé par :

- Un angle de frottement nul  $\phi_u=0$
- Une cohésion équivalente :  $C_u^{eq} = \frac{1}{H} \sum_{K=1}^{K=N} H_k C_u^k$
- Un poids volumique équivalent :  $\gamma^{eq} = \frac{1}{H} \sum_{K=1}^{K=N} \gamma^K H^k$

Une fois le diagramme des pressions du sol établi, on procède au dimensionnement du blindage (butons, étais, etc), par des considérations structurales.



**Figure III.9.** Diagrammes des pressions à considérer pour le dimensionnement des blindages des fouilles, d'après Terzaghi et Peck.

# **CHAPITRE IV**

## Etude paramétrique

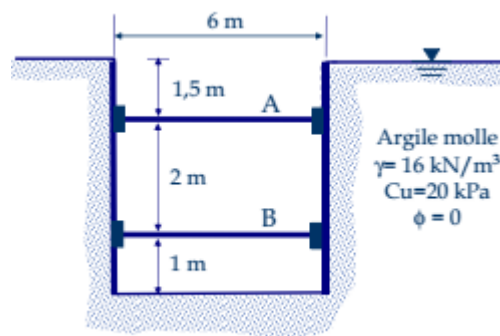
## Etude paramétrique

### Application 1

Une tranchée linéaire ( $L = 30$  m) est effectuée dans un dépôt d'argile molle comme illustré la figure ci-dessous :

- Les pressions appliquées ;
- Déterminer les forces appliquées aux niveaux A et B ;
- Déterminer la section de palplanche requise ;
- Déterminer le facteur de sécurité de fond la fouille contre le soulèvement ;

Les étrépillons sont placés à 3m centre en centre.



### **Solution .**

- Bien que la description de l'argile soit molle, on ne va pas utiliser le diagramme des argiles molles à fermes. Il faut vérifier d'abord le rapport  $\gamma H/c_u$ .

$$\gamma H/c_u = 16 * 4.5 / 20 = 3.6 < 4,$$

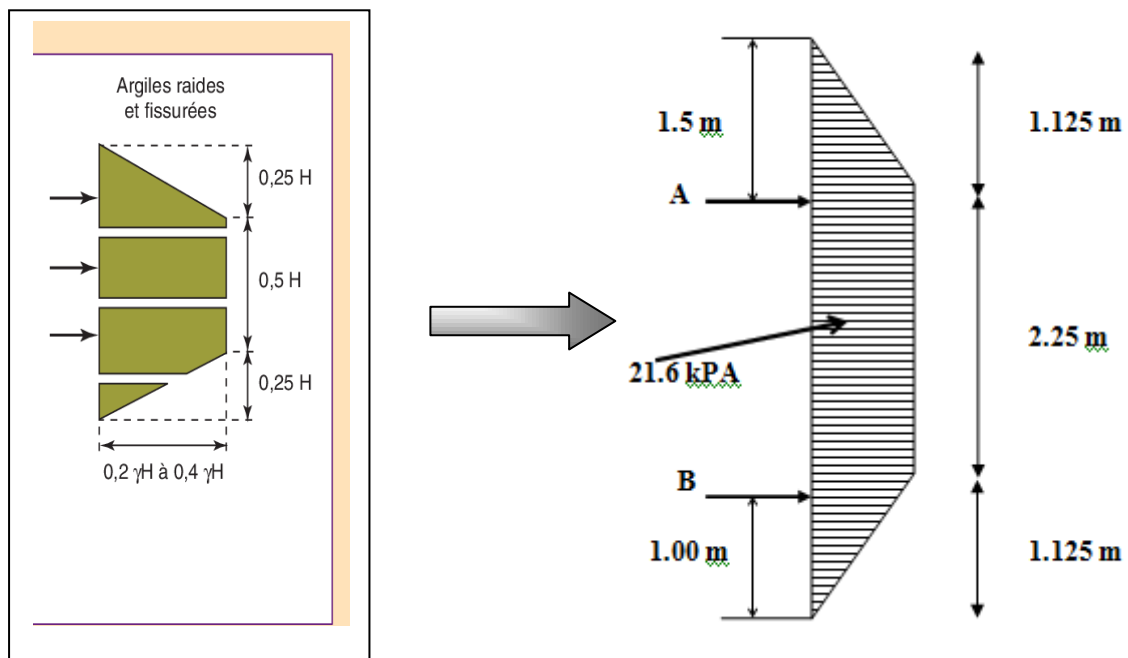
Donc on va utiliser le diagramme des argiles fissurées.

- Calcul en contrainte totale :

$$\text{À } z = 4,5 \text{ m; } \sigma = 16 * 4,5 = 72 \text{ kPa}$$

$$\sigma_a = 0,2 \text{ à } 0,4 \sigma; \text{ nous allons prendre } \sigma_a = 0,3 \sigma$$

$$\sigma_a = 0,3 * 72 = 21,6 \text{ kPa.}$$



b) Pour déterminer les forces agissant sur les éléments A, B on fait :

**Somme des forces = 0**

$$F_A + F_B - 2 * 1,125 * 21,6 - 2 * 1,125 * 21,6 / 2 = 0 \rightarrow F_A + F_B = 72,9$$

**Somme des moments = 0**

$$-(1,125 * 21,6 / 2) * (1,125 * 2 / 3) - 2,25 * 21,6 * 2,25 - (1,125 * 21,6 / 2) * (1,125 / 3 + 2,25 + 1,125) + 1,5 * F_A + 3,5 * F_B = 0$$

$$1,5 * F_A + 3,5 * F_B = 164 \text{ kN/m.lin}$$

et

$$F_A = 45,575 \text{ kN/m.linéaire.}$$

$$F_B = 27,325 \text{ kN/m.linéaire.}$$

Pour la longueur totale des étrépillons :

$$F_A = 3 * 45,575 = 136,725 \text{ kN} \quad \text{et} \quad F_B = 3 * 27,325 = 81,975 \text{ kN}$$

Donc :

$$F_A = 136,725 \text{ kN}$$

$$F_B = 81,975 \text{ kN}$$

c) Pour déterminer le moment maximum, il faut déterminer l'endroit où  $V = 0$

La figure suivante montre le diagramme des efforts tranchants

$$M_A = (1,125 \cdot 21,6/2) \cdot (1,125/3 + 0,375) + 0,375 \cdot 21,6 \cdot 0,375/2 = 10,63 \text{ kN.m/m.linéaire.}$$

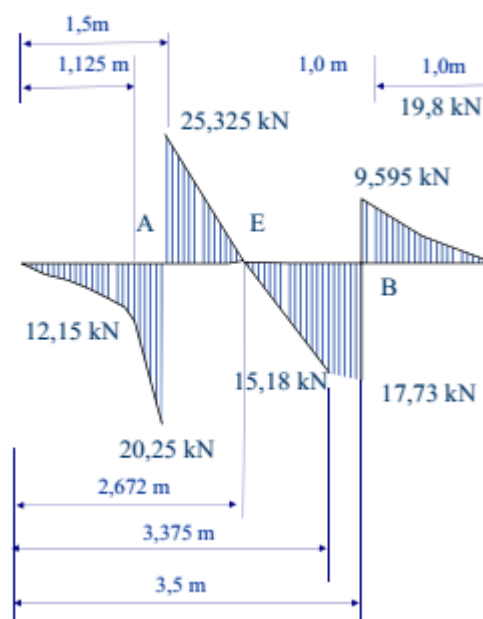
$$M_b = (1 \cdot 19,2/2) \cdot (1/3) = 3,2 \text{ kN.m/m.linéaire.}$$

$$M_E = (1,125 \cdot 21,6/2) \cdot (1,125/3 + 1,547) + 1,547 \cdot 21,6 \cdot 1,547/2 - 45,575 \cdot 1,172$$

$$M_E = -4,21 \text{ kN.m/m.linéaire.}$$

La section de la palplanche requise ;

$$S = M_{\max} / (0,67 \cdot f_y) = 10,63 \cdot 10^3 / (0,67 \cdot 265 \cdot 106) = 0,0000598 \text{ m}^3 = 59,8 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$



d) Le facteur de sécurité contre le soulèvement de fond :

$$F_{sb} = \frac{N_b c_u}{\sigma_{z=H}}$$

$$c_u = 20 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{z=4m} = 16 \cdot 4,5 = 72 \text{ kPa}$$

$$B/L = 6/30 = 0,2$$

$$\text{et } H/B = 4,5/6 = 0,75$$

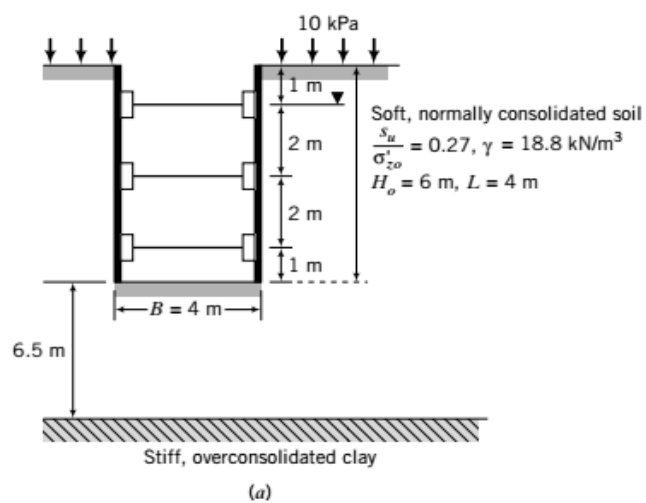
Donc : selon l'abaque ( Figure III.7) :  $N_b = 6,4$

$$F_{sb} = \frac{N_b c_u}{\sigma_{z=H}} = \frac{6,4 \cdot 20}{72} = 1,77$$

**Application 2.**

Soit l'excavation carrée située dans une argile molle normalement consolidée, comme illustré dans la Figure. Supposons que le niveau d'eau dans l'excavation sera maintenu à la même élévation que la nappe phréatique. Déterminez :

- Les pressions appliquées ;
- Déterminer les forces appliquées aux niveaux A , B et C ;

**Solution.**

Bien que la description de l'argile soit molle, on ne va pas utiliser le diagramme des argiles molles et moyennement molles.

$B=4\text{m}$  ,  $H_0=6\text{m}$  ,  $L=4\text{m}$  ;

➤  $H_0/B = 6/4=1.5$ ,

➤  $B/L=4/4=1$

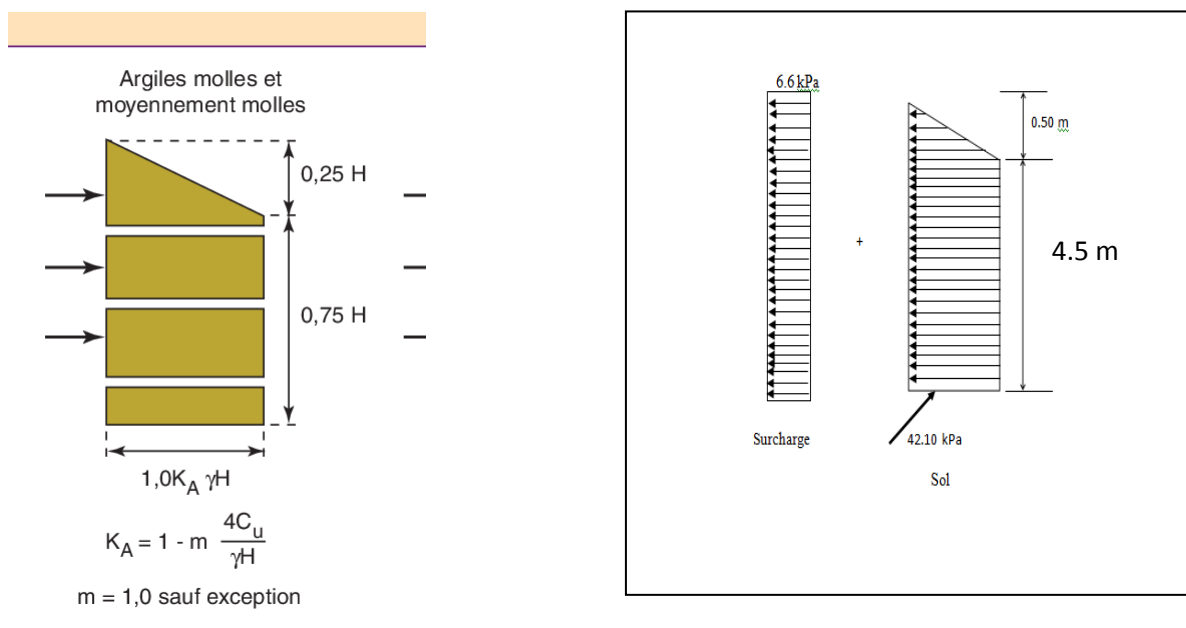
Épaisseur de la -couche inferieure,  $D_F=6.5\text{m}$ .

| Profondeur   | $\sigma_{z_0}$ (kpa) | U(kpa) | $\sigma'_{z_0}$ (kpa) | $C_u$ (kpa) |
|--|----------------------|--------|-----------------------|-------------|
| $\frac{H_0}{3} = \frac{6}{3} = 2m$   | 37.6                 | 9.8    | 27.8                  | 7.5         |
| Fond de l'excavation =6m   | 112.8                | 58.8   | 72.8                  | 19.7        |
| Tête de l'excavation =7m   | 101.6                | 49     | 63.8                  | 17.2        |
| Le centre de l'excavation ( la moyenne )<br>$\frac{7 + (7 + 2.83)}{2} = 8.42m$ | 158.3                | 72.7   | 85.6                  | 23.1        |

$$c_u = \frac{7.5+17.2}{2} = 12kpa \quad ; \quad (c_u)_b=23.1kpa$$

$$\gamma H_0 = 112.8kpa \quad , \quad \frac{\gamma H_0}{s_u} = \frac{112.8}{12} = 9.4 > 4;$$

Donc on va Utiliser la répartition des pressions latérale donnée dans figure :



$$\gamma H_0 + q_s = 112.8 + 10 = 122.8 kpa$$

Vérifier la stabilité des button :

$$\text{Pour : } \frac{H_0}{B} = 1.5 \text{ et } \frac{B}{L} = 1. \quad N_b = 8.2 \text{ (Figure III.7)}$$

$$F_s = \frac{N_c \cdot (s_u)_b}{\gamma H_0 + q_s} = \frac{8.2.23}{122.8} = 1.54 > 1.5 .$$

**Condition vérifiée**

**Diagramme de pression latérale.**

$$\frac{\gamma H_0 + q_s}{(s_u)_b} = 122.8/23 = 5.34 > 5.14$$

$$K_A = \left(1 - \frac{4c_u}{\gamma H_0 + q_s}\right) = \left(1 - \frac{4 \cdot 12}{122.8}\right) \quad \text{donc : } K_A = 0.66$$

Puisque les niveaux d'eau à l'extérieur et à l'intérieur de l'excavation sont égaux, nous utiliserons les contraintes effectives pour calculer la pression latérale.

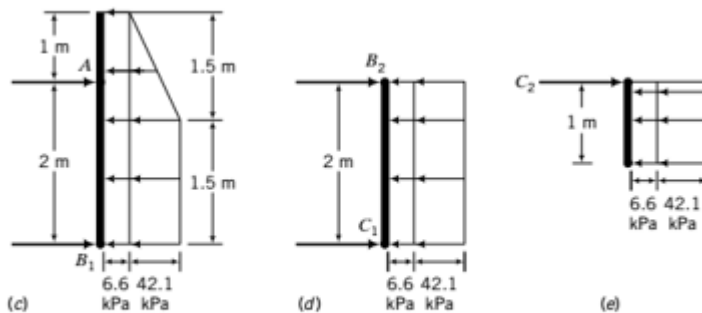
$$\gamma' = 18.8 - 9.8 = 9 \text{ N/m}^3$$

$$\text{Le sol : } K_A \gamma H_0 = K_A [\gamma \cdot 1 + \gamma' (6 - 1)] = 0.66 [1.88 \cdot 1 + 9 \cdot 5] = 42.1 \text{ Kpa}$$

$$\text{La surcharge : } K_A q_s = 0.66 \cdot 10 = 6.6 \text{ Kpa}$$

**Calcul des forces à chaque niveau (à chaque button) .**

Toutes les forces sont par m de longueur.



**FIGURE E15.8c, d, e**

**Niveau 1.** (Figure IV. c,d,e)

**La somme des moments :**

$$\sum M_{B1} = 2A - \left[ \left(6.6 \cdot 3 \cdot \frac{3}{2}\right) + 42.1 \cdot \frac{1.5}{2} \cdot \left(1.5 + \frac{1.5}{3}\right) + 42.1 \cdot 1.5 \cdot \frac{1.5}{2} \right] = 0$$

$$2 \cdot F_A = 140 \text{ KN/m}$$



$$F_A = 70 \text{ KN/m}$$

**La somme des forces :  $\sum F_x = 0$**

$$F_A + F_{B_1} = (6.6 * 3) + \left(42.1 * \frac{1.5}{2}\right) + (42.1 * 1.5)$$

$$B_1 = 114.5 - 70 = 44.5 \text{ KN/m}$$

**Niveau 2** (figure d)

$$B_2 = C_1 = (6.6 + 42.1) * \frac{2}{2} = 48.7 \text{ KN/m}$$

**Niveau 3** (figure e)

Supposons l'action en porte-à-faux.

$$C_2 = (6.6 + 42.1) * 1 = 48.7 \text{ KN/m}$$

**Calculer des forces dans les button ( $F_A$ ,  $F_B$ ,  $F_C$ ).**

$$F_A = 70 \text{ KN/m}$$

$$F_B = B_1 + B_2 = 44.5 + 48.7 = 93.2 \text{ KN/m}$$

$$F_C = C_1 + C_2 = 48.7 + 48.7 = 97.4 \text{ KN/m}$$

$$F_A = 70,00 \text{ kN}$$

$$F_B = 93,20 \text{ kN}$$

$$F_C = 97,40 \text{ kN}$$

# **CHAPITRE V**

**Modélisation des fouilles  
blindée avec le code PLAXIS**

## Modélisation des fouilles blindée avec le code PLAXIS

### V. 1. Introduction

La synthèse bibliographique a montré que de nombreuses approches peuvent être envisagées pour le calcul des fouilles blindée. Dans ce chapitre, on se propose modéliser une fouille blindée par éléments finis.

On présente tout d'abord le modèle de calcul adopté, en précisant les paramètres et les hypothèses de modélisation retenus. Ensuite, l'analyse des résultats permet de mieux comprendre le comportement mécanique de ce système et cerner dans le détail les interactions mises en jeu lors du chargement. La sensibilité des différents paramètres intervenant dans le dimensionnement est également étudiée.

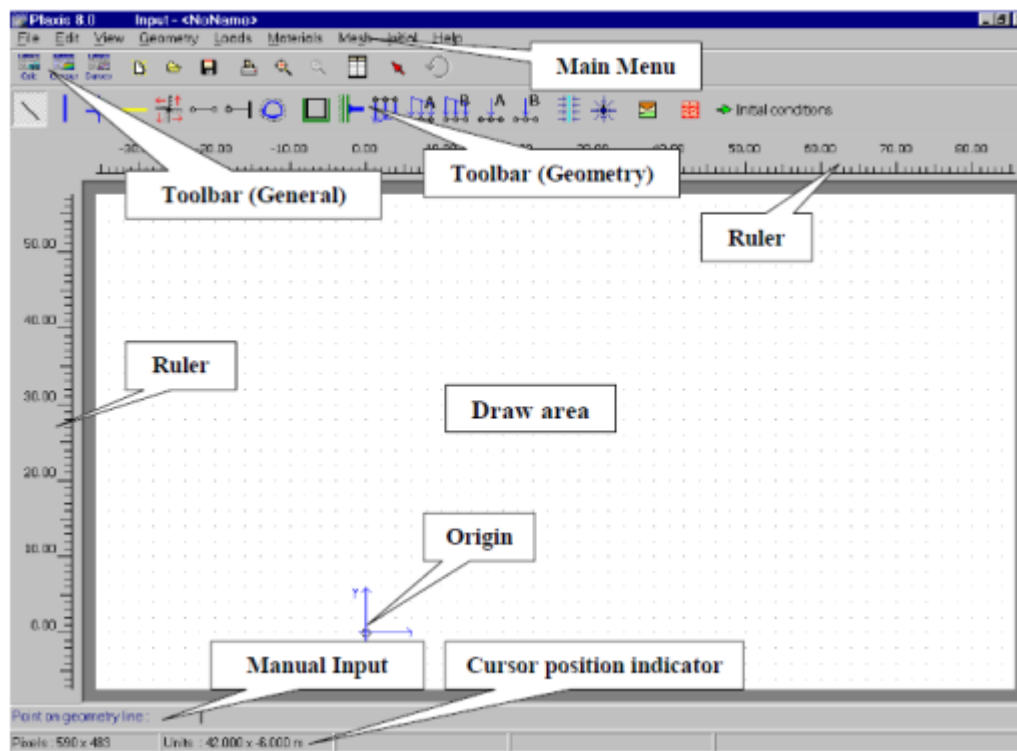
### V.2. Présentation du logiciel.

Ce code de calcul numérique est un programme d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçues 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. Il permet d'utiliser 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.

Le code PLAXIS 8.2 permet de déterminer les champs de déplacements aux différents nœuds de ce maillage ainsi que les contraintes et les états de rupture du sol. Son interface d'utilisation se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves).

#### V.2.1. Programme d'entrée des données (input).

Pour réaliser une analyse par la méthode des éléments finis avec le code PLAXIS 8.2, l'utilisateur devra créer un modèle numérique et spécifier les propriétés des matériaux et les conditions aux limites. Ceci se fait à l'aide du programme d'entrée des données (Input). La génération du maillage ainsi que les conditions initiales est faite dans un menu spécifique du programme input (Figure IV.1).



**Figure IV.1.** Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (Mode de création géométrique).

L'utilisateur doit créer un modèle géométrique à deux dimensions composées de points, de lignes et d'autres composants. La génération d'un maillage approprié, des propriétés et des conditions aux limites élément par élément est réalisée automatiquement par le générateur de maillage de PLAXIS à partir du modèle géométrique précédemment entré.

L'utilisateur peut aussi retoucher le maillage d'éléments finis pour améliorer ses performances. La dernière partie de l'entrée des données comprend la génération des pressions interstitielles et des contraintes effectives initiales pour définir l'état initial.

### V.2.2. Programme des résultats.

Les principaux résultats d'un calcul en éléments finis avec le code PLAXIS 8.2 sont les déplacements aux nœuds et les contraintes en leurs points correspondants. De plus, lorsqu'un modèle d'éléments finis inclut des éléments de structure, des efforts sont calculés dans ces éléments. Une vaste gamme d'outils est offerte par PLAXIS pour afficher les résultats d'une analyse aux éléments finis.

### V.2.3. Modélisation de la fouille blindée.

L'analyse de la fouille blindée de notre étude est réalisée dans le cadre des déformations planes. Les calculs se font en contraintes totales et à court terme, c'est-à-dire avec les paramètres de cisaillement totaux du sol (cohésion  $c_{uu}$  et angle de frottement interne  $\Phi_{uu}$ ) et sans drainage. Le maillage se compose d'éléments triangulaires.

Les conditions aux limites consistent à imposer, le long des frontières latérales du modèle et sur sa base les conditions suivantes :

- Déplacements horizontaux sur les bords latéraux nuls.
- Déplacements sur la base inférieure du modèle nuls.
- Les actions considérées sont le poids du massif.

### V.2.3.1. Géométrie du modèle numérique ( modèle 1).

Le problème est symétrique (modèle axisymétrique), il sera modélisé par un modèle géométrique plan (2D) de 6 m de large sur 6 m de profondeur, il est défini comme suit : l'excavation est 6m de profondeur et 6 m de largeur. deux parois de palplanches de sont maintenues en tête par une série de butons ( voir figure IV.2). Du fait de la symétrie du problème, on ne modélise qu'une demi-fouille.

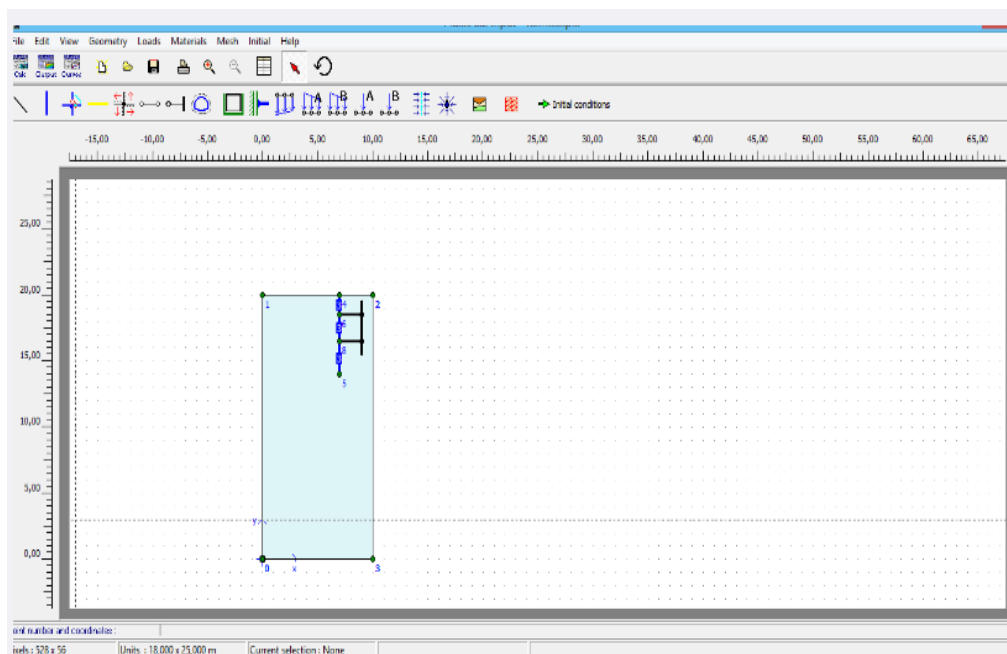


Figure IV.2. Géométrie du modèle.

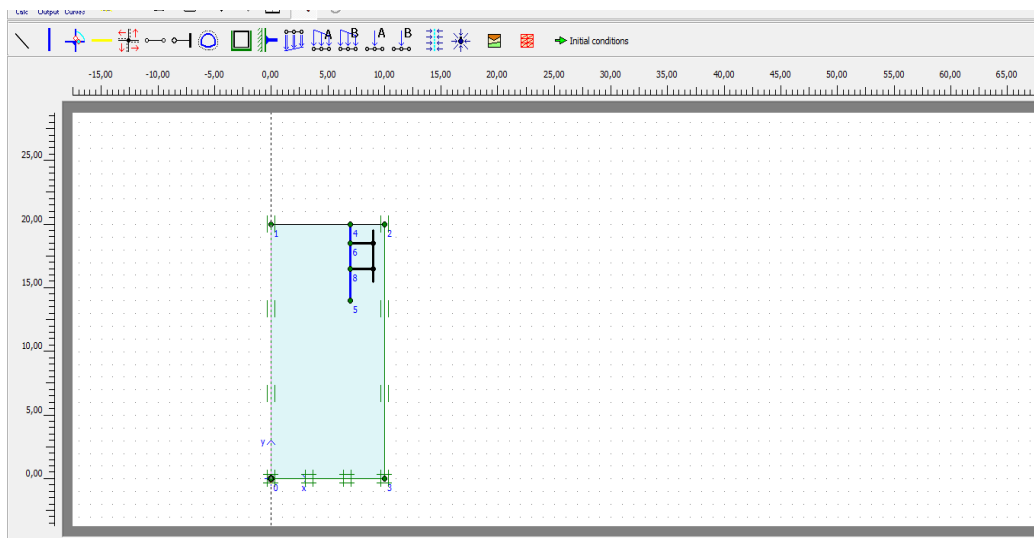
Le modèle proposé présenté en axisymétrie est considéré comme représentatif d'une colonne isolée ou d'une cellule élémentaire. Il est constitué d'éléments triangulaires à 15 nœuds.

### V.2.3.2. Hypothèse de calcul et condition aux limites.

Les hypothèses suivantes sont nécessaires pour une réalisation par éléments finis :

- Aucun glissement ne se produit à l'interface sol-paroi ;
- La paroi est assimilée à un matériau granulaire et une loi de comportement élastique par suivant la loi de comportement Mohr-Coulomb .

➤ Le sol est considéré comme un matériau cohérent et représenté par une loi de comportement élastoplastique (Mohr-Coulomb).



**Figure IV.3.** Définition de la géométrie avec les conditions aux limites.

### V.3. Caractéristiques des matériaux utilisés.

#### V.3.1. Propriétés de la couche d'argile molle.

| Paramètres                         | Nom                     | Argile molle | Unités             |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|--------------------|
| Modèle type                        | Model                   | Mohr-Coulomb | -                  |
| Type de comportement               | Type                    | Drained      | -                  |
| Poids volumique saturé             | $\gamma_{\text{sat}}$   | 18           | kN /m <sup>3</sup> |
| Poids volumique un saturé          | $\gamma_{\text{unsat}}$ | 16           | kN /m <sup>3</sup> |
| Perméabilité horizontale           | $K_x$                   | 0.001        | m/day              |
| Perméabilité verticale             | $K_y$                   | 0.001        | m/day              |
| Module d'Young                     | $E_{\text{ref}}$        | 10000        | kN/m <sup>2</sup>  |
| Coefficient de poisson             | $\nu$                   | 0,35         |                    |
| Cohésion                           | $C_{\text{réf}}$        | 20           | kN/m <sup>2</sup>  |
| Angle de frottement                | $\varphi$               | 0            | °                  |
| Angle de dilatation                | $\Psi$                  | 0°           | °                  |
| Facteur de rigidité de l'interface | $R_{\text{inter}}$      | 0,5          | -                  |

**Tableau IV.1.** Propriétés de la couche d'argile molle.

### V.3.2. Propriétés de la paroi.

Pour la paroi, on saisi les propriétés résumées dans le Tableau IV.2. en choisissant les matériaux de type poutre ( plate).

| paramètres             | Nom           | Valeur           | Unités             |
|------------------------|---------------|------------------|--------------------|
| Type de comportement   | Material type | elastic          | -                  |
| Rigidité normale       | EA            | $7.5 \cdot 10^6$ | kN /m <sup>3</sup> |
| Rigidité de flexion    | EI            | $1.0 \cdot 10^6$ | kN/m <sup>2</sup>  |
| Coefficient de poisson | v             | 0,00             |                    |
| Poids                  | w             | 10.0             | kN/m/m             |
| Epaisseur équivalente  | d             | 1.265            | m                  |

**Tableau IV.2.** Propriétés de la paroi.

### V.3.3. Propriétés des butons.

enfin, il est nécessaire de définir l'ancrage ( Strut) par ses propriétés de raideur.

| paramètres   | Nom              | Valeur            | Unités             |
|--|------------------|-------------------|--------------------|
| Type de comportement                                     | Material type    | elastic           | -                  |
| Rigidité normale   | EA               | $2 \cdot 10^6$    | kN /m <sup>3</sup> |
| Espacement dans la direction perpendiculaire à la figure | L <sub>S</sub>   | 2                 | m                  |
| Effort maximal   | F <sub>max</sub> | $1 \cdot 10^{15}$ | kN                 |

**Tableau V.3.** Propriétés de l'ancrage ( butons) .

### V.4. Génération des maillages.

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),

Le modèle de référence se fait par des éléments à 15 nœuds, il est préférable de choisir la finesse globale (Global coarsness) sur < coarse> comme indiquée dans la figure IV.4.

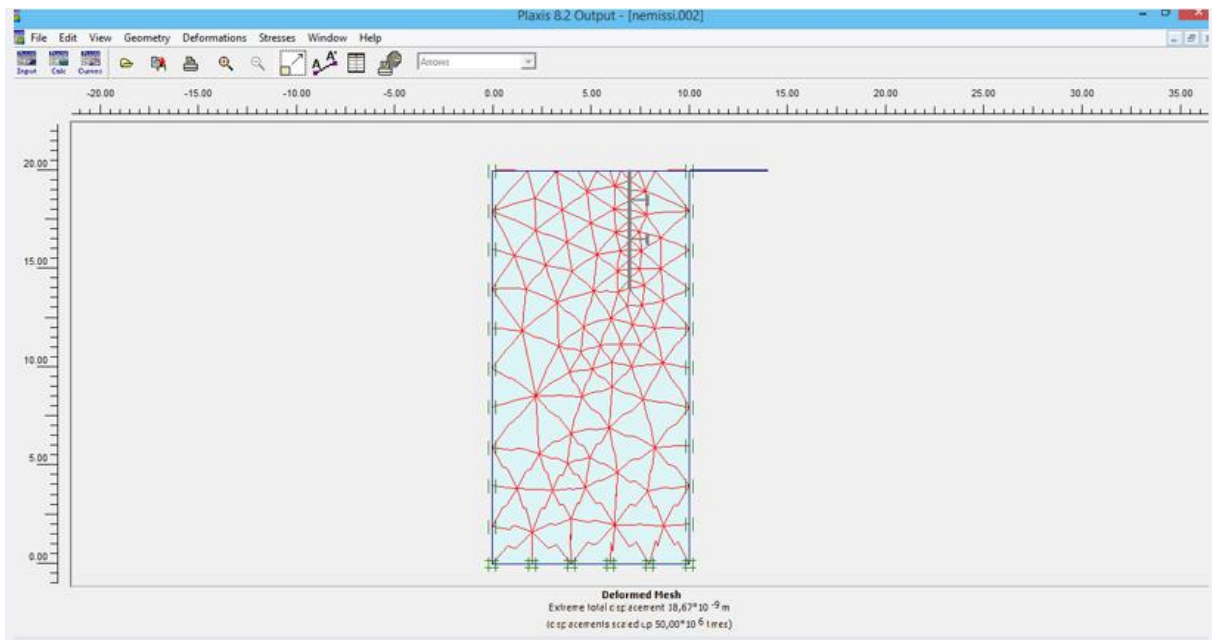


Figure IV.4. Génération de maillage du modèle géométrique.

**V.5. Conditions initiales.**

Les conditions initiales nécessitent là aussi la génération des pressions interstitielles initiale ainsi que des contraintes initiales. Les pressions interstitielles peuvent être générées par une nappe statique. Donc dans cette étape consiste à générer les contraintes initiales l'intérieur du massif (poids propre et sous pression).

On génère les contraintes initiales, Plaxis propose une valeur de  $K_0$  par défaut basée sur la formule de Jacky  $K_0 = 1 - \sin\phi$ .

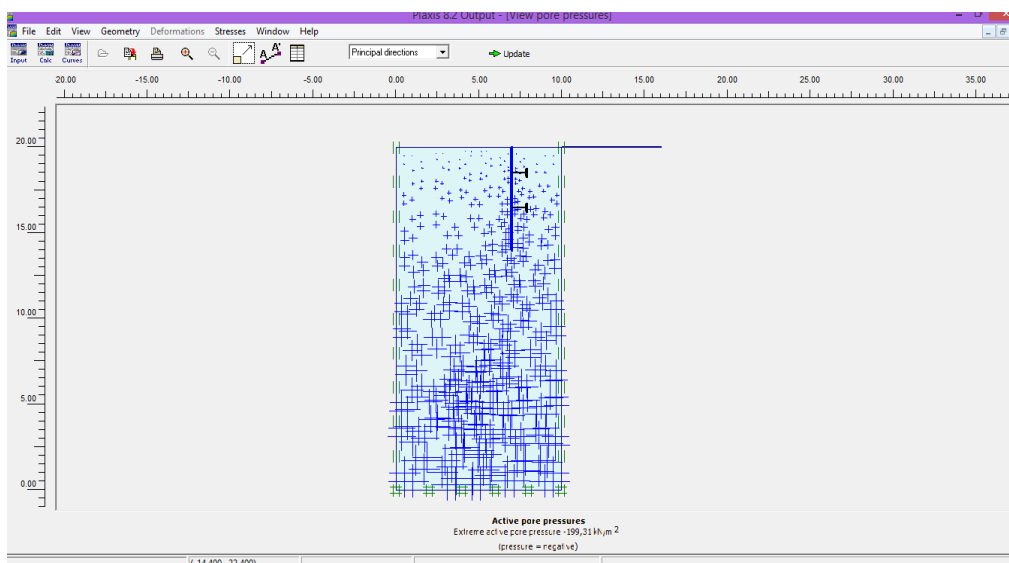


Figure IV.5. Pression interstitielle.



### V.6. Phase de calcul.

Après avoir effectué l'ensemble des paramétrages, on peut accéder aux calculs par le bouton poussoir "calculations". L'interface "input" de « Plaxis » se ferme et laisse la place à une nouvelle interface: "calculations". 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 figure IV.6 .

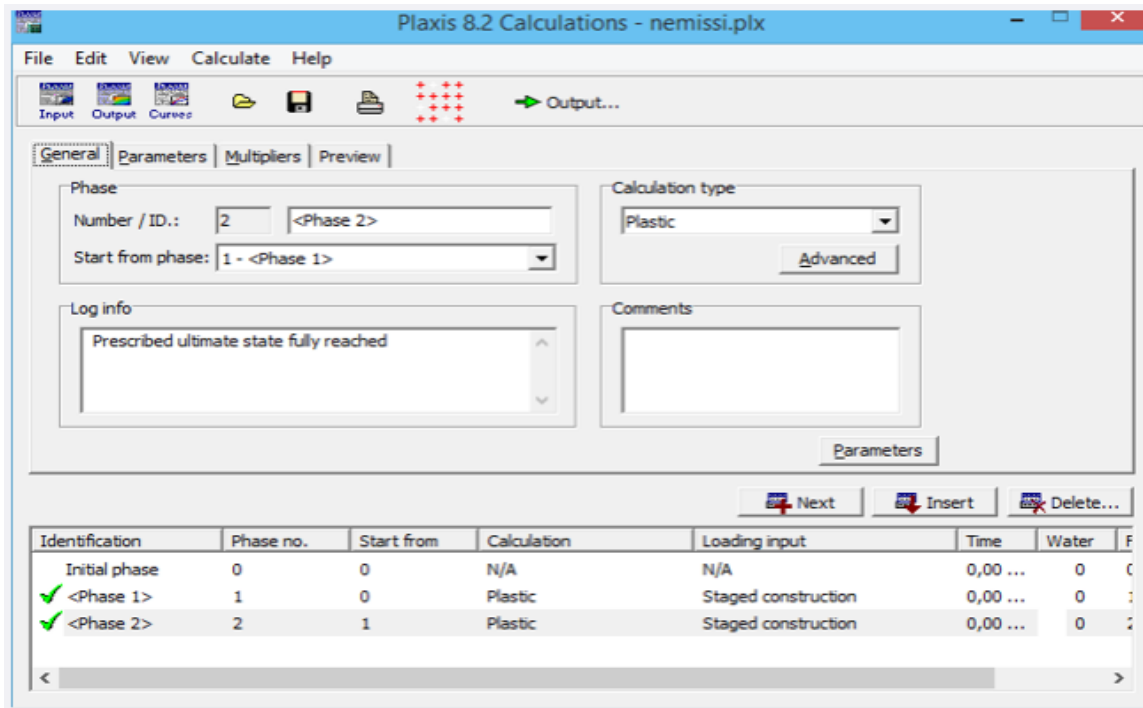
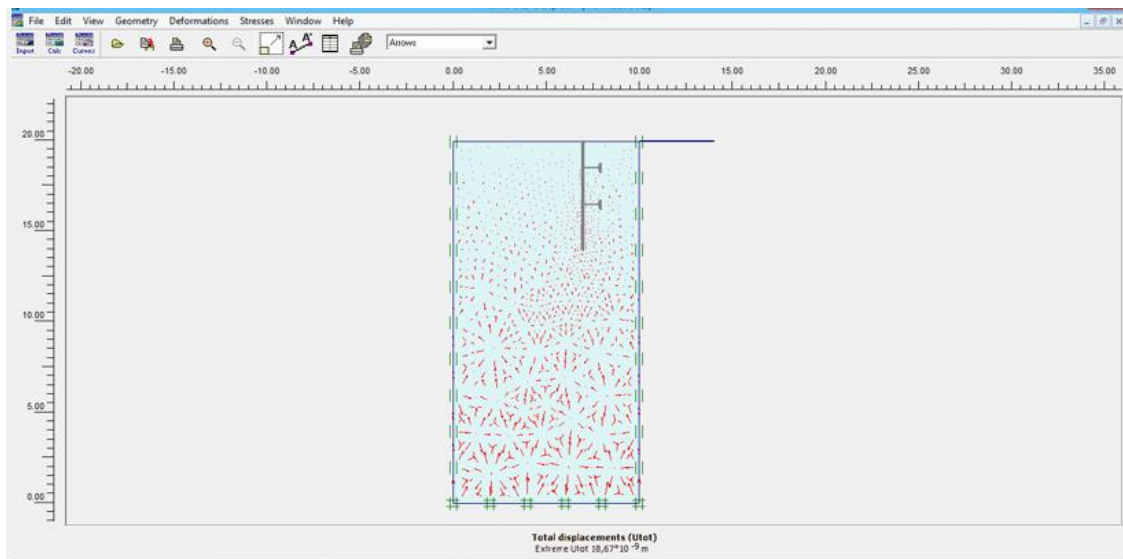


Figure IV.6. Fenêtre principale du programme de calcul.

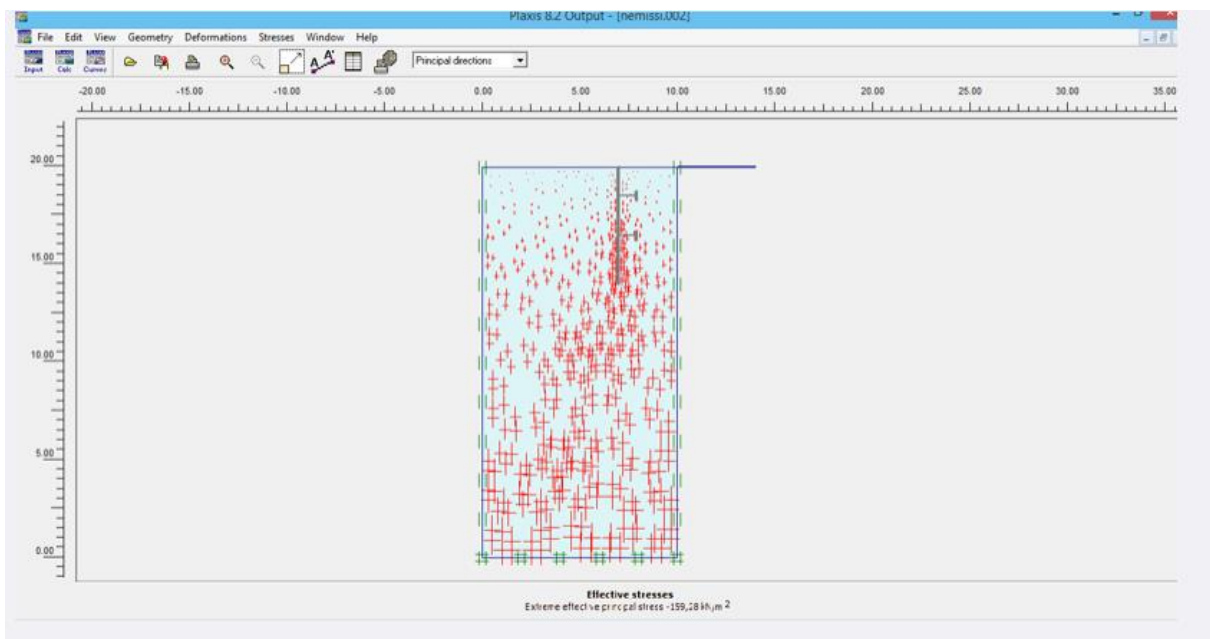
### V.7. Les résultats obtenus.

On s'intéresse aux résultats qui peuvent être tirés de cette modélisation qui sont : les déplacements verticaux, le déplacement horizontal, la contrainte verticale et les forces axiale dans chaque bouton ainsi le moment fléchissant dans la paroi .



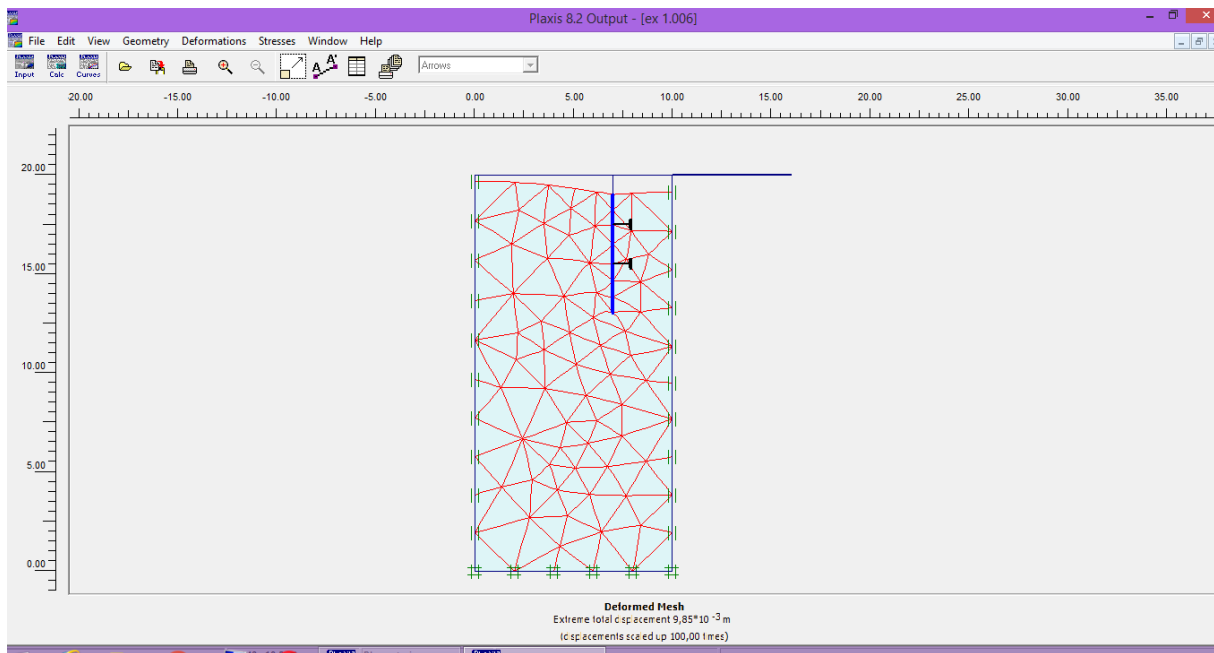
**Figure IV.7.** Déplacement total.

Un déplacement total de  $18.67 \cdot 10^{-9}$  m de la paroi .



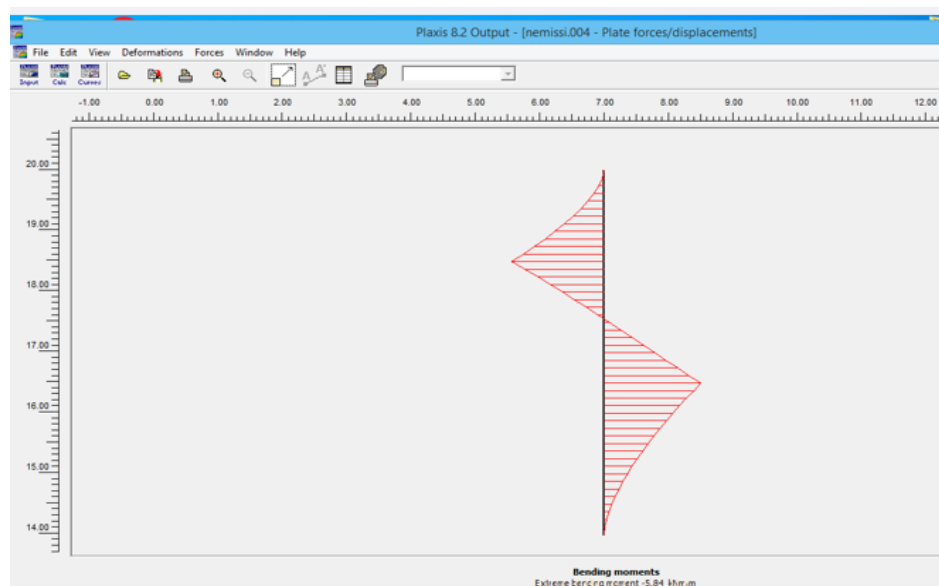
**Figure IV.8.** Les directions principales des contraintes.

On peut visualiser le maillage déformé à la fin de la seconde phase de calcul ( voir figure IV.8) car c'est celle-ci qui était sélectionnée dans le programme calculations.



**Figure IV.9.** Maillage déformé à la fin d'excavation.

En fin, après l'exécution de toutes les phases, on peut tirer la valeur du moment de flexion maximal qui est utilisé pour dimensionner la paroi.



**Figure IV.10.** Moment fléchissant dans la paroi.

De la même façon on peut tirer les forces axiales dans chaque buton :

$$F_A = 112,74 \text{ kN}$$

$$F_B = 76,956 \text{ kN}$$

**Conclusion :**

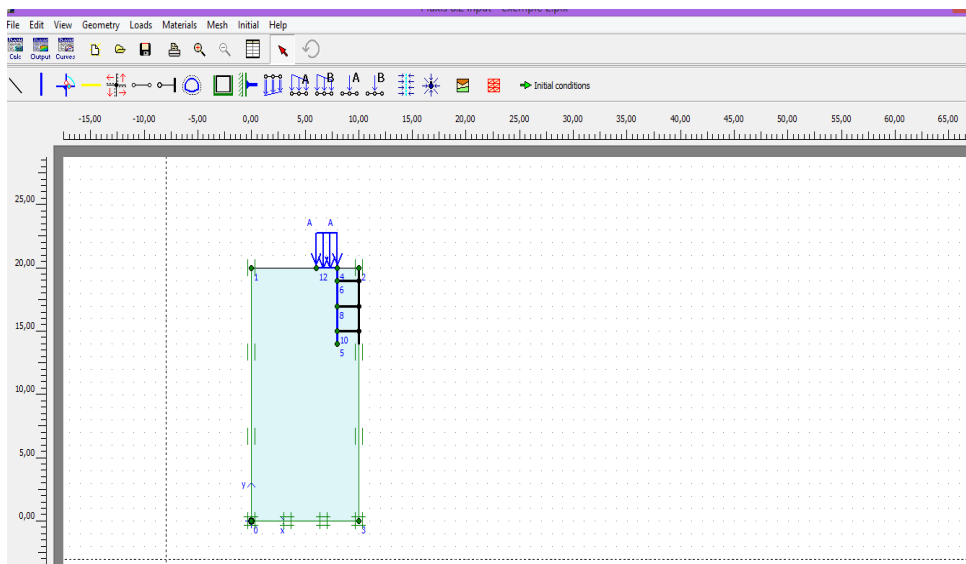
Les valeurs des forces dans chaque butons sont très proches avec celles trouver dans le calcul manuelle.

Cet exemple permet de montrer l'utilisation du phasage de travaux. Toute simulation doit suivre, au mieux, la réalité du processus de chargement réel : c'est une des première règles à respecter.

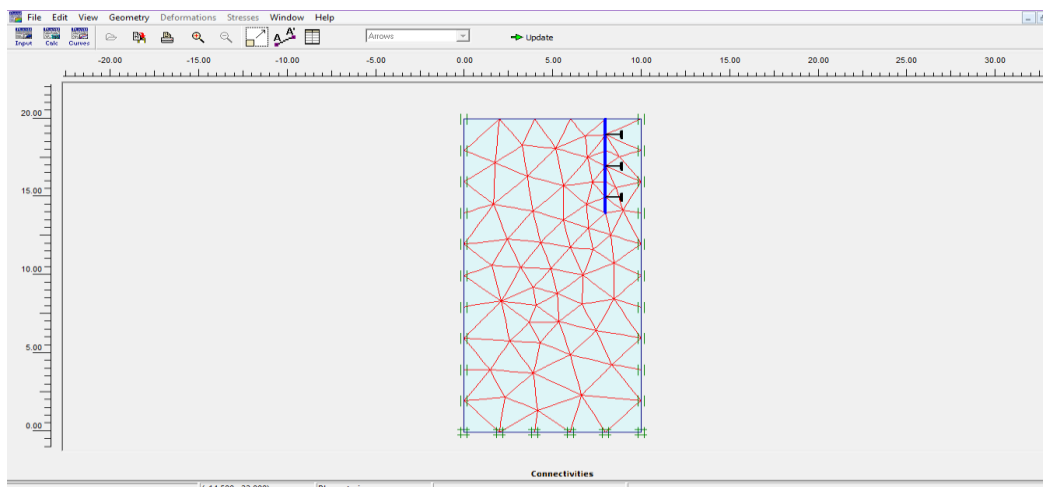
Mais cet exemple permet aussi de montrer le coté irréaliste du modèle de Mohr-Coulomb en décharge.

**V.8. Modèle 2**

En applique les mêmes principes pour modéliser le deuxième modèle.



**Figure IV.11.** Définition de la géométrie avec les conditions aux limites.



**Figure IV.12.** Génération de maillage du modèle géométrique.

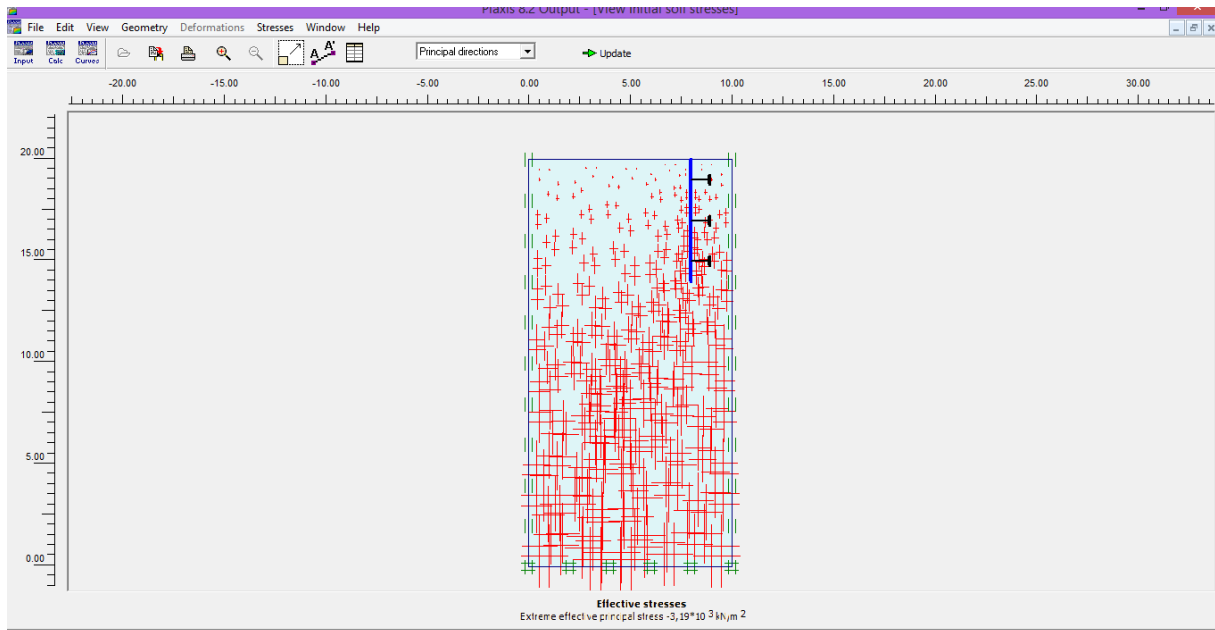


Figure IV.13. Maillage déformé à la fin d'excavation.

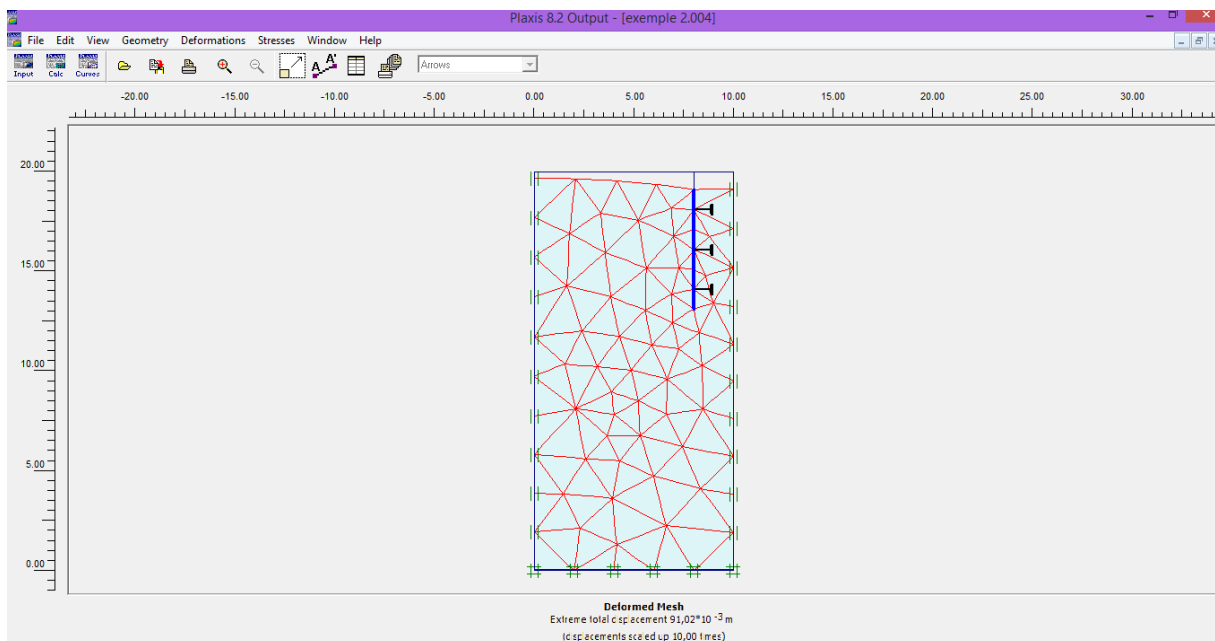


Figure IV.14. Maillage déformé à la fin d'excavation.

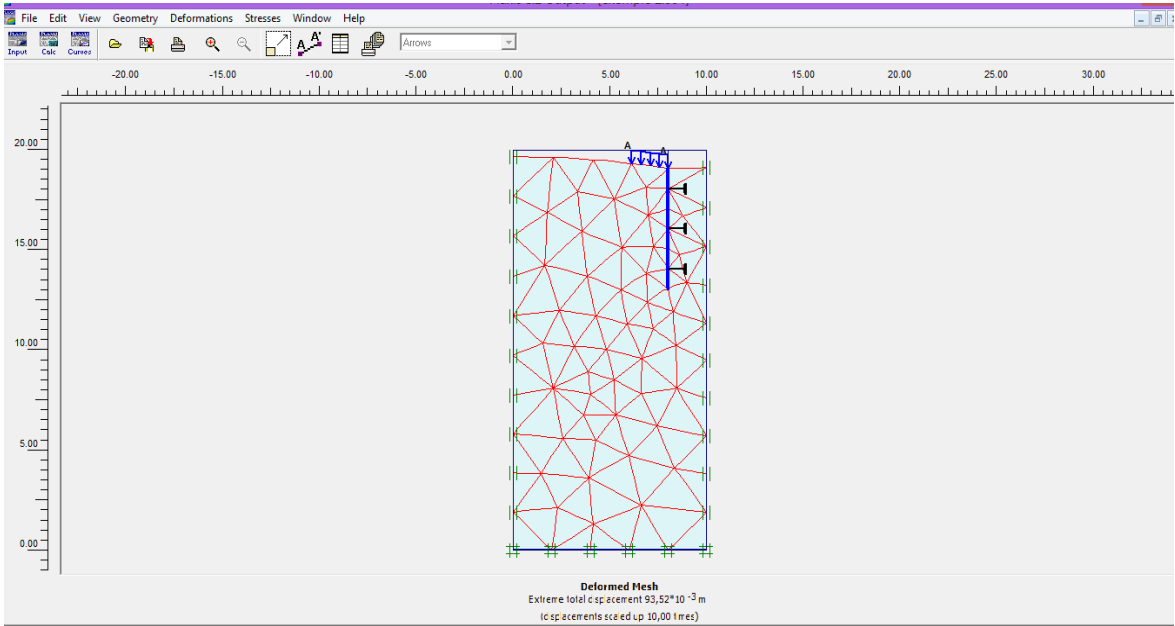


Figure IV.15. Maillage déformé à la fin d’excavation.

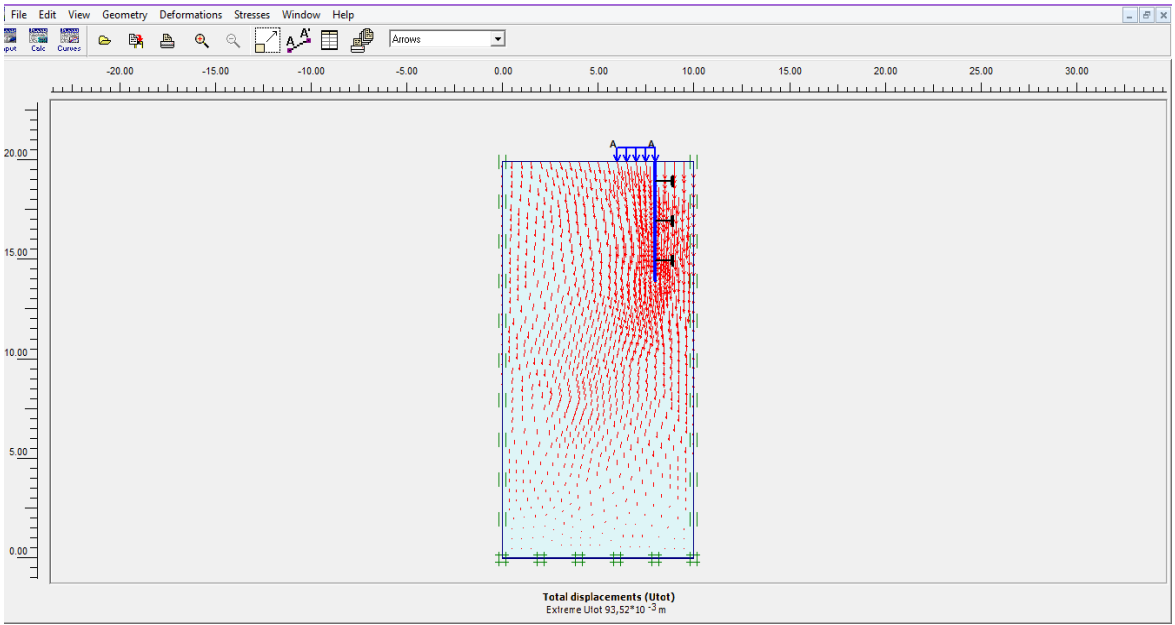
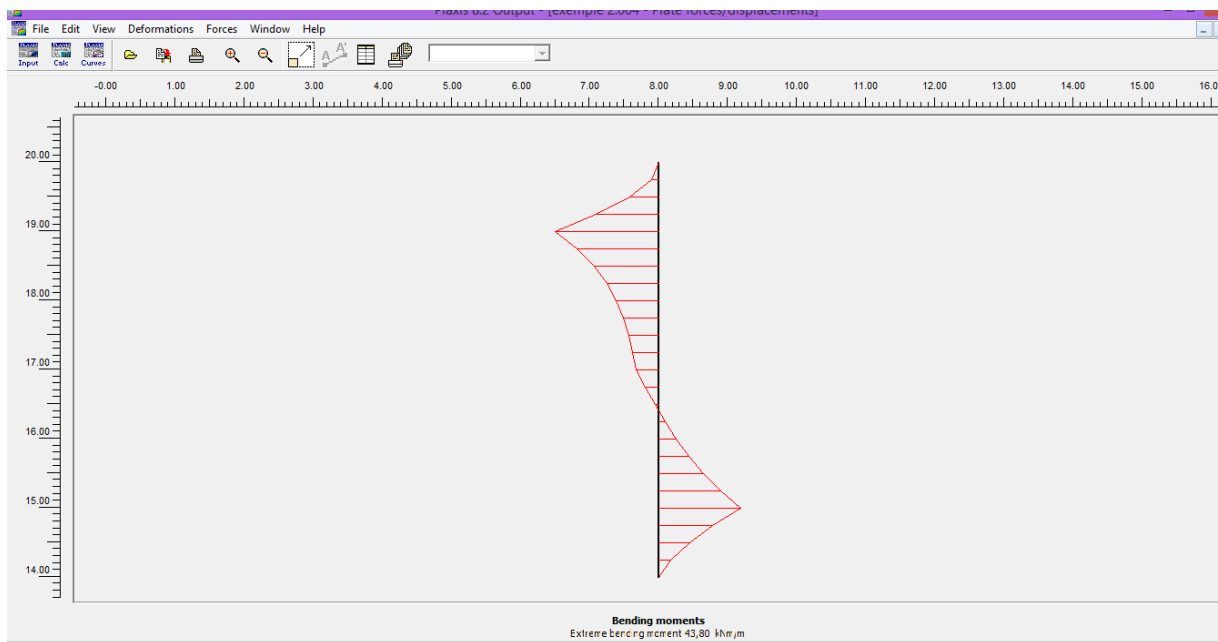


Figure IV.16. Les directions principales des contraintes.



**Figure IV.17.** Moment fléchissant dans la paroi.

### Conclusion générale :

Notre objectif c'est de modéliser un cas simple d'excavation (fouille) avec simulation d'une tranchée dont les parois sont soutenues par des butons.

La modélisation des fouilles blindées dans Plaxis 8.2 est un outil robuste, qui explique ou de prédire le comportement d'une fouille blindée à savoir les diagrammes des contraintes, les déplacements, les forces axiales ainsi que les moments fléchissants.

### *Conclusions*

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la recherche pour l'obtention d'un master génie civil, spécialité Géotechnique, et qui traite un problème très important dans le domaine de Génie civil et précisément le domaine de la géotechnique et qui est l'étude de stabilisation des fouilles par plusieurs techniques de blindages.

L'étude porte tout d'abord sur les différentes méthodes de soutènement employées habituellement sur les chantiers de construction.

Ensuite, une fois ce travail de recherche effectué, la suite de l'étude consiste à le mettre en application des exemples de calculs

Selon le travail présenté dans ce mémoire, nous pouvons dresser un bilan des points que nous avons établis et qui nous paraissent importants.

1. Sauf dans les terrains ne possédant aucune cohésion, la plupart des tranchées peuvent être creusées à la pelle hydraulique et leurs parois restent stables, mais pendant une durée malheureusement impossible à déterminer. C'est pourquoi il est impératif de les blinder pour protéger les travailleurs contre les risques d'éboulement.
2. Le blindage permet de sécuriser un espace excavé contre un éboulement de l'environnement immédiat soit par glissement de terrain, par rupture de talus ou par infiltration d'eau. Il permet aussi de protéger des passages, des espaces de travail pour les hommes et les machines situés dans la fouille. Il n'est en effet pas inhabituel de constater la rupture d'un talus d'une fouille menaçant la sécurité en fond de fouille (risque d'ensevelissement).
3. La réalisation des blindages nécessaires fait partie des règlements relatifs aux conditions de travail et à la sécurité au travail et est encadrée par des normes.
4. La réalisation des ouvrages de soutènement, qui relève d'un domaine bien particulier de la construction, à savoir la géotechnique, nécessite donc une profonde attention et des compétences spécifiques en la matière.
5. Il existe une multitude de méthodes différentes pour mettre en œuvre une paroi de soutènement, chacune disposant de ses avantages et de ses inconvénients, le panel de solutions de soutènement existantes étant suffisamment large pour que chaque projet trouve la solution qui lui est adéquate
6. Le choix d'une méthode de soutènement dépend d'un certain nombre de paramètres liés



## Conclusions

---

aux conditions géotechniques du sol en place ainsi qu'au contexte environnant, sans bien sûr négliger l'influence de l'aspect financier. En milieu urbain, la situation d'un projet et son interaction avec ses alentours impose des contraintes plus nombreuses et plus importantes.

7. La modélisation en géotechnique ayant un objectif qui est souvent la recherche d'une réponse, d'une solution à un problème particulier ou complexe. La modélisation numérique est un outil robuste, elle est en amélioration depuis les années soixante dix. Aujourd'hui, la modélisation intervient dans tous les domaines sans exception. Les méthodes de calcul numériques en géotechnique ont pour but de décrire, d'expliquer ou de prédire le comportement d'une structure soit naturelle ou artificielle. La géotechnique utilise une série de méthodes numériques, diverses et variées qui s'adaptent aux caractères particuliers des terrains (sol et roche).

## Références Bibliographiques

- [1] Ali Bouafia : Calcul pratique des fondations et des soutènements, 2<sup>P</sup>ème Pédition revue et corrigée, Office des Publication Universitaire, 02-2009
- [2] Ali Bouafia : Génie Civil Conception et calcul des ouvrages géotechniques « Cours et Applications », Office des Publication Universitaire, 2009 ;
- [3] Costet, J. & Sanglerat, G. : Cours pratique de mécanique des sols, Tome 2. Dunod, Paris. 1969.
- [4] Mécanique des sols. C308-1. Traité construction et lexique. Volume C2-1996.
- [5] Maghmouli Amel: détermination des pressions des terres sur les écrans plans de soutènement avec et sans ancrages. Mémoire de Magister, Université 08 Mai 1945, Guelma , Alger , 2013.
- [6] Philipponnat, G. & Hubert, B. : Fondations et ouvrages en terre. Eyrolles 2002.
- [7] Zerguine salah : Estimation des pressions actives les murs de soutènement en présence d'eau sous sollicitation sismique, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, Alger, Novembre 2013.
- [8] Zeroual Farida, Etude du comortement d'un mur de soutènement soumis à des sollicitations dynamiques, Mémoire de Magister, université Hadj Lakhdar –Batna, Alger.

## Netographique

- [9] [http:// www.oppbtp.fr](http://www.oppbtp.fr)
- [10] [http:// www.sbh-shoring.com](http://www.sbh-shoring.com)
- [11] [http:// www.inrs.fr/accueil/secteurs/environnement/depollution.html](http://www.inrs.fr/accueil/secteurs/environnement/depollution.html)
- [12] [http:// excavationservices.wordpress.com/2012/02/09/different-excavation-techniques-used-forconstruction/](http://excavationservices.wordpress.com/2012/02/09/different-excavation-techniques-used-forconstruction/)
- [14] <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/fliers/>
- [15] <http://www.plaxis.nl>
- [16] <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/1544>
- [17] <https://docplayer.fr/63954593-Annexes-etude-des-differents-types-de-blindage-de-fouille-rencontres-sur-les-projets-de-construction-au-luxembourg.html>