

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département : de Génie civil et hydraulique

Réf :...../2018

جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم : الهندسة المدنية و الري

المرجع : ..... / 2018

المرجع : ..... / 2018



**Mémoire de master**

**2ème année**

**Spécialité : génie civil**

**OPTION : VOIES ET OUVRAGES D'ARTS**

**MODELISATION NUMERIQUE D'UNE  
EXCAVATION PROFONDE SUBMERGEE**

**Etudiant :**

Ben Riala Sadam

**Encadreur :**

Dr. Houhou M Nabil

**Promotion Juin 2018**

## **Remerciements**

Je remercie en premier lieu ALLAH qui m'a donné le courage et la volonté de suivre la mémoire. Avant d'entrer dans le cœur du sujet

Je tiens à remercier le directeur de ce mémoire Dr. Houhou Nabil, qui a grandement apprécié son style de travail, la liberté qu'il m'a laissée en organisant et en encourageant cette recherche. Je voudrais également remercier les membres du jury qui ont accepté de revoir ce résumé.

Je voudrais dire merci beaucoup à tous ceux qui sont présents avec moi aujourd'hui

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour son soutien continu et ses encouragements, ainsi que tous ceux qui ont contribué à ce travail.

## Résumé

Les projets d'infrastructures comptent parmi les projets les plus importants pour l'État et coûtent un budget important et les projets d'infrastructure nécessitent des travaux d'excavation complexes, notamment dans les zones urbaines où l'excavation est très proche des bâtiments. Par conséquent, les effets d'excavation devraient être réduits en utilisant les murs de soutènement, les parois moulées

Cette thèse examine la modélisation numérique d'une excavation profonde réalisée à l'abri de parois moulées supportées par plusieurs lits de butons.

L'analyse s'intéresse à un calcul en déformation plan avec PLAXIS 2D.

Le but de la note est d'étudier l'impact du processus de l'excavation profonde sur les murs du bâtiment et sur les bâtiments voisins et sur le sol en particulier.

Nous effectuons plusieurs études avec un changement à la fois dans certaines propriétés pour montrer dans quelle mesure ces caractéristiques affectent le déplacement horizontal du mur et du sol à proximité du mur de soutènement et les tassements de sol.

**Mots clés:** excavation ,modélisation numérique , paroi moulée , plaxis 2D, butons

## ملخص

تعتبر المشاريع التحتية من أهم المشاريع التي تلقى أهمية من الدولة وتكلفتها ميزانية كبيرة و مشاريع المنشآت التحتية تتطلب أشغال حفر معقدة خاصة في المناطق العمرانية التي تكون فيها الحفر قريبة جدا من البنايات . لذلك يجب الحد من التأثيرات لنتيجة عن الحفر باستخدام جدران الاستناد.

نتناول في هذه الأطروحة نمذجة رقمية لحفر عميق ومغمور محمي بجدار استناد مدعم .

تكون هذه النمذجة الرقمية باستعمال برنامج بلاكسيس ثنائي البعد.

الهدف من المذكرة هو دراسة مدى تأثير عملية الحفر العميقة على جدران الاستناد وعلى البنايات المجاورة وعلى التربة خصوصا.

نقوم بعدة دراسات مع تغيير في كل مرة في بعض الخصائص لنبين مدى تأثير هذه الخصائص على الانتقال الأفقي للجدار والتربة إلى جانب جدار الاستناد.

**الكلمات المفتاحية:** الحفر ، النمذجة العددية ، حجاب الحاجز ، جدار مصبوب ، بلاكسيس ثنائي البعد، الدعامات.

## **Introduction générale**

Les ouvrages des soutènements sont des ouvrages courants de génie civil. Ils sont construits en nombre pour des usages aussi variés que le blindage de fouille pour la construction d'ouvrage souterrains (parking, voirie, tunnel ....)

La détermination des forces agissantes entre le sol et les structures de soutènement est une étape importante de l'ingénierie géotechnique.

Ce travail vise l'estimation numérique d'une part de l'influence de variation de caractéristiques de la paroi moulée et du butons sur le déplacement de paroi et le tassement de terrain.

L'objectif de la présente recherche est d'étudier les mouvements de terrain induit par les excavations profondes et leurs effets sur les ouvrages existants en milieux urbains.

Nous utilisons le logiciel plaxis 2D pour modélisation numérique de stabilité des ouvrages de soutènement.

Le dernier chapitre de ce mémoire consacre à l'étude d'influence de la rigidité sur la déplacement horizontal de la paroi et le tassement de terrain

## **SOMMAIRE**

REMERCIEMENTS

RESUME

TABLE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

### **CHAPITRE 1 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.**

|  |   |
|--|---|
| I-1 INTRODUCTION .....   | 1 |
| I-2 LES MOUVEMENTS DE SOL.....   | 2 |
| I 2-1 DEFINITIONS DE MOUVEMENTS DE SOL.....  | 2 |
| I-2-1-1 LA CLASSIFICATION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN.....                                     | 2 |
| I-2-1-2 TYPES DE MOUVEMENT DE TERRAIN.....   | 2 |
| I-2-1-3 LES MOUVEMENTS LENTS ET CONTINUS.....  | 3 |
| I -2--3-A L’AFFAISSEMENT.....  | 3 |
| I -2--3-B LE TASSEMENT.....  | 4 |
| - I 2-3-C LE GLISSEMENT DE TERRAIN.....  | 4 |
| I-2-4 LES MOUVEMENTS RAPIDES ET DISCONTINUS.....   | 5 |
| A-LES EFFONDREMENTS DE CAVITES SOUTERRAINES.....   | 5 |
| B-LES DEBLAIS OU LES EXCAVATIONS A LA BASE DU TALUS.....                                     | 5 |
| I-3 EXCAVATION EN MILIEU URBAIN ET EXCAVABILITE DU ROC.....                                  | 6 |
| I-4 Caractéristiques générales des dommages causés par le mouvement des sols de surface..... | 7 |
| I-4-1- Dommages causés par le mouvement différentiel du sol dans la direction vertical.....  | 8 |
| I-4-2Dommages causés par les distorsions horizontales du sol.....                            | 8 |
| I-5 L’effet d’une excavation sur son environnement.....                                      | 9 |

|   |           |
|---|-----------|
| I-6 LES PAROIS MOULEES.....                                     | 11        |
| <b>1-6-1 Généralité :</b> .....                                 | 11        |
| I-6-2 Mise en œuvre : .....                                     | 12        |
| I-6-3 Paroi de soutènement simple.....                          | 12        |
| I-6-4Domaine d’emplois .....                                    | 14        |
| <b>1-6-5 - Les parois moulées classiques.....</b>               | <b>14</b> |
| I-6-6-: Description du système Les parois moulées.....          | 15        |
| I-6-6-1Après l'excavation, .....                                | 15        |
| I-6-6-2Exécution.....   | 15        |
| I-6-6-3 Mise en œuvre d'un panneau de paroi moulée.....         | 16        |
| I-6-6-4 Matériaux .....   | 16        |
| I-6-6-5 Dimensions caractéristiques.....                        | 17        |
| I-6-6-6 Capacité portante.....                                  | 17        |
| I-6-6-7 Déplacement horizontal .....                            | 17        |
| I-6-6-8 Domaine d'application.....                              | 18        |
| I-6-6-9 Points importants.....                                  | 18        |
| <b>A-Lors du calcul.....</b>                                    | <b>18</b> |
| <b>B- Lors de la mise en œuvre.....</b>                         | <b>19</b> |
| <b>I-7. Mouvement induit par les excavations profondes.....</b> | <b>21</b> |
| <b>I-8.Tassement du sol derrière la paroi .....</b>             | <b>21</b> |
| <b>I-9 Soulèvement de fond d’excavation.....</b>                | <b>22</b> |
| <b>I-10- Critère de clought et O'Rourke 1990 .....</b>          | <b>22</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1-11. Les paramètres en jeu dans le comportement des écrans de soutènement.....</b>   | <b>23</b> |
| <b>I-11-1 La nature du sol .....</b>   | <b>25</b> |
| <b>I-11-1-1 Critère de Peck 1969 .....</b>   | <b>26</b> |
| <b>I-11-2. Les effets de l'eau.....</b>  | <b>27</b> |
| <b>I-11-3 Les types d'écran.....</b>   | <b>27</b> |
| <b>I-11-4 La hauteur libre de l'écran.....</b>   | <b>27</b> |
| <b>I-11-5 La fiche de l'écran.....</b>   | <b>28</b> |
| <b>I-12 Conclusion.....</b>  | <b>29</b> |
| <br><b>CH APITRE 2 : PRESENTATION DE L'OUTIL DE MODELISATION NUMERIQUE<br/>PLAXIS 2D</b> |           |
| <b>II-1-INTRODUCTION.....</b>  | <b>30</b> |
| <b>II-2-DESCRIPTION DE LOGICIEL.....</b>   | <b>31</b> |
| <b>II-2-1 LES POINTS FORTS DE PLAXIS.....</b>  | <b>32</b> |
| <b>II-2-2- LES SOUS-PROGRAMMES DE PLAXIS.....</b>  | <b>32</b> |
| <b>A- LE PROGRAMME D'ENTREE DE DONNEES (INPUT).....</b>                                  | <b>32</b> |
| <b>B-LE PROGRAMME DE CALCUL (CALCULATIONS).....</b>                                      | <b>30</b> |
| <b>C- LE PROGRAMME DE RESULTATS (OUTPUT).....</b>  | <b>32</b> |
| <b>D- LE PROGRAMME COURBE (CURVES).....</b>  | <b>33</b> |
| <b>II-3- LA DEMARCHE DE MODELISATION AVEC PLAXIS.....</b>                                | <b>33</b> |
| <b>A- GEOMETRIE.....</b>   | <b>33</b> |
| <b>B- CONDITIONS AUX LIMITES.....</b>  | <b>34</b> |
| <b>C- DEFINITION DES PARAMETRES DES MATERIAUX.....</b>                                   | <b>34</b> |
| <b>D- MAILLAGE.....</b>  | <b>34</b> |



|   |           |
|---|-----------|
| <b>E- LES CONDITIONS INITIALES.....</b>   | <b>34</b> |
| <b>F- PHASE DE CALCUL.....</b>  | <b>35</b> |
| <b>G- VISUALISATION DES RESULTATS.....</b>  | <b>36</b> |
| <b>II-4- MODELES DE COMPORTEMENT DE PLAXIS.....</b>                                       | <b>36</b> |
| <b>II-4-1- COMPORTEMENT ELASTOPLASTIQUE.....</b>  | <b>37</b> |
| <b>II-4-2- MODELE ELASTIQUE LINEAIRE.....</b>   | <b>38</b> |
| <b>II-4-3- MODELE DE MOHR-COULOMB.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>-A-MODULE D'YOUNG.....</b>   | <b>39</b> |
| <b>B- COEFFICIENT DE POISSON.....</b>   | <b>40</b> |
| <b>C- ANGLE DE FROTTEMENT.....</b>  | <b>41</b> |
| <b>D-COHESION.....</b>  | <b>41</b> |
| <b>E- ANGLE DE DILATANCE.....</b>   | <b>42</b> |
| <b>F-LES CONTRAINTESDETRACTION.....</b>   | <b>42</b> |
| <b>II-4-4- CONCLUSION .....</b>   | <b>43</b> |
| <br><b>CHAPITRE 3 : Présentation de l'ouvrage retenu pour l'expérimentation numérique</b> |           |
| <b>III-1- INTRODUCTION .....</b>  | <b>44</b> |
| <b>III-2 Présentation de l'ouvrage.....</b>   | <b>47</b> |
| <b>III-3 Phasage et déroulement des travaux.....</b>                                      | <b>47</b> |
| <b>III-4 Modèle numérique bidimensionnelles de l'ouvrage.....</b>                         | <b>47</b> |
| <b>III-5 Le maillage.....</b>   | <b>48</b> |
| <b>III-6 Conditions aux limites.....</b>  | <b>49</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>III .5 Analyse des résultats numériques.....</b>   | <b>50</b> |
| <b>III .5 -1-Déformation du maillage.....</b>   | <b>51</b> |
| <b>III .5 .2 Tassement de terrain derrière la paroi de soutènement.....</b>                       | <b>52</b> |
| <b>III- 5-3-Tassement du sol derrière la paroi (dans des déférentes phases d'excavation)--..-</b> | <b>52</b> |
| <b>III- 5 -4 déplacement horizontale de la paroi (dans des déférentes phases d'excavation)...</b> | <b>53</b> |
| <b>III- 5-5 Efforts tranchant dans la paroi .....</b>   | <b>52</b> |
| <b>III-5-7 moment de flexion .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>III5-8 Efforts dans le buton.....</b>  | <b>55</b> |
| <b>III- 5-9 Conclusion.....</b>   | <b>56</b> |

## **Chapitre 4 : Analyse paramétrique**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4-1 Introductio.....</b>  | <b>56</b> |
| <b>4-2 EFFET DE LA RIGIDITE DE LA PAROI .....</b>  | <b>57</b> |
| <b>4-2-1 effet sur le tassement .....</b>  | <b>57</b> |
| <b>4-2-2 effet sur le déplacement horizontal de la paroi .....</b>                       | <b>58</b> |
| <b>4-3 Variation de la rigidité de la butons (avec rigidité de paroi référence).....</b> | <b>59</b> |
| <b>4-3-1 effet sur le tassement .....</b>  | <b>59</b> |
| <b>4-3-2 effet sur le déplacement horizontal de la paroi.....</b>                        | <b>60</b> |
| <b>4-4 Conclusion.....</b>   | <b>60</b> |

**Conclusion générale**

**Références bibliographique**

## **LISTES DES FIGURES :**

### **CHAPITRE 1:**

**FIGURE 1:** AFFAISSEMENT LIE A UNE EXPLOITATION ANCIENNE AVEC UN RECOUVREMENT D'UNE CENTAINE DE METRE.....3

**FIGURE 2 :** SCHEMA EXPLICATIF DES PHENOMENES: TASSEMENT .....4

**FIGURE 3 :** SCHEMA EXPLICATIF DU PHENOMENE : GLISSEMENT DE TERRAIN.....4

**FIGURE 4. :** SCHEMA EXPLICATIF DES PHENOMENES : EFFONDREMENTS DES CAVITES SOUTERRAINES.....5

**FIGURE 5 :** DEBLAIS OU EXCAVATION A LA BASE DU TALUS.....6

**FIGURE 6:**SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE PAROI MOULEE EN PLACE AVEC UNE NAPPE DE TIRANTS.....14

**FIGURE 7:**SCHEMA DE PLACEMENT DES PANNEAUX EN COURS D'EXCAVATION.....21

**Figure 8:** Distribution du tassement autour d'une excavation dans différents types de sols ((Cough et O'Rourke 1990).....24

**Figure9 :** définition de symboles souvent utilisés lors des études d'écrans de soutènement .....24

**Figure10 :**Tassements due à l'excavation (Peck 1969).....26

### **CHAPITRE 2**

**FIGURE 2-1 :** FENETRE PRINCIPALE DU PROGRAMME D'ENTREE DES DONNEES (INPUT) (MODE DE CREATION GEOMETRIQUE).....31

**FIGURE 2-2:**MODELE MONODIMENSIONNEL DU COMPORTEMENT ELASTIQUE PARFAITEMENT PLASTIQUE.....37

|  |            |
|--|------------|
| <b>FIGURE 2-3:REPRESENTATION DU COMPORTEMENT ELASTIQUE PARFAITEMENT PLASTIQUE.....</b>       | <b>37</b>  |
| <b>FIGURE 2-4:REPRESENTATION DU COMPORTEMENT ELASTOPLASTIQUE AVEC ECROUISSAGE.....</b>       | <b>38</b>  |
| <b>FIGURE 2-5:SURFACE DE CHARGE ADOPTÉES PAR LE MODELE MC POUR UN SOL SANS COHESION.....</b> | <b>39.</b> |
| <b>FIGURE 2-6:COURBE INTRINSEQUE DU MODELE DE MOHR-COULOMB.....</b>                          | <b>40</b>  |
| <b>FIGURE 2-7:FENETRE DES PARAMETRES DE MOHR-COULOMB.....</b>                                | <b>41</b>  |
| <b>FIGURE 2-8:DEFINITION DU MODELE A 50% DE RUPTURE.....</b>                                 | <b>41</b>  |

### **CHAPITRE 3**

|   |            |
|---|------------|
| <b>FIGURE 3-: MODELE RETENU POUR L'ETUDE DE L'INTERACTION EXCAVATION-STRUCTURE.....</b>     | <b>46</b>  |
| <b>Figure 3-:1 maillages retenus maillage bidimensionnel en plaxis.....</b>                 | <b>49</b>  |
| <b>FIGURE 3-:2 CONDITIONS AUX LIMITES .....</b>   | <b>50</b>  |
| <b>FIGURE 3-:3 LES PARAMETRES DES MATERIAUX SUR LA FENETRE DE PROPRIETE PLAXIS 2D .....</b> | <b>52.</b> |
| <b>FIGURE 3-:4 LES CONDITIONS INITIALES.....</b>  | <b>52</b>  |
| <b>Figure 3-5 : tassement du le sol derrière le paroi.....</b>                              | <b>53</b>  |
| <b>Figure 3-6 :Déplacement horizontal de la paroi de soutènement.....</b>                   | <b>54</b>  |
| <b>Figure 3-7 : moment de flexion .....</b>   | <b>55</b>  |

## **Chapitre 4 :**

**FIGURE 4-a:** EFFET DE VARIATION DE DEPLACEMENTS HORIZONTAL EN FONCTION DE RIGIDITE DE PAROI.....58

**FIGURE 4-b** VARIATION DE DEPLACEMENT HORIZONTAL EN FONCTION DE RIGIDITE DE PAROI.....59.

**FIGURE 4-c :** EFFET DE VARIATION DE TASSEMENT DE SURFACE EN FONCTION DE RIGIDITE DE BUTON.....60

**FIGURE 4-d :** VARIATION DE TASSEMENT DE SURFACE EN FONCTION DE RIGIDITE DE BUTON.....61

## **Liste des tableaux:**

**Tableau 1:** Caractéristiques géotechniques des couches sols .....46

**TABLEAU 2:** Propriétés de la paroi .....46.

**TABLEAU 3:** Propriété des buton.....47

**TABLEAU 4** Effort dans le buton.....56















# CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

## I-1 Introduction:

Le développement en zones urbaines conduit généralement à la réalisation de nouvelles constructions comportant plusieurs sous sols. Ainsi, leur réalisation nécessite des excavations profondes. Pour des raisons d'encombrement ces excavations se trouvent à proximité des ouvrages et structures en service en surface. L'intégrité et la stabilité de ces ouvrages est un enjeu primordial pendant les différentes phases des travaux de nouvelles constructions (excavation, construction...)

Il s'agit d'un problème complexe de géotechnique urbaine avec une forte interaction sol-structure. Toute étude de ce problème doit intégrer correctement plusieurs aspects tels que le comportement non linéaire des géomatériaux, la présence de sols médiocres dans les couches superficielles de terrain, de nombreuses interactions (soutènements, sols, structures), les séquences des travaux, les conditions de contact sol-structure, l'aspect tridimensionnel...

L'intérêt accordé aux effets d'excavation en zones urbaines a suscité de nombreux travaux de recherche incluant des mesures sur des cas réels, des expérimentations spécifiques et de la modélisation numérique. Par ailleurs, des observations ont permis de déterminer les profils de déplacement de la paroi et du déplacement du sol en surface pour des différents types de sol [Peck (1969), Clough and O'Rourke (1990), Ou et al (1993), Moorman (2004)]. Les méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis sont utilisées pour caractériser le mouvement du sol, de la paroi et de comparer les résultats obtenus avec des mesures expérimentales [Mestat et Arafati (1998) Addenbrooke et al. (2000), Marcu et Popa (2004), Bourgeois et al. (2004)]. Peu de travaux numériques dans la littérature ont tenté d'aborder le problème global d'interaction excavation – ouvrages avoisinants.

Dans ce chapitre nous allons présenter les méthodes de calcul des écrans de soulèvement, définition et exécution des parois moulées, l'effet de différents paramètres sur les mécanismes de déformation générés par une excavation.

# CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

## **I-2 Mouvements de terrain:**

### **I 2-1 Définition de mouvements de sol:**

Un mouvement de terrain est un déplacement plus au moins brutal du sol ou du sous-sol, sous l'effet d'influence naturelle (agent d'érosion, pesanteur, séisme...etc.) ou anthropique (exploitation, déboisement, terrassement,...etc.). Ce phénomène comprend diverses manifestations : lentes ou rapides, en fonction des mécanismes initiateurs, des matériaux considérés et de leur structure.

### **I-2-2 La classification des mouvements de terrain:**

Les formes et l'ampleur des mouvements de terrain sont très diverses en raison de la multiplicité des mécanismes d'initiation et d'évolution (érosion, déformation et rupture sous charge statique ou dynamique,...), liés à :

- la topographie (pente du versant, dénivelée, etc...)
- à la lithologie (caractéristiques physiques et mécaniques et la sensibilité des matériaux solide, plastique, visqueux et liquide),
- à la structure géologique (pendage, fracturation, superposition des couches...)
- aux nappes aquifères,
- à la teneur en eau, etc. Les mouvements de terrain sont liés à un mouvement gravitaire de masses de terrain déstabilisés sous l'effet de sollicitations naturelles (fonte de neige, pluviométrie anormalement forte, secousses sismiques, diminution de butée par érosion de la mer, ) ou anthropiques( terrassement, vibration, déboisement, exploitation des matériaux ou de nappes aquifères. Toutes les classifications se basent sur l'association de plusieurs informations : les types de mouvements et types de matériel auxquels s'ajoutent des informations sur l'activité et la vitesse des déplacements.

### **I-2-3 Types de mouvement de terrain:**

Le mouvement de terrain a pour caractéristique d'être difficilement prévisible et constitue un danger pour la vie humaine en raison de son intensité, de la soudaineté et du caractère dynamique de son déclenchement. Selon la vitesse de déplacement, deux ensembles peuvent être distingués :

# CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

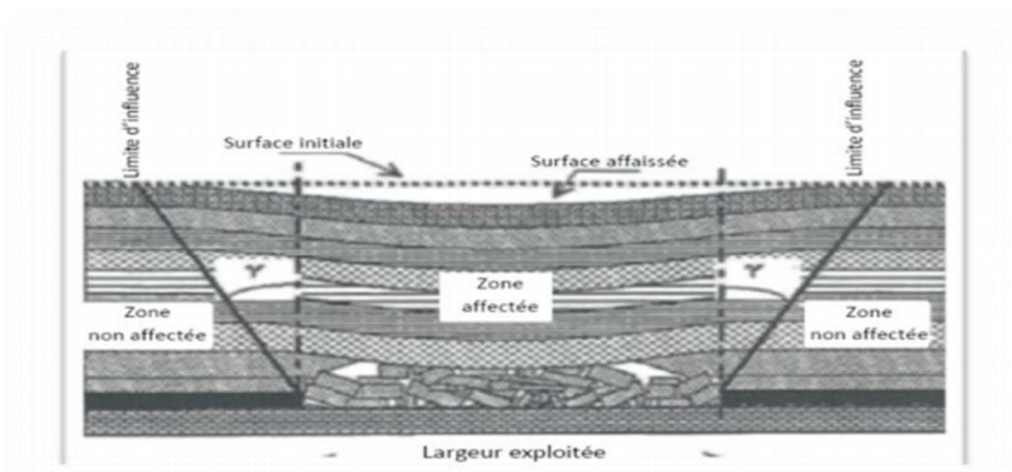
Les mouvements lents et les mouvements rapides. Seuls les mouvements rapides sont directement dangereux pour l'homme. Leurs conséquences sont d'autant plus graves que les masses déplacées sont importantes. Les conséquences des mouvements lents sont essentiellement socioéconomiques ou d'intérêt public

## I-2- 3-1 Les mouvements lents et continus:

Par l'homme. Ils regroupent : l'affaissement, le tassement, le glissement, la solifluxion, le fluage, le retrait-gonflement et le fauchage. Ils touchent principalement les biens, à travers la fissuration des constructions. Ces désordres peuvent se révéler si grave pour la sécurité des occupants et par conséquent la démolition des bâtiments s'impose.

### 1-2--3-A L'affaissement:

L'affaissement c'est une dépression topographique en forme de cuvette à grand rayon de courbure dû au fléchissement lent et progressif du terrain de couverture avec ou sans fractures ouvertes. Dans certains cas il peut être le signe annonciateur d'effondrement des bâtiments



**Figure 1: Affaissement lié à une exploitation ancienne avec un recouvrement d'une centaine de mètre.**

Cet affaissement crée un tassement différentiel sur les fondations qui se traduit par des fissures plus ou moins importantes et ouvertes, parfois traversantes, allant de la dégradation du ravalement à la ruine des murs porteurs, en passant par le blocage des portes et fenêtres

# CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

## 1-2--3-B- Le tassement:

Le tassement c'est une diminution de volume de certains sols (vases, tourbes, argiles...etc.), sous l'effet des charges appliquées et de l'assèchement. Ce phénomène peut être de grande extension et affecte des agglomérations entières .



Figure 2 : Schéma Explicatif des phénomènes: Tassement

## 1-2-3-C- Le glissement de terrain:

Il s'agit du déplacement lent d'une masse de terrain cohérente le long d'une surface de rupture. Cette surface a une profondeur qui varie de l'ordre du mètre à quelques dizaines de mètres dans des cas exceptionnels. Les volumes de terrain mis en jeu sont considérable, les vitesses d'avancement du terrain peuvent varier jusqu'à atteindre quelques décimètres par an

Se produisent généralement en situation de forte saturation des sols en eau.

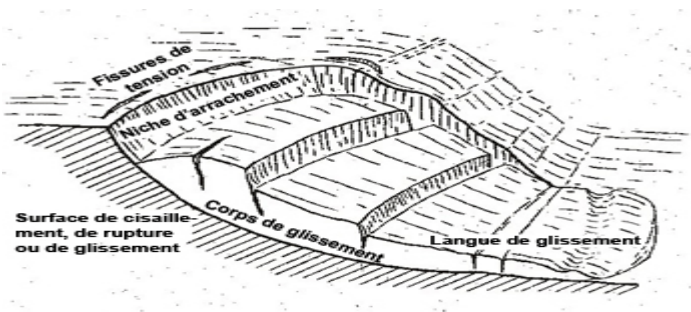


Figure 3 : Schéma Explicatif du phénomène : Glissement de terrain

## I-2-1-4 Les mouvements rapides et discontinus :

Ils se propagent de manière brutale et soudaine. Ils regroupent l'effondrement, les chutes de pierres et de blocs, l'éboulement et les coulées boueuses. Les mouvements rapides touchent

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

majoritairement les personnes, avec des conséquences souvent dramatiques. Ces mouvements ont des incidences sur les infrastructures (bâtiments, voies de communication...etc.), allant de la dégradation à la ruine totale.

### A- Les effondrements de cavités souterraines:

Ils résultent de la rupture des appuis ou du toit d'une cavité souterraine, rupture qui se propage jusqu'en surface de manière plus ou moins brutale, et qui détermine l'ouverture d'une excavation grossièrement cylindrique

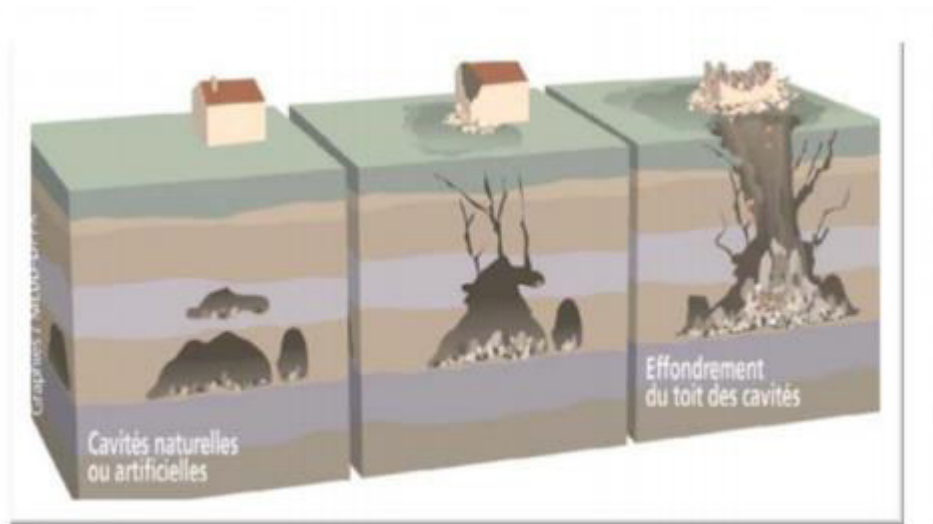


Figure 4. : Schéma explicatif des phénomènes : Effondrements des cavités souterraines

### B- Les déblais ou les excavations à la base du talus:

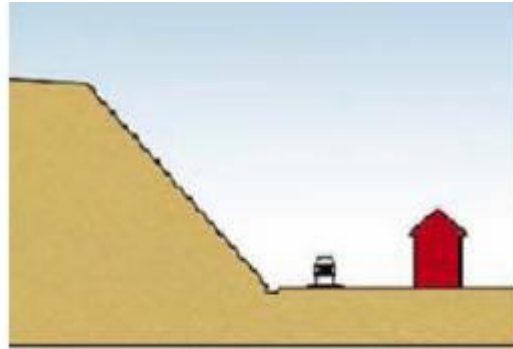
Le déblai ou l'excavation à la base du talus modifie les conditions d'équilibre en accentuant l'inclinaison et la hauteur du talus, ce qui nuit à sa stabilité. Ce type d'intervention peut provoquer un glissement de terrain lors de l'excavation, ou agir comme facteur aggravant (voir figure 5)



# CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.



Déblai à la base du talus



Excavation à la base du talus (Exp : fossé)

**Figure 5 : Déblais ou excavation à la base du talus.**

## I-3 Excavation en milieu urbain

Les effets des mouvements des murs d'étaionnement des excavations sont devenus importants à cause de l'augmentation des nouvelles technologies dans ce domaine et des poursuites suite aux dommages survenus. Notre connaissance dans ce domaine augmente suite aux résultats des études de cas avec des excavations instrumentées et de l'application de la MEF.

Les mouvements des excavations étaionnées sont fonction de plusieurs facteurs comme:

- 1) condition des sols et de la nappe phréatique;
- 2) Changement du niveau d'eau
- 3) Profondeur et forme de l'excavation;
- 4) Type et rigidité du mur et ses supports
- 5) Méthode de construction du mur;
- 6) surcharges.
- 7) durée d'ouverture de l'excavation

Un mur d'étaionnement peut éprouver des problèmes de mouvements de sol à cause des trois groupes de paramètres suivants :

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

Insuffisance structurale du mur suite à l'érosion des sols, à l'insuffisance structurale, aux méthodes de construction inappropriées, aux conditions de sol ou de l'eau imprévues et à une coordination déficiente des travaux par rapport au reste du projet;

Mouvements excessifs du mur à cause des faiblesses structurales mentionnées précédemment ou à cause des conditions suivantes :

- I. Rigidité faible du mur;
- II. Sur-excavation des sols au niveau des ancrages, retard dans la mise en place des supports;
- III. Contrôle inadéquat du drainage des sols en place;
- IV. Remblayage inadéquat à l'arrière du mur

Mouvements des sols à l'arrière du mur causés par l'excavation, indépendamment du système de support du mur suite aux phénomènes suivants :

- I. Tassement des sols suite à l'augmentation des contraintes effectives suite au rabattement de la nappe phréatique;
- II. Érosion des sols en place par manque de drainage approprié d'une nappe phréatique ou à cause des fuites d'eau imprévues survenues dans le secteur suite à l'excavation ou qui existait avant l'excavation;
- III. Tassement des sols granulaires suite au battage des pieux ou du dynamitage dans le secteur;
- IV. Altération des sols ou du roc suite à l'excavation

### **I-4 Caractéristiques générales des dommages causés par le mouvement des sols de surface :**

Il y a plusieurs types de dommages aux bâtiments en général et leurs éléments structuraux Particulièrement dans les zones d'excavation profonde et les pentes en raison du mouvement Surface du sol, et ceci est bien sûr lié aux ramifications structurelles utilisées la gravité des transitions forcées dans les fondations, leur dureté et les propriétés du sol elles-mêmes.

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

Lorsque les caractéristiques de surface sont homogènes, des distorsions se produisent Du sol qui est le plus dommageable pour les plantes. Et quand ils sont Le sol est hétérogène, les distorsions verticales irrégulières sont le facteur Les dégâts causés. Cela signifie que vous connaissez des formes dommages aux bâtiments dans les zones ci-dessus contribue efficacement au développement de mesures de protection appropriées Pour éviter de tels dommages, protégez les installations existantes et prévoyez leur construction fissures aussi différentes que possible, et ensuite maintenir l'intégrité de la population, ou au moins sécuriser leur investissement approprié pendant une certaine période de temps. et ce qui suit sont les principales caractéristiques de ces dommages

### **I-4-1- Dommages causés par le mouvement différentiel du sol dans la direction vertical:**

Les études théoriques et l'examen général de la réalité des structures construites confirment que l'apparition de les dommages dans ce cas sont principalement lorsque les fondations sont haute résistance aux sections placées au-dessus de la construction et capables de résister déformations horizontales résultant de la flexion à la traction ou à la traction, et le plus grand risque Dans le cas de la courbe des fondations vers le haut, provoquant l'apparition des contraintes de louange

Dans les sections structurales supérieures, tout en provoquant une courbure vers le bas formant stress souligne dans ces sections, et c'est beaucoup moins dangereux que le premier cas.

### **I-4-2Dommages causés par les distorsions horizontales du sol:**

Ce type de déformation représente le facteur le plus dangereux pour les bâtiments qui n'ont pas Dans lequel des mesures de protection structurelle sont prises pour contrer l'influence des forces latérales, Qui affectent initialement les fondations d'une manière similaire à celles des forces Sismique, et lorsque les fondations ne peuvent pas résister à ces charges, Autres sections de construction.

Les distorsions horizontales de la surface de la terre provoquent des contraintes stressantes

Ou une pression sur la surface de contact avec le fond des fondations, ainsi que des forces de poussée ou de poussée Tirant latéral pour d'autres sections de béton enterré / murs de sous-sol

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

Par exemple, les distorsions horizontales représentent le facteur le plus dangereux pour les bâtiments. Projections horizontales simples et déformations horizontales dans les deux cas de tension

La pression est très importante lorsque les projections horizontales sont riches en fractures et en noix liens faibles et ainsi de suite.

### **I-5 L'effet d'une excavation sur son environnement:**

Avant de décrire les paramètres qui influencent le comportement d'un écran de soutènement, il convient d'abord de définir ce qu'est « le comportement de l'écran » ou encore « l'effet d'une excavation sur son environnement » et ce que l'on peut en observer ?

Un écran de soutènement commence à influencer son environnement dès son installation. À part le fait que la mise en place ou simplement la présence de la structure modifie l'état de contrainte dans le sol, les méthodes d'installation de l'écran et de ses appuis jouent aussi un rôle important : par exemple, le vibro fonçage de palplanches a un autre effet que leur battage, la qualité de la boue de forage des parois moulées a un effet sur le « cake, qui est la couche quasi-imperméable qui se forme sur les parois intérieures d'une tranchée de paroi moulée lors de l'excavation sous boue et qui augmente donc la stabilité extérieure » et sur la pénétration de la boue dans le sol, et le forage de tirants d'ancrage influence le terrain jusqu'à une distance importante derrière la paroi.

Un écran peut avoir aussi un effet sur le régime de la nappe phréatique : dans une zone d'écoulement, il peut interrompre le flux d'eau souterrain comme le ferait un barrage. Enfin, le terrassement de la fouille entraîne un mouvement de l'écran d'une intensité plus ou moins importante suivant la profondeur (en fonction des étapes de construction, de la présence d'appuis et bien sûr des conditions du terrain). Ces déplacements sont principalement horizontaux, mais ils s'accompagnent d'un tassement du terrain derrière l'écran et d'un soulèvement du fond de la fouille. Habituellement, ce sont les tassements en arrière qui posent le plus de problèmes car ils peuvent provoquer des tassements différentiels des bâtiments avoisinants et un endommagement de leur structure. Le rabattement éventuel de la nappe accentue ces tassements.

Comme nous l'avons déjà noté, le calcul prévisionnel de ces effets n'est pas pleinement satisfaisant et la solution retenue actuellement consiste à dimensionner un écran relativement

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

rigide avec des facteurs de sécurité élevés. Une instrumentation est généralement installée pour suivre le comportement de l'écran et de son environnement et s'assurer que les effets restent à une échelle acceptable ainsi que pour accumuler de l'expérience sur le comportement réel de ce type d'ouvrages. Classiquement, l'instrumentation doit décrire les aspects « cinématiques » d'un ouvrage qui, dans les modèles abstraits de dimensionnement, est traité plutôt par les outils de la « statique » (par exemple, à l'aide d'un système de poutre et ressorts, sans éléments mobiles). D'un autre côté on mesure les efforts activés dans ou par la présence de cet ouvrage.

Pour observer l'influence de la construction d'un ouvrage sur son environnement, on peut mesurer (Marten, 2005):

- les déplacements et la déformée de l'écran lui-même,
- les tassements du sol en arrière et les mouvements des structures voisines,
- le soulèvement du fond de fouille en avant,
- les contraintes dans le terrain (sol et eau),
- les efforts dans les appuis.

D'habitude, l'instrumentation mise en place dans et autour de l'ouvrage permet de mesurer

Ponctuellement son comportement lors des étapes significatives de la construction, souvent caractérisées par la profondeur de la fouille ou le niveau d'une éventuelle nappe phréatique.

Dans un deuxième temps, lors d'une analyse plus détaillée, le comportement peut être interprété en fonction des facteurs plus secondaires qui influencent l'ensemble sol- écran observé.

Il est intéressant de noter que, selon le pays, le centre d'intérêt du suivi est différent : en Europe, on privilégie classiquement les mesures de la déformée de l'écran et des efforts dans les appuis, tandis que sur les autres continents dominant plus souvent les mesures du comportement du terrain ou des structures voisines. Par exemple, Peck (1969a) pour les Etats-Unis, Moh et Chin (1995) pour les pays de l'Asie du Sud-Est, Sugimoto et Tanaka (1995) pour le Japon, Ketkar et Varadarajulu (1995) pour l'Inde, Negro et Leite (1995) pour le Brésil et Day et Schwartz (1995) pour l'Afrique du Sud rapportent d'une manière relativement

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

concordante que, dans leurs pays ou régions, le but de l'instrumentation lors de l'exécution d'une excavation est principalement le suivi des alentours (terrain et structures) et que le suivi de l'écran et de ses appuis est du deuxième ordre. Dans la majorité des cas, les tassements du terrain sont suivis jusqu'à une distance  $x = H$  derrière l'écran ( $H$  désignant la profondeur finale de la fouille) et les bâtiments du voisinage sont observés d'une manière assez systématique.

En Europe, malgré l'intérêt souligné de suivre d'une façon précise l'évolution de possibles dommages sur des bâtiments autour de la fouille, l'attention est portée en premier lieu sur l'écran et ses appuis : dans un premier temps, on s'intéresse plus à la cause et moins à l'effet. Ceci est rapporté par exemple pour la France par Guilloux et Kastner (1995), pour l'Allemagne par Weißenbach et Kempfert (1995) et pour le Royaume-Uni par Simpson (1995).

### **I-6 Les parois moulées:**

#### **1-6-1 Généralité :**

Une paroi moulée est un écran en béton armé moulé dans le sol. La stabilité de la tranchée pendant les opérations de forage, de ferrailage et de bétonnage est obtenue avec un fluide de perforation appelé boue. La boue est fabriquée avec de la bentonite. Elle forme sur les parois de l'excavation un dépôt étanche appelé cake qui lui permet de ne pas percoler dans le terrain et d'assurer la pression hydrostatique qui s'oppose à l'éboulement des parois. Une boue fabriquée avec des polymères peut être aussi utilisée.

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

Le terrassement se fait ensuite à l'intérieur de l'enceinte ainsi délimitée, pratiquement sans interruption, sauf le temps d'exécuter des tirants d'ancrage à différents niveaux. Aucun étalement n'encombre le volume de l'excavation pendant les travaux (à part des butons dans les angles : voir plus loin).

La paroi moulée permet la réalisation, en site construit dans la nappe phréatique, de terrassements profonds et étendus. Des profondeurs de plus de 20 m sont de pratique

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

courante. Le procédé n'est en principe rentable qu'à partir de deux niveaux de sous-sol. La paroi moulée sert :

- de fondation : lorsqu'elle est descendue jusqu'aux couches porteuses profondes ;
- de soutènement : en maintenant les terres et les surcharges sur la périphérie ;
- de paroi étanche : en protégeant de l'eau extérieure le volume enclos ; sa base est ancrée dans les couches imperméables assez profondément pour isoler de la nappe la plate-forme inférieure du terrassement. De ce fait il y a différents type de parois moulées : **Différents types de parois moulées**, Paroi d'étanchéité Destiné à créer une barrière étanche dans l'épaisseur du sol (par exemple pour protéger une nappe), ce type de paroi ne comporte pas de terrassement après son exécution.

N'étant pas armée, la paroi est coulée soit avec un mélange de boue de bentonite et de graviers (épaisseur importante, d'au moins 1,50 m).

Soit en béton de ciment plastique à dosage de ciment réduit, introduit au tube plongeur sous boue de bentonite (épaisseur variable de quelques centimètres à une soixantaine, suivant le dosage) ; soit avec un mélange de bentonite, de ciment et d'adjuvants assurant son auto durcissement (épaisseur 50 à 60 cm)

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

. Excavations

- digues, tunnels et parkings souterrains
- chemins creux
- sites pollués

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

### **I-6-2 Mise en œuvre :**

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

### **I-6-3 Paroi de soutènement simple:**

Cas où il n'est pas prévu de construction dans l'excavation après terrassement. La paroi, en béton armé, est alors maintenue par des tirants d'ancrage permanents, ou par des contreforts, intérieurs ou extérieurs, réalisés par le même procédé que la paroi proprement dite Le fonctionnement des parois Paroi moulée classique est celui d'une structure chargée par la poussée des terre et de l'eau soutenue et résistant en flexion pour mobiliser des appuis constitués, d'une par, par le solen fiche et d'autre part par des tirant ou butons disposés dans la partie libre de l'écran

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

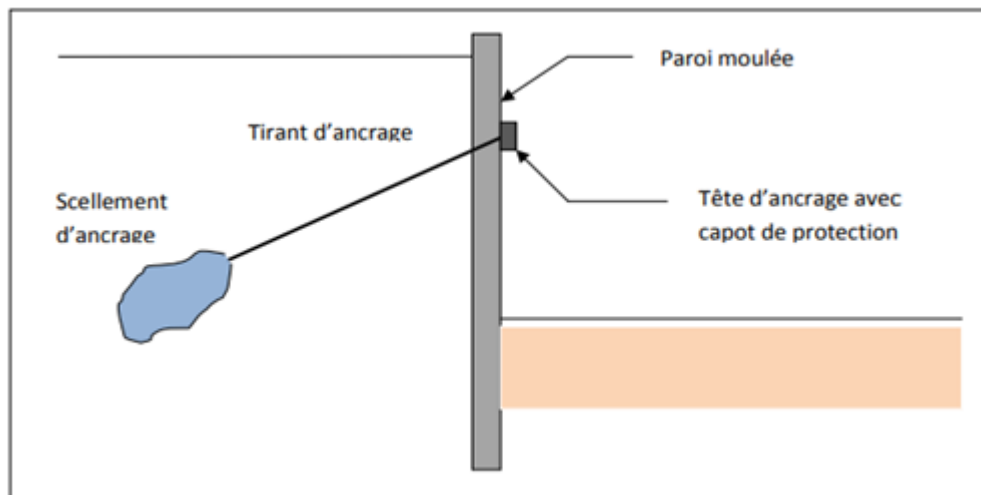
Les appuis en partie supérieur de l'écran sont présents dès que la hauteur libre dépasse environ 5m, de façon à limité les déplacements de renvoyer les efforts d'appuis suffisamment loin en arrière de l'écran, au sein d'une partie stable de massif de sol.il peut également s'agir



## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

de butons, dans le cas où l'effort est renvoyé à une structure faisant face à l'écran (cas des tranchées couvertes, par exemple)

Une paroi moulée est un écran en béton armé moulé dans le sol. La stabilité de la tranchée pendant les opérations de forage, de ferrailage et de bétonnage est obtenue avec un fluide de perforation appelé boue. La boue est fabriquée avec de la bentonite. Elle forme sur les parois de l'excavation un dépôt étanche appelé cake qui lui permet de ne pas percoler dans le terrain et d'assurer la pression hydrostatique qui s'oppose à l'éboulement des parois. Une boue fabriquée avec des polymères peut être aussi utilisée.



**Figure 6: schéma de principe d'une paroi moulée en place avec une nappe de tirants.**

Des efforts à reprendre. L'espacement horizontal est plus important dans le cas des butons que dans celui des tirants

### **I-6-4 Domaine d'emplois :**

Soutènement notamment pour les fouilles de grande profondeur (usine, centrale ...) Ouvrage hydraulique tel que les quais

Fondation profonde qui transmette aux sols sous-jacents des charges permanentes et d'exploitations Dans les zones urbaines pour protéger les structures proximités de la fouille.

# CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

## **1-6-5 Les parois moulées classiques :**

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

A- la paroi de tranchée couverte :

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

On coule les parois moulées de rive en béton armé (éventuellement celles formant appuis intermédiaires), puis le plancher de couverture au niveau du sol, qui sert à buter les parois en tête.

Le terrassement est ensuite effectué en souterrain, sous ce plancher sur la hauteur du premier sous-sol. Plusieurs planchers successifs peuvent être coulés au cours du terrassement. Cette technique a deux avantages :

- libération immédiate de la surface pour la circulation au niveau du sol existant ;
- suppression des tirants et des butons.

La répartition des appuis pour chaque niveau est variable suivant la nature des appuis et l'intensité

Cette Info fiche se penche sur la mise en œuvre des parois moulées ou murs emboués. Dans un premier temps, cette technique de fondation sera brièvement décrite. Ensuite, l'Info fiche s'attardera sur les matériaux utilisés et les dimensions caractéristiques. Enfin, il sera également question de la capacité portante et du déplacement horizontal des parois, de leur domaine d'application, des points importants concernant cette technique, des variantes envisageables ainsi que du contrôle de la qualité.

## **I-6-6-Description du système Les parois moulées:**

Ou murs emboués sont des parois en béton armé moulées dans le sol. Lors de leur réalisation, on creuse, au moyen de grappins rectangulaires spéciaux pendus à une grue à câble, des tranchées individuelles dans le sol ('panneaux'), jusqu'à la profondeur requise. Pour éviter l'effondrement de la tranchée durant l'excavation, celle-ci est remplie d'un fluide d'excavation (généralement de la boue bentonitique).

## **CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.**

---

### **I-6-6-1Après l'excavation:**

Le fond de la tranchée est nettoyé et le fluide d'excavation est remplacé. Des cages d'armature préfabriquées sont alors immergées dans la tranchée et cette dernière est ensuite bétonnée à l'aide d'un ou plusieurs tubes plongeurs. Le béton repousse ainsi complètement le fluide d'excavation. En réalisant ces panneaux de manière contiguë, on obtient une paroi continue dans le sol, qui fait généralement office de soutènement définitif.

### **I-6-6-2Exécution :**

Description générale Avant la mise en œuvre des parois moulées proprement dites, on place d'abord des murettes-guides sur la plate-forme de travail, tout au long du tracé de la future paroi. Ces murs parallèles en béton (légèrement) armé remplissent différentes fonctions. En effet, non seulement ils guident le grappin à l'intérieur de la tranchée, mais ils constituent également une structure portante pour les couches supérieures et permettent de caler les cages d'armature, les profilés de jointoiement et les tubes plongeurs. Enfin, ils servent aussi de point de référence pour le mesurage pendant la mise en œuvre du panneau.

### **I-6-6-3 Mise en œuvre d'un panneau de paroi moulée:**

Aux deux extrémités du panneau, on creuse deux tranchées dont la largeur correspond à la longueur du grappin on procède ensuite à l'excavation de la passe centrale restante (également appelée 'merlon') les excavations susmentionnées sont toujours réalisées à l'aide d'un fluide d'excavation. Le niveau et la qualité de ce fluide sont contrôlés régulièrement durant l'exécution .par la suite, le fond de l'excavation est nettoyé et le fluide d'excavation souillé est remplacé par un autre, plus propre (dessablé ou frais). Des bassins d'attente doivent être prévus à cet effet après cela, on place un profilé de jointoiement comportant un ou deux joints de part et d'autre du panneau primaire. En revanche, dans les panneaux voisins, seul le côté face au sol est doté d'un profilé de jointoiement. De l'autre côté (c'est-à-dire au niveau du raccord avec le panneau précédent), le profilé de jointoiement déjà présent est enlevé et seuls les joints partiellement bétonnés restent en place puis les cages d'armature et les tubes plongeurs sont mis en place dans la tranchée excavée, après quoi le béton est coulé en une phase par le fond et le fluide d'excavation est pompé par le dessus. Cette technique permet d'obtenir une paroi de soutènement jointive ensuite, on excave la fouille jusqu'au niveau du fond de fouille final ou jusqu'au niveau d'installation des éventuels supports horizontaux

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

(généralement tirants d'ancrage ou étançons lorsque le placement des tirants d'ancrage est impossible ou que la paroi moulée peut être ancrée sur les parties de la construction déjà exécutées), avant de placer ces derniers à leur tour enfin, on poursuit l'excavation jusqu'au niveau d'installation des éventuels supports horizontaux complémentaires ou jusqu'au niveau du fond de fouille final

### **I-6-6-4 Matériaux :**

Le fluide d'excavation est un mélange à base de bentonite et d'eau, dont la qualité doit également être contrôlée lors de l'exécution. Avant le bétonnage, le fluide d'excavation souillé par le sol doit être remplacé par un autre, plus propre. Le fluide récupéré doit être dessablé.

Les profilés de jointoiement sont constitués d'éléments de coffrage en acier, qui sont généralement dotés d'un ou deux joints en caoutchouc, afin de garantir l'étanchéité à l'eau du raccord entre les panneaux successifs

Les parois moulées sont composées de béton armé. Les caractéristiques spécifiques auxquelles le béton doit satisfaire sont précisées dans la norme NBN EN 1538 [1]. Le béton doit notamment présenter une fluidité élevée ( $S = 200 \pm 30$  mm), une teneur en ciment minimale de  $350 \text{ kg/m}^3$  à  $400 \text{ kg/m}^3$  en fonction de la dimension maximale des granulats et un facteur eau/ciment maximal de 0,6. Le béton contient en outre plusieurs adjuvants spécifiques, tels que des (supers) plastifiants ou des retardateurs de prise, et il doit conserver son ouvrabilité pendant toute la durée du bétonnage.

Les cages d'armature préfabriquées ont une longueur d'environ 3 m et sont constituées d'une ou plusieurs parties. Des dispositifs spéciaux peuvent être utilisés à la place des éventuels supports horizontaux ultérieurs.

### **I-6-6-5 Dimensions caractéristiques:**

La longueur des panneaux est généralement de 2,8 m (ce qui correspond à une fois la longueur du grappin), mais peut également être comprise entre 6,5 et 8,0 m. La largeur des panneaux varie en règle générale entre 0,6 et 1,5 m. Leur profondeur se limite habituellement à environ 30 m, ce qui n'empêche pas que des profondeurs de 50 m ou plus soient envisageables

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

La hauteur des murettes-guides est généralement comprise entre 1 et 1,5 m, tandis que leur épaisseur est d'au moins 20 cm. La distance entre les murettes-guides doit excéder de 20 à 50 mm la largeur des panneaux.

### **I-6-6-6 Capacité portante:**

Les parois moulées disposent en général d'une capacité portante verticale élevée [3]. Lors du calcul de cette dernière, il convient de tenir compte du facteur de forme et de l'influence d'excavations éventuelles.

### **I-6-6-7 Déplacement horizontal:**

Les parois moulées présentent une rigidité flexionnelle ( $EI$ ) élevée. Par conséquent, les déplacements horizontaux résultant de la déformation de la paroi sont (dans des conditions similaires) nettement inférieurs à ceux des autres types de soutènement.

### **I-6-6-8 Domaine d'application:**

Les parois moulées peuvent remplir une fonction de soutènement des terres, une fonction de retenue d'eau et/ou une fonction portante et sont généralement définitives. Ce type de soutènement ne peut en général pas être considéré comme complètement étanche. Les taches d'humidité et le ruissellement d'eau ne peuvent donc pas toujours être évités. La mesure dans laquelle ces problèmes se manifestent dépend de la circulation de l'air et des possibilités d'évaporation.

Les parois moulées sont habituellement utilisées pour les soutènements assez profonds ( $> 6$  m), voire très profonds ( $> 20$  m).

Les parois moulées auto stables sont rarement appliquées. Leur utilisation est en général réservée aux silos ou aux éléments de paroi moulée en T.

Ce type de soutènement est réalisé sans vibration.

Le trépanage (ciselage) des couches dures peut néanmoins engendrer des vibrations.

Les parois moulées peuvent être mises en place à proximité de fondations et de constructions existantes, à condition qu'une attention particulière soit accordée à la longueur et à la stabilité de la tranchée ainsi qu'à l'ordre d'exécution (phasage). La mise en œuvre de ce type de soutènement est envisageable dans pratiquement tous les sols. Dans les sols rocheux, elle

## **CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.**

---

nécessitera néanmoins l'utilisation d'outillages particuliers (trépans). La présence éventuelle d'obstacles souterrains ne pose généralement pas de problème majeur, mais peut toutefois être défavorable pour les tolérances de la paroi. Dans les mètres supérieurs, ces obstacles seront dès lors préalablement enlevés et remplacés par du sable stabilisé (composé d'environ 50 kg de ciment par m<sup>3</sup>). En règle générale, la présence d'une nappe phréatique ne constitue pas non plus un obstacle à l'exécution de parois moulées. Dans ce cas, il convient néanmoins de prendre en compte une sur hauteur minimale du fluide d'excavation. En présence d'écoulements d'eau importants, le risque de délavage de la bentonite ou du béton doit être étudié.

### **I-6-6-9 Points importants:**

#### **A- Lors du calcul :**

Le principe du calcul géotechnique des parois moulées est comparable à celui des rideaux de palplanches. La stabilité de la tranchée excavée doit être contrôlée. Cette vérification peut se baser sur l'expérience de l'exécutant (si elle existe) ou être effectuée au moyen de calculs (selon la norme DIN 4126 [5], par exemple) ou d'une excavation d'essai.

Lorsqu'on met en œuvre des parois moulées à proximité de fondations ou de constructions existantes et/ou que le niveau de la nappe phréatique est élevé ou que les écoulements d'eau sont importants, le calcul de la stabilité de la tranchée est absolument indispensable. Si l'on craint que le fluide d'excavation ne puisse s'écouler (gravier, cavités, karst, par exemple), il peut s'avérer nécessaire de prendre des précautions particulières.

#### **B- Lors de la mise en œuvre:**

Dans les parois moulées assurant une fonction de retenue d'eau, une attention particulière doit être accordée à la qualité des joints verticaux entre les panneaux.

convient en outre de prendre en compte le fait que les écarts de positionnement des panneaux augmentent avec la profondeur et d'y être particulièrement attentif dans les parois plus profondes ayant une fonction de retenue d'eau, en vue d'éviter des fuites trop importantes

Au cours de l'excavation des panneaux, le niveau du fluide d'excavation doit non seulement s'élever à au moins 2 m au-dessus de la hauteur piézométrique maximale (dans les différentes nappes phréatiques sur l'ensemble de la profondeur), mais aussi au moins jusqu'entre les

## **CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.**

---

murettes-guides. Afin d'obtenir une sur hauteur suffisante du fluide d'excavation, on réalisera soit un rabattement de la nappe phréatique de part et d'autre de la paroi lorsque le niveau de celle-ci est trop élevé, soit un rehaussement des murettes-guides jusqu'au-dessus du niveau de la surface du sol. Si l'on opte pour un rabattement de la nappe phréatique, on doit être conscient des risques encourus (pannes de courant, pressions d'eau différentielles en cas d'écoulement d'eau important, etc.) et des dispositions doivent être prises en conséquence (système de substitution, par exemple). Par ailleurs, il importe de s'assurer que le rabattement est effectif sur l'ensemble de la profondeur de la tranchée. Enfin, en cas de rehaussement des murettes-guides, la plate-forme de travail doit également être rehaussée dans le but de garantir une bonne visibilité de la tranchée.

La vitesse de descente et de remontée du grappin à l'intérieur du panneau rempli de fluide d'excavation doit permettre de limiter autant que possible l'érosion des dépôts de bentonite sur la paroi de la tranchée. Les sous-pressions qui naissent sous le grappin lors de l'extraction doivent, elles aussi, être réduites au minimum.

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

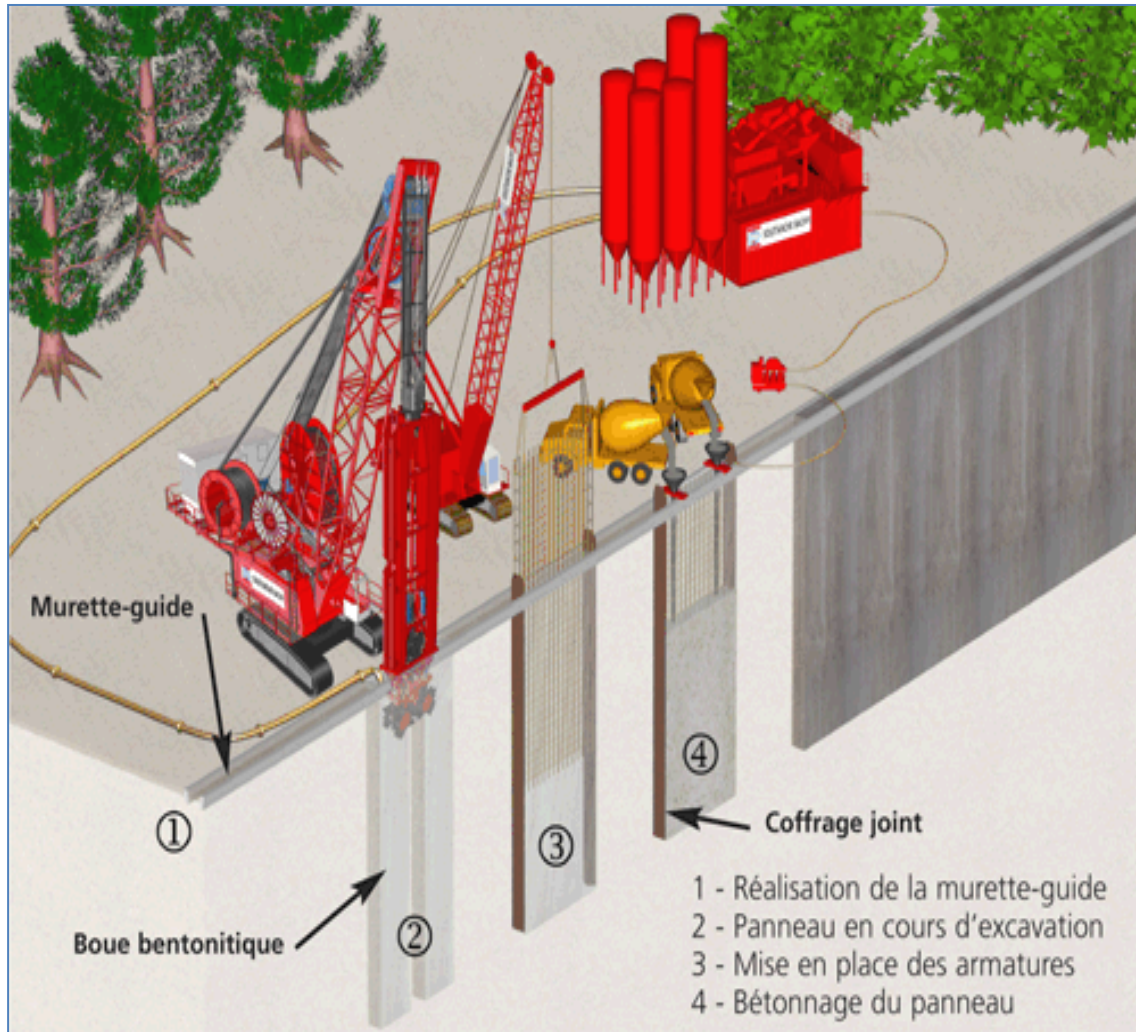


Figure 7:schéma de placement des panneaux encours d'excavation

Le premier ouvrage exécuté est la murette guide : elle est constituée de deux murs en béton armé de 30 cm de large environ et permet :

- de matérialiser l'ouvrage à exécuter et d'en définir avec précision le tracé,
- de guider l'outil de forage,
- d'assurer une réserve de boue de forage,
- de caler les cages d'armatures.

Afin d'assurer la stabilité de la tranchée durant les travaux, la perforation se fait par panneaux de longueur limitée, de l'ordre de 7 m, variable selon le type de sols et le voisinage. En présence de mitoyens, la distance minimale entre le nu du mitoyen, y compris ses fondations, et le nu extérieur de la paroi à réaliser est égale à l'épaisseur de la murette guide.



## **CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.**

---

Une fois l'excavation d'un panneau achevée, la cage d'armatures est mise en place dans la tranchée remplie de boue préalablement traitée afin de limiter les particules de terrain en suspension.

Le bétonnage est ensuite effectué à l'aide d'un tube plongeur.

La jonction entre panneaux adjacents peut se faire :

- par utilisation d'un coffrage métallique provisoire CWS permettant la mise en place d'un joint d'étanchéité entre les panneaux, et le guidage de l'outil d'excavation.
- en remordant le panneau exécuté en première phase dans le cas de perforation à l'hydro-fraise.

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

### **1-7 Mouvement induit par les excavations profondes:**

Les mouvements induits par les excavations profondes (déplacement horizontal de la paroi, tassement du terrain derrière la paroi, soulèvement du fond de l'excavation) sont dus principalement au soulagement des contraintes horizontales et verticales.

Le soulagement des contraintes horizontales conduit à un mouvement horizontal de la paroi et à un tassement du terrain autour d'une excavation, et le soulagement des contraintes verticales à la base d'une excavation peuvent donner lieu à la fois à un soulèvement du fond d'excavation et à un mouvement latéral de la paroi (Chugsik et Dongyeob 2008).

### **1-8 Tassement du sol derrière la paroi :**

L'estimation du tassement de terrain derrière la paroi de soulèvement est très importante car ce tassement affecte les ouvrages avoisinants. Elle peut être effectuée par les méthodes empiriques ou d'éléments finis MEF.

Il existe plusieurs méthodes empiriques qui permettent le tassement du terrain derrière la paroi de soutènement.

Peck (1969) a été le premier à présenter une étude des mouvements verticaux autour d'un certain nombre de fouilles contreventées dans divers types de sol.

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

### **1-9 Soulèvement de fond d'excavation :**

Le soulèvement de fond d'excavation est dû principalement au gonflement élastique du fond de l'excavation en raison du soulagement de la contrainte verticale lors du processus d'excavation et le déplacement du pied de mur qui passe vers l'intérieur de l'excavation (Kämpfer et Geberselassie 2006).

La méthode des éléments finis est un moyen efficace pour estimer le soulèvement de fond d'une excavation puisque elle permet d'évaluer simultanément les différentes composantes de soulèvement en utilisant le modèle de comportement approprié (Tan et Chow 2008).

### **1-10- Critère de Clough et O'Rourke 1990 :**

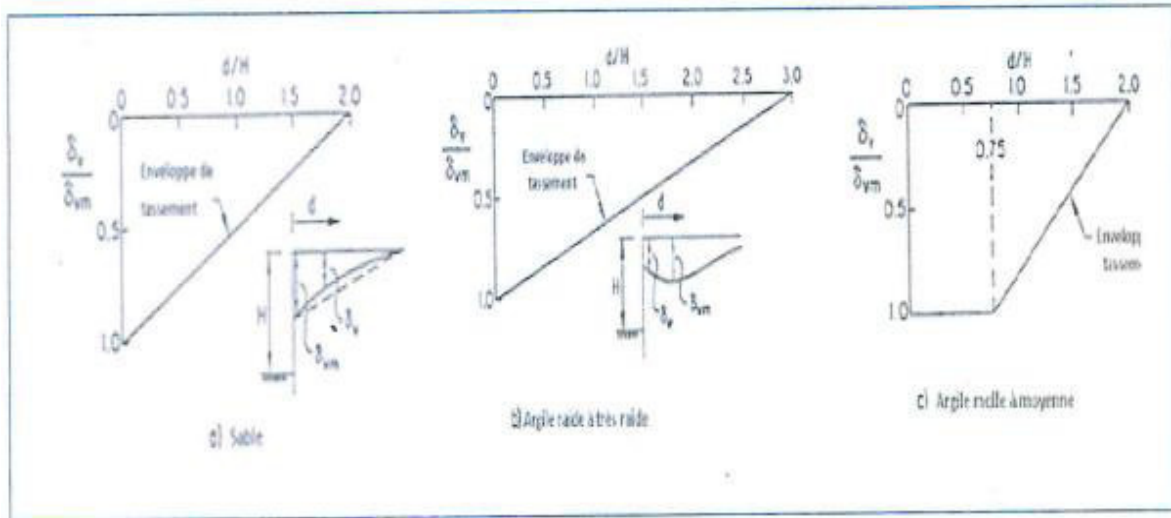
Clough et O'Rourke 1990 présentent de profil de tassement des sols retenus derrière l'excavation pour différents types de soutènements et différents systèmes de supports, dans différents types de sols comme suit :

Les tassements derrière la paroi de soutènement dans les terrains sableux, le profil du tassement est triangulaire, le tassement maximal est généralement inférieur à 0.3 % de la profondeur de l'excavation. Ce tassement diminue avec la distance derrière la paroi de soutènement et devient nul à une distance égale à deux fois la profondeur de l'excavation.

Les tassements et les mouvements horizontaux pour les excavations situées dans des sites d'argiles raides à très raides. Le tassement maximal est inférieur à 0.3 % de la profondeur de l'excavation, ce tassement devient nul à partir d'une distance égale à trois fois la profondeur de l'excavation.

la distribution du tassement autour d'une excavation dans les argiles molles a moyennement molles, le profil de tassement a une forme trapézoïdale, le profil de tassement est constant, à sa valeur maximale, sur une distance égale aux trois-quarts de la profondeur de distance égale à environ deux fois la profondeur de l'excavation.

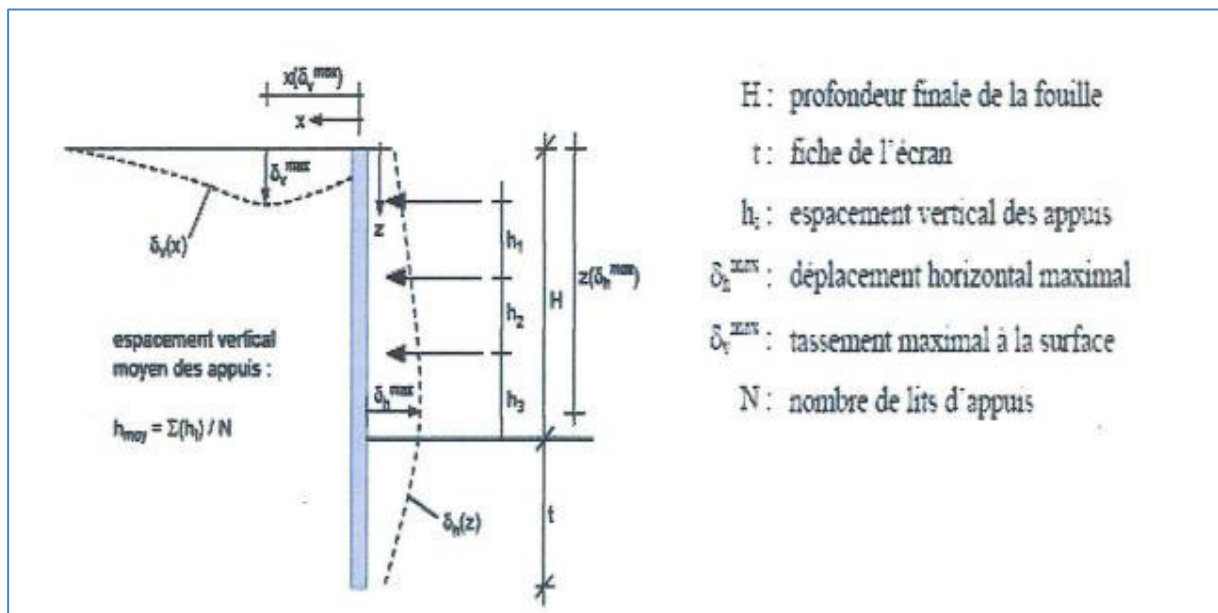
# CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.



**Figure 8:** distribution du tassement autour d'une excavation dans différents types de sols ((Cough et O'Rourke 1990).

## 1-11. Les paramètres en jeu dans le comportement des écrans de soutènement :

les références sont choisies pour illustrer les principaux facteurs d'influence identifiés . la présentation faite par la suite procède en traitant successivement de chacun de ces facteurs d'influence , en dépit du fait s'ils ne sont généralement pas indépendants .



**Figure9 :** définition de symboles souvent utilisés lors des études d'écrans de soutènement

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

La figure résume les symboles souvent utilisés lors des analyses, le comportement de l'ouvrage est dans la majorité des cas réduit à l'expression des déplacements (déplacement horizontal de l'écran) et (déplacement vertical du terrain amont).

### **1-11-1 La nature du sol :**

L'un des paramètres les plus importants pour le comportement d'un soutènement est la nature du terrain. Le type de sol, la stratification, les caractéristiques anisotropes du matériau et l'état des contraintes in-situ sont des facteurs primordiaux, pour des raisons de simplification et d'efficacité, les approches empiriques ne peuvent pas tenir compte en détail de tous ces paramètres, mais se contentent généralement de caractériser le type de sol prédominant.

Les méthodes théoriques de calcul des ouvrages de soutènement ont longtemps été incapables de prédire les déformations à attendre en situation de service et l'ingénieur devait se contenter des ordres de grandeur tirés de l'observation du comportement des ouvrages réels, cette démarche empirique est cependant longtemps restée très fruste.

La première approche détaillée de la question des ouvrages est due à Peck (1960a). Suivant les principes utilisés pour l'analyse des efforts de boutonnage des soutènements de fouilles, Peck établit, sur la base de la compilation de résultats de mesures, des catégories de terrain.

À l'instar des distinctions faites pour le calcul des efforts dans les butons, il distingue différentes configurations d'ouvrages liées à la nature du sol, cette proposition initiale de Peck fut par la suite l'objectif des diverses améliorations,

# CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

## 1-11-2 Critère de Peck 1969 :

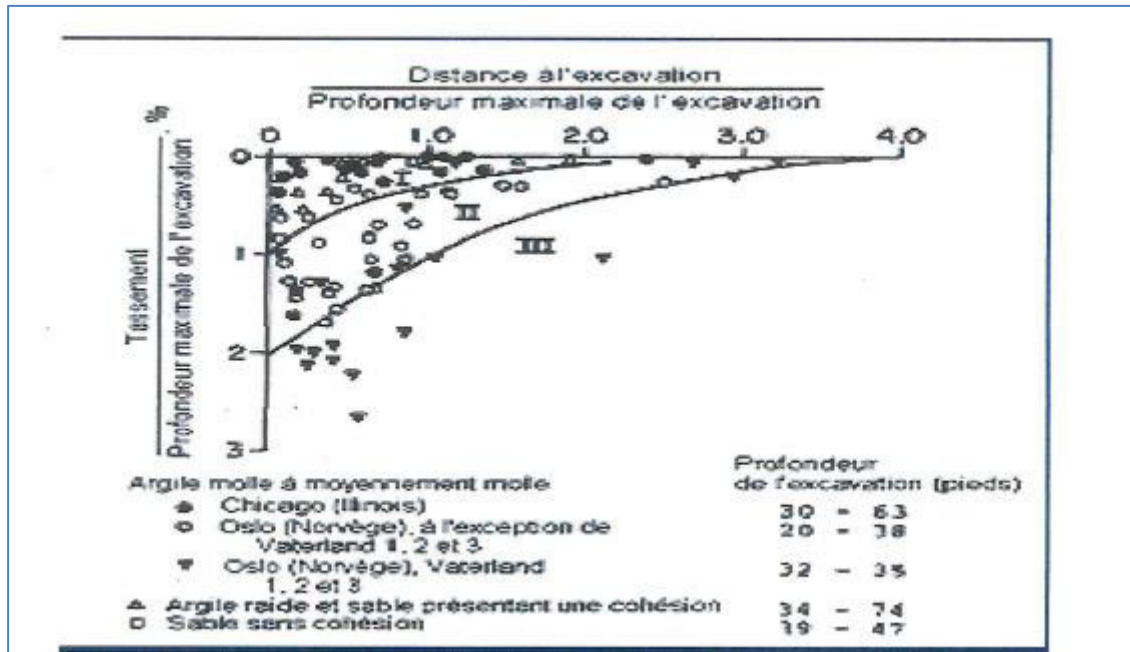


Figure 10 : Tassements due à l'excavation (Peck 1969)

**Zone I** excavation dans les sables et dans les argiles molles à raides, conduite des travaux de qualité moyenne.

**Zone II** excavation dans les argiles très molles à molles, la couche d'argile ayant une extension limitée sous le niveau de la fouille, ou étant limitée par une couche d'argile plus raide ( $N_b < N_c$ )

**Zone III** excavation dans les argiles très molles à molles, , la couche d'argile ayant une grande épaisseur sous le niveau du fond de la fouille ( $N_b > N_c$ ).

$$N_b = (\gamma H) / C_u$$

$N_c$  : facteur de portance .

D'après le diagramme, les tassements varient entre  $\delta v / H < 1\%$  pour la zone I (sable et argiles molles à raides). et  $\delta v / H > 2\%$  pour la zone III (argiles très molles jusqu'à une profondeur importante). Dans des sol mous à très mous , la distance horizontale d'influence des tassements derrière la paroi peut atteindre quatre fois la profondeur de la fouille tandis que , dans un sable ou de l'argile molle à raide , la distance jusqu' à laquelle se fait sentir l'influence des tassements est plutôt limitée à 2-H.

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

la classification des différentes catégories de terrains peut être raffinée en 5 groupes ( d'après Moormann, 2002) cité par ( Sonja 2005):

--les sols cohérents de consistance très molle à molle ( $C_u < 75$  kPa)

--les sols cohérents de consistance raide ( $C_u > 75$  kPa)

-les sols pulvérulents

- -les sols " stratifiés " ou "mixte"

- les terrains rocheux.

### **Les effets de l'eau :**

Généralement, dans le cas d'excavations pour lesquelles un pompage assure la mise hors d'eau de la fouille, les effets de l'eau peuvent se manifester de deux façons : pour les écrans encastres dans une couche quasi-imperméable et interceptant les arrivées d'eau, c'est principalement la pression de l'eau derrière l'écran qui est en jeu, si le pied de l'écran s'arrête dans une couche perméable, l'écoulement d'eau qui s'établit autour du pied a des effets multiples. En amont, il augmente les contraintes effectives et provoque une consolidation des terrains. en aval, ce mouvement de l'eau diminue les efforts résistants de la butée et donc la capacité d'appui par le sol et peut être à l'origine d'instabilités hydrauliques (Boulance, Renard).

**1-11-3 Les types d'écran :** Pour les parois planes, la référence au " type d'écran" est souvent remplacées par la référence à la rigidité (produit d'inertie EI) voire la référence à la " rigidité du système ", qui prend en compte le produit en de l'écran, la profondeur en fiche et l'espacement vertical des appuis.

### **1-11-4 La hauteur libre de l'écran:**

La hauteur libre décrit d'une part la profondeur de excavation devant l'écran, mais aussi le niveau d'un éventuel remblai en arrière par rapport au fond de la fouille devant l'écran.

Les déplacements horizontaux de l'écran  $\delta_h$  et les tassements du sol en arrière  $\delta_v$  dans toutes les études mettent en relation avec la profondeur du fond de la fouille, plus l'excavation

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

Cette tendance s observe pour un écran lors de l'avancement des travaux de terrassement, mais aussi en comparant le comportement a' l'état final de différents écrans Moorann(2002,2004) , que a établi une base de données de plus de 530 cas .

Instrumentés ,et publiés autour du monde ,trouve une dispersion assez importante lorsqu' 'il représente les déplacements maximaux en fonction de profondeur H de la fouille (figure 1.8),pourtant, malgré cette dispersion ,la tendance montre une augmentation des déplacement avec la profondeur pour chaque type de sol.

### **1-11-5 La fiche de l'écran :**

La profondeur de l'encastrement dans le terrain joue un rôle important vis -a- vis de la stabilité de l'ouvrage .plus la fiche est profonde ,plus les coefficients de sécurité vis-à-vis du défaut de la fiche et du soulèvement du fond de fouille sont élevés, les méthodes classiques de Terzaghi (1943) ou de Bergum et Eide (1956) pour la détermination du coefficient de sécurité vis-à-vis du soulèvement du fond de fouille ,qui sont utilisés par exemple par Mana et Clough(1981) pour l' estimation de déplacements ,ne prennent pas en considération la fiche

## CHAPITRE 1: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MOUVEMENTS INDUITS PAR LES EXCAVATIONS.

---

### 1-12 -Conclusion:

A l'instant de ce qui a été développé dans ce chapitre, il se dégage que les mouvements de terrain sont des ennemis redoutables, dans la mesure où leurs caractères imprévisibles et violents représentent un danger pour la vie humaine et les biens. Dans ce cadre et à travers notre recherche sur ce phénomène il est relevé deux types de mouvements bien distincts et qui sont les mouvements lents et rapides. Les mouvements lents provoquent des changements progressifs qui peuvent se solder par des conséquences brutales, leurs dommages sont directs et touchent particulièrement les biens et équipements. Les mouvements rapides se distinguent par contre par leur frappe brusque et immédiate, et sont considérés comme un risque très dangereux pour l'homme. Ces phénomènes d'instabilité de terrain se traduisent par une manifestation du sol ou du sous-sol lequel est soumis soit à des variations naturelles tels : le séisme, la pluviométrie très forte et la nature du sol,...etc. où anthropique comme le déboisement, le terrassement, les exploitations des matériaux...etc. Les conséquences de ces mouvements se traduisent par des dégâts considérables au plan social et économique, ils provoquent des destructions de multiples habitations et infrastructures. Ces dégâts se distinguent sous forme de plusieurs pathologies où les critères de constructions peuvent jouer un rôle important dans la vulnérabilité du cadre bâti face au risque du glissement de terrain.



### **II-1-Introduction :**

L'analyse des projets géotechniques est possible grâce à des nombreux codes éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettant le passage de la réalité au modèle est difficile à évaluer. Il sait que jargon éléments finis est parfois rebutant-il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des nœuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer du code sur le PC gérant sa bureautique et sa technique quotidienne, afin de faire une étude paramétrique des problèmes délicats. Il exige avant tout que ses journées ne soit pas encombrées par de laborieuses entrées de données et interprétations de fichiers. Conçu par des géotechniciens numérique de l'université de Delft aux Pays-Bas dans les années 1980, le code éléments finis Plaxis est un outil pratique d'analyse d'ouvrages et d'essais géotechniques. Si ce code a initialement été développé pour analyser les digues et les sols mous, son champ d'application s'étend aujourd'hui à une large gamme de problèmes géotechniques. Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élastoplastiques, actualisée. Très fiable sur le plan numérique, ce code fait appel à des éléments de haute précision, tels que les triangles à 15 nœuds, ainsi qu'à des pilotages des résolutions récents comme la méthode de longueur d'arc.

Du point de vue pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas à l'esprit outre mesure. Le recours manuels devenant rare, ceux-ci sont de volume réduit, faciles à consulter. L'ensemble des options simplifiées (initialisation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné.

## II-2-Description de logiciel:

Le logiciel Plaxis est le logiciel d'éléments finis de référence en géotechnique dont le développement commença en 1987 à l'initiative du ministère des travaux publics et d'hydrologie des Pays-Bas. Son but initial était de créer un code éléments finis facilement utilisable en 2D pour analyser l'effet de l'implantation d'une digue fluviale sur les argiles molles des Pays-Bas. En quelques années, Plaxis a été étendu à plein d'autre domaine de la géotechnique. En 1998, la première version de Plaxis pour Windows est développée. Durant la même période une version 3D du logiciel a été développée. PLAXIS 2D est donc un programme en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan (déformation plane) ou axisymétrique. L'algorithme général du code PLAXIS consiste à résoudre un système d'équations algébriques non linéaires selon un processus itératif pour déterminer les valeurs de déplacements aux différents nœuds du maillage, le champ de contraintes et les états de rupture du sol. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. Le manuel d'utilisation du code Plaxis [Brinkgreve et al (2003)] présente une description détaillée du logiciel.

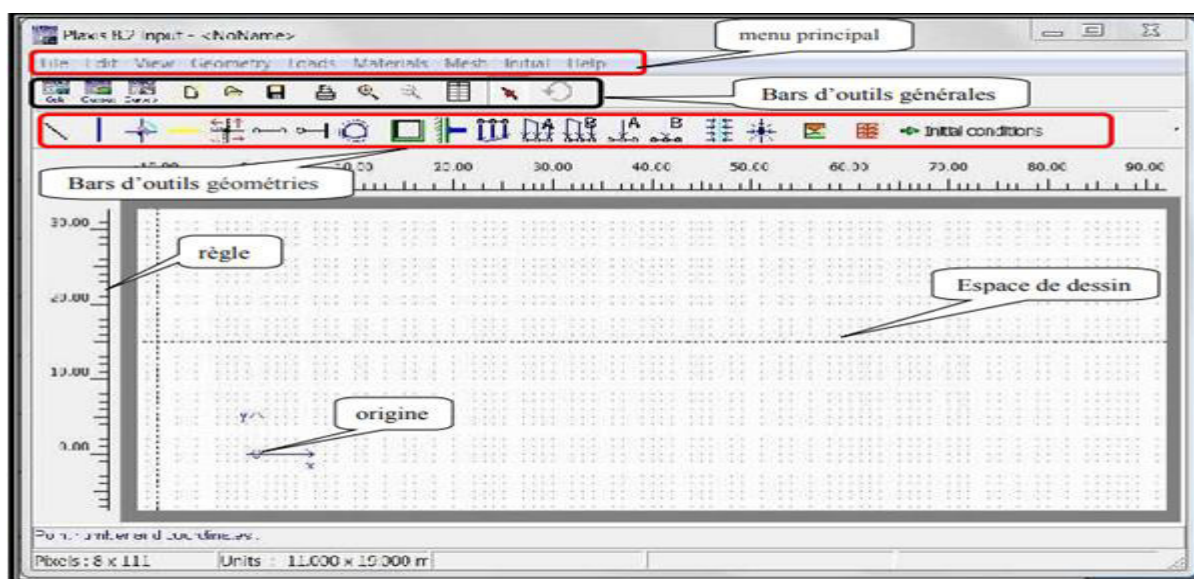


Figure 2-1:fenêtre principale du programme d'entrée des données (input)(mode de création géométrique).

### **II-2-1 les points forts de plaxis:**

La convivialité de l'interface pour la saisie des données et pour l'interprétation du résultat  
Générateur automatique de maillage

Jeu complet de lois de comportement de sol et la possibilité de définir ses propres lois de comportement

Couplage avec les calculs d'écoulement et de consolidation ;

Prise en compte des éléments de structure et de l'interaction sol-structure ;

Calculs de coefficient de sécurité

### **II-2-2- Les sous-programmes de Plaxis:**

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

#### **a- Le programme d'entrée de données (Input):**

Le programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales.

#### **b- Le programme de calcul (Calculations):**

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

#### **c- Le programme de résultats (Output):**

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

**d- Le programme courbe (Curves):**

Ce programme contient tout le nécessaire pour générer des courbes charges- déplacements, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations. La réalisation d'une modélisation avec Plaxis se traduit en général, par l'enchaînement des étapes suivantes :

- Utilisation du préprocesseur « Plaxis Input », pour la génération des données (maillage, jeu des données et contraintes initiales).

Lancement du code de calcul éléments finis « Plaxis Calcul » , pour effectuer la résolution numérique du problème étudié.

Utilisation de post-processeur « Plaxis Output », pour l'interprétation des résultats sur écran graphique.

- Utilisation de post-processeur « Plaxis curve », pour l'interprétation des courbes (courbe de consolidation, chemin des contraintes,....etc.).

**II-3- La démarche de modélisation avec plaxis:**

Nous présenterons ici le cheminement et principales étapes d'un calcul sous Plaxis :

**a- Géométrie:**

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

Les lignes géométriques qui sont la pour dessiner l'organisation du sol.

L'outil « plates » permet de dessiner et de définir des structures élancées qui possèdent une résistance en traction compression et une résistance en flexion, Cet outil est principalement utilisé pour modéliser des murs, des poutres des coquilles, des plaques pour modéliser les murs et les zones rigides, (principalement les éléments ayant une forte extension selon l'axe perpendiculaire au plan de modélisation (ici) ;

« Anchor » qui sert à modéliser les liaisons entre les éléments. Ce sont des ressorts, qu'on utilise pour modéliser les batardeaux ou plus exactement la liaison entre les différents éléments d'un batardeau

### **b- Conditions aux limites:**

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

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

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

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

### **d- Maillage:**

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

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

### **e- Les conditions initiales:**

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

Un « Switch bouton » permet d'accéder à deux fenêtres différentes chacune représentant la

géométrie de la modélisation :

La première qui s'appelle « Initiale pore pressure » permet de définir un niveau de nappe phréatique initial (si besoin), et de générer les pressions interstitielles correspondantes ;

La deuxième fenêtre permet de générer les contraintes initiales à l'intérieur du massif (poids propre et sous pression).

### **f- Phase de calcul:**

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

De nouvelles phases de calcul peuvent être créées basées sur une phase existante. Pour chaque phase on peut modifier la géométrie par l'intermédiaire de la même interface qui a servi à définir les conditions initiales. On peut donc effectuer des changements uniquement en activant ou désactivant des éléments. Le niveau de la nappe phréatique peut être modifié, ainsi que certaines propriétés des matériaux, des éléments autres que le sol (modification des paramètres entrés en input, imperméabilité et/ou la non-consolidation de certaines parois). Le niveau d'intensité et la position des conditions limites des chargements en déplacement et en contrainte peuvent également être modifiés.

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

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

Une fois le phasage de l'étude terminé, des points caractéristiques peuvent être placés. Les courbes de résultats de Plaxis seront calculées en ces points. Après avoir appuyé sur « Calculate » les calculs se lancent. Une fois terminée, les résultats sont visionnables grâce à la touche « Output ».

**g- Visualisation des Résultats:**

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

**II-4- Modèles de comportement de Plaxis:**

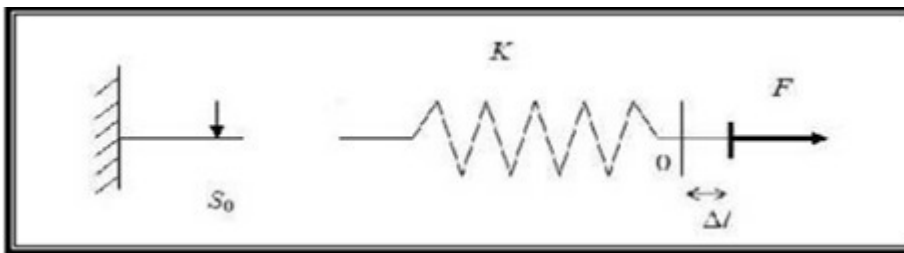
Plusieurs lois de comportement ont été utilisées dans les logiciels de calcul en géotechnique en se basant sur les méthodes des éléments finis. Les lois de comportement expriment une relation entre le tenseur de contraintes, le tenseur de déformations et leurs accroissements respectifs pouvant impliquer un critère de rupture ou de limite d'élasticité. Le choix d'un modèle dépend du comportement du matériau à étudier et du type d'analyse que l'ingénieur géotechnicien souhaite effectuer.

L'utilisation de lois de comportement complexes dans des modèles éléments finis pour l'ingénierie est délicate. Elle demande pour la détermination des paramètres des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie. L'intégration de telles lois dans des codes éléments finis est difficile. Le coût de ces calculs est généralement important et peu de codes sont actuellement opérationnels. La démarche suivie dans le développement de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un code éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délai raisonnable en utilisant un modèle de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale.

Différents modèles de comportement, plus ou moins sophistiqués, ont été implémentés dans Plaxis : élastique linéaire, Mohr-Coulomb, modèles de sol avec écrouissage ou spécifiques aux sols mous, etc. Il reste toutefois à l'ingénieur de choisir le modèle le mieux adapté au problème qu'il désire traiter en fonction des conditions rencontrées in situ.

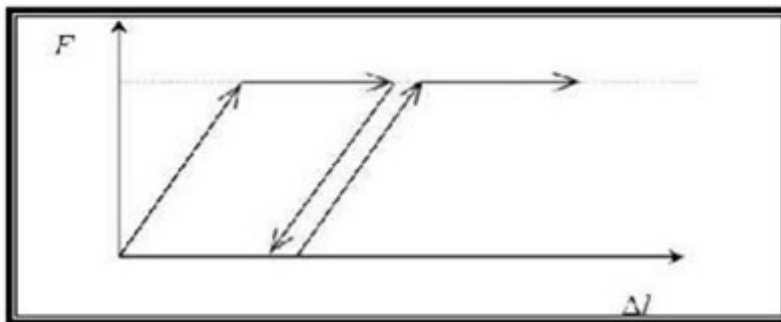
#### II-4-1- COMPORTEMENT ELASTOPLASTIQUE:

Le comportement élastoplastique (cas élastique parfaitement plastique) peut être représenté par un modèle monodimensionnel, en série un ressort de raideur  $K$ , pour symboliser l'élasticité du matériau, à un patin de seuil  $S_0$  (figure 2-2.).



**Figure 2-2:modèle monodimensionnel du comportement élastique parfaitement plastique.**

Le courbe effort déplacement ou contrainte déformation que l'on trouve est présentée sur la figure 2-3.



**Figure 2-3:représentation du comportement élastique parfaitement plastique.**

Lors d'une décharge, le comportement est élastique et réversible. La longueur de la déformation plastique est à priori indéterminée.

Le type de comportement représenté par les figures 2-2et 2-3 est un comportement élastique-plastique sans écrouissage. La figure 2-4 représente un comportement élastique- plastique avec écrouissage.



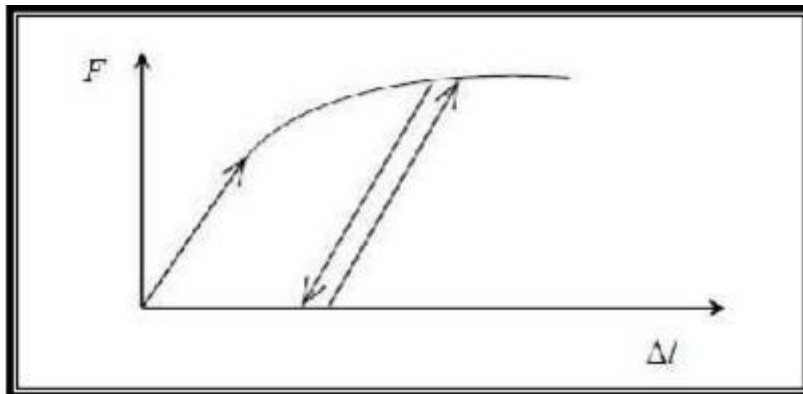


Figure 2-4:représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage.

#### II-4-2- Modèle élastique linéaire:

Le modèle élastique utilisé dans le Plaxis est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module de cisaillement  $G$  et le coefficient de poisson  $\nu$ . L'avantage de  $G$  est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ( $G_u = G$ ), ce qui n'est pas le cas des modules d'Young : le module de Young non drainé est supérieur au module de Young drainé. Il aurait pu sembler logique, si  $G$  est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser  $K$  comme second paramètre. D'une part  $K_u$  est défini (correspondant à  $\nu_u = 0.5$ ) et il est moins courant d'emploi,  $G$  est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques. On passe de  $G$  et  $E$  par la relation :

$$E = 2G (1 + \nu)$$

Le modèle élastique linéaire de PLAXIS peut être employé surtout pour modéliser les éléments de structures béton ou métal en interaction avec le sol. Il peut aussi être intéressant pour certains problèmes de mécanique des roches.

#### II-4-3- Modèle de Mohr-Coulomb:

Le modèle Mohr-Coulomb est un modèle souvent utilisé pour représenter la rupture par cisaillement dans les sols et les roches tendres. Cette loi se caractérise par une élasticité linéaire isotrope de Hooke, une surface de charge et un potentiel plastique. Les règles d'écoulement sont non associées. La fonction de charge est confondue avec le critère de rupture. A l'intérieure de la surface de rupture, le comportement du matériau est supposé élastique linéaire isotrope ou anisotrope. Sur la surface de rupture, le comportement est considéré comme parfaitement plastique.

## CH APITRE 2 : PRESENTATION DE L'OUTIL DE MODELISATION NUMERIQUE PLAXIS 2D

Dans l'espace de contraintes principales ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ), la surface de rupture est une pyramide de section hexagonale d'équation :

$$F(\sigma_{ij}) = \left| \sigma_1 - \sigma_3 \right| - (\sigma_1 - \sigma_3) \sin\varphi - 2c \cos\varphi$$

Où  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  représentent les contraintes extrêmes ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ). Cette pyramide est centrée autour de la trisectrice de l'espace des contraintes principales (1er invariant des contraintes) comme illustré (figure 2. -5.)

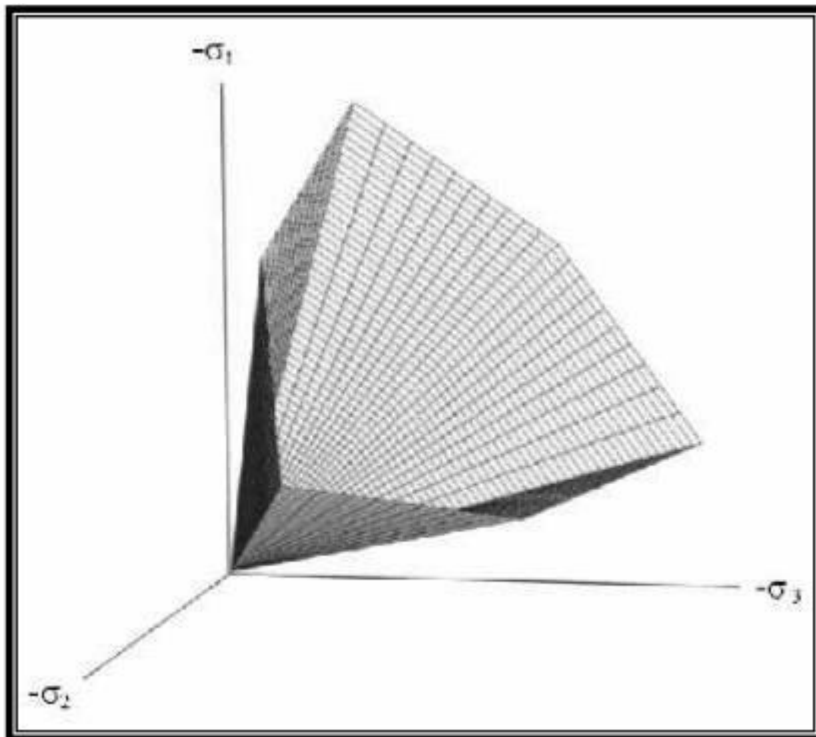


Figure 2-5: Surface de charge adoptée par le modèle MC pour un sol sans cohésion.

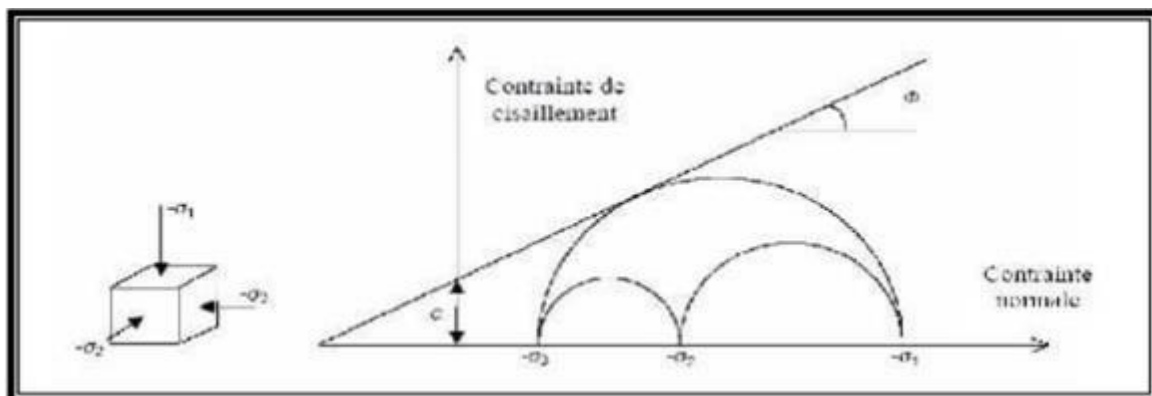


Figure 2-6: courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb

## CH APITRE 2 : PRESENTATION DE L'OUTIL DE MODELISATION NUMERIQUE PLAXIS 2D

Le modèle de Mohr-Coulomb utilisé dans Plaxis est un modèle de comportement simple et robuste. Il peut être considéré comme une approximation au premier ordre du comportement réel d'un sol.

Le modèle de Mohr-Coulomb constitue une approche acceptable pour analyser la rupture des sols dans les problèmes de fondation, stabilité de pentes, de tunnel et de soutènement.

Cependant, ce modèle suppose une rigidité constante pendant la phase de chargement alors qu'en réalité elle dépend à la fois du niveau de contrainte et du niveau de déformation du sol. De plus, expérimentalement il est possible d'observer des déformations irréversibles même pour des chemins de contraintes qui n'atteignent jamais la rupture. Or, un tel modèle n'est pas capable de reproduire ce phénomène.

Le modèle de Mohr-Coulomb nécessite cinq paramètres fondamentaux :

Deux paramètres élastiques : le module d'Young  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$  ;

Deux paramètres relatifs aux conditions à la rupture : la cohésion  $c$  et l'angle de frottement  $\varphi$  ;

Un paramètre relatif à la règle d'écoulement plastique, l'angle de dilatance  $\psi$

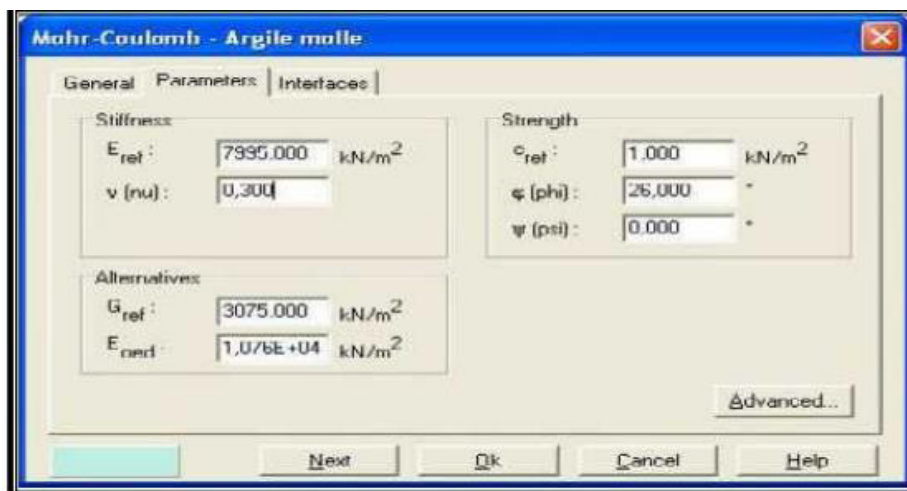


Figure 2-7:fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.

### a-Module d'Young:

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il paraît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au  $G_{max}$

mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux.

Il est conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un niveau de 50 % du déviateur de rupture.

L'utilisateur doit rester conscient de l'importance du choix du module qu'il prendra en compte. Il n'y a là rien d'étonnant et la même question se retrouve par exemple dans tout calcul classique de fondation, par exemple

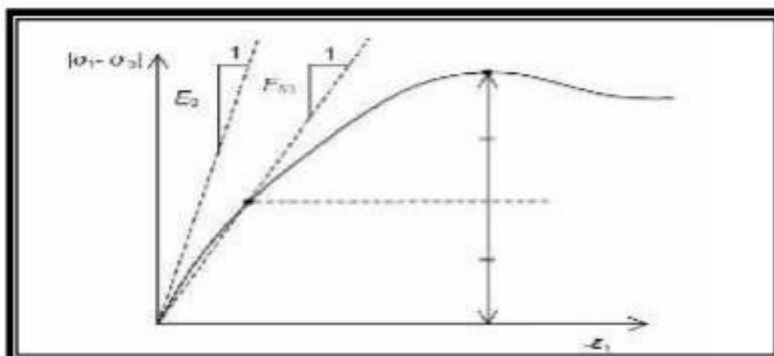


Figure 2-8: Définition du modèle à 50% de rupture.

Dans la boîte de dialogue des paramètres avancés, on peut aussi rentrer un gradient donnant la variation du module avec la profondeur.

### **b- Coefficient de Poisson:**

On conseille une valeur de 0,2 à 0,4 pour le coefficient de Poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure K0 ou chargement gravitaires). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de Poisson s'approche de 0,5 sans que cette valeur soit utilisable.

### **c- Angle de frottement:**

PLAXIS ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier.

On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à 35° peuvent considérablement allonger les temps de calcul. Il peut être avisé de commencer des calculs

avec des valeurs raisonnables d'angle de frottement, quitte à les augmenter dans la suite. Cette valeur de  $35^\circ$  est compatible avec les angles de frottement  $\varphi$  (à volume constant, au palier).

En peut déterminer l'angle de frottement à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

**d- Cohésion:**

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement flottants, une très faible cohésion (0,2 à 1 kPa) pour des questions numériques. Pour les analyses en non drainé avec  $\varphi_u = 0$ , PLAXIS offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur : ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur observée dans des profils au scissomètre ou en résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée avec le paramètre c-depth. Une valeur nulle donne une cohésion constante. Les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans les problèmes (typiquement en kPa/m).

**e- Angle de dilatance:**

Le dernier paramètre est l'angle de dilatance noté  $\psi$  ; c'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

$$\psi = \varphi - 30^\circ \quad \text{pour } \varphi > 30^\circ.$$

$$\psi = 0^\circ \quad \text{pour } \varphi < 30^\circ.$$

Le cas où  $\psi < 0^\circ$  correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique). La valeur  $\psi = 0^\circ$  correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité.

C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faibles ou moyenne sous contraintes assez fortes.

**f-Les contraintes de traction:**

La pyramide de Mohr-Coulomb permet des contraintes de traction. Celles-ci sont souvent peu réalistes pour les sols et il est possible de couper ces contraintes de traction (tension cut-off) ou de les diminuer (Tensile strength).

#### **II-4-4- CONCLUSION:**

Ce rapide tour d'horizon des certains modèles utilisés dans PLAXIS montre qu'il s'agit de modèles suffisamment simples pour qu'il soit possible d'en déterminer les paramètres avec une étude géotechnique classique ou avec des corrélations. Il n'y a dans ces modèles aucun paramètre de calage ou sans signification physique comme on en rencontre souvent dans des modèles plus sophistiqués. Souvent la détermination des paramètres nécessite des techniques d'optimisation.

L'utilisateur doit se concentrer sur deux choix : l'un est inhérent à la géotechnique en général, l'autre concerne la simulation numérique.

La détermination des paramètres géotechniques à entrer dans PLAXIS n'est pas différente d'un choix de paramètres de calcul "manuel" pour un calcul de tassement ou de stabilité : à partir d'essais parcellaires, il est indispensable d'arriver à ce que l'on pourrait appeler un modèle géotechnique de terrain. Certains des paramètres sont différents dans leurs expressions, mais toujours reliés à des paramètres géotechniques classiques. Le paramètre le moins "courant" est vraisemblablement l'angle de dilatance.

. Le choix du modèle de comportement dépend en fait du problème posé : soutènement, tassement de remblai, fondation sur sol en pente, tunnel : quel modèle de comportement utiliser pour quel problème géotechnique ? La question n'est pas simple car il n'existe pas de modèle-universel.

### III-1- INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous allons présenter l'ouvrage, les caractéristiques géologiques et Géotechniques ; implantation et définition et les l'effet de changement des caractéristiques (Rigidité de la paroi et buton a le déplacement et tassement de surface

### III-2 Présentation de l'ouvrage:

Le modèle retenu concerne une excavation soutenue d'une hauteur (H) égale à 40 m, de largeur (B) égale à 90 m à proximité d'une structure de type portique (figure 1). Le modèle adopté est composé de deux couches de sol, incluant dans la partie supérieure une couche de sol de qualité médiocre (de hauteur égale à 20 m), puis une couche de sol plus raide dans la partie inférieure. Le comportement mécanique des sols est décrit par le modèle élastique parfaitement plastique de Mohr-Coulomb. Le module de Young de la couche superficielle du terrain (de 0 à 20 m de profondeur) est supposé varier linéairement avec la profondeur. Les caractéristiques mécaniques sont données dans le tableau 1.

La paroi a une longueur  $L_p = 30$  m (figure 1) rigide. Elle est modélisée par des éléments poutres ayant une rigidité axiale  $EA = 7,5 \cdot 10^6$  kN et une rigidité à la flexion  $EI = 1,0 \cdot 10^6$  kN m<sup>2</sup>.

Une rangée de buton est disposée le long des parois pour assurer le maintien latéral et limiter les déformations. Le buton sont disposés selon la profondeur et la hauteur de l'excavation, la première rangée de buton étant située à un mètre en dessous la surface libre. La rigidité de référence ( $EA$ ) des butons est égale à  $2 \cdot 10^6$  kN.

Des analyses par éléments finis ont montré une forte influence de la profondeur totale du domaine sur les mouvements de terrain du fond de fouille (Bourgeois et al 2004). Ainsi pour limiter cet impact, La hauteur du domaine est fixée à 40m et sa largeur est égale à 90 m. Dans la modélisation bidimensionnelle, nous adoptons une profondeur du modèle équivalent à 5 fois l'espacement entre les butons selon la profondeur (suivant la direction z : direction perpendiculaire au plan de la figure3).

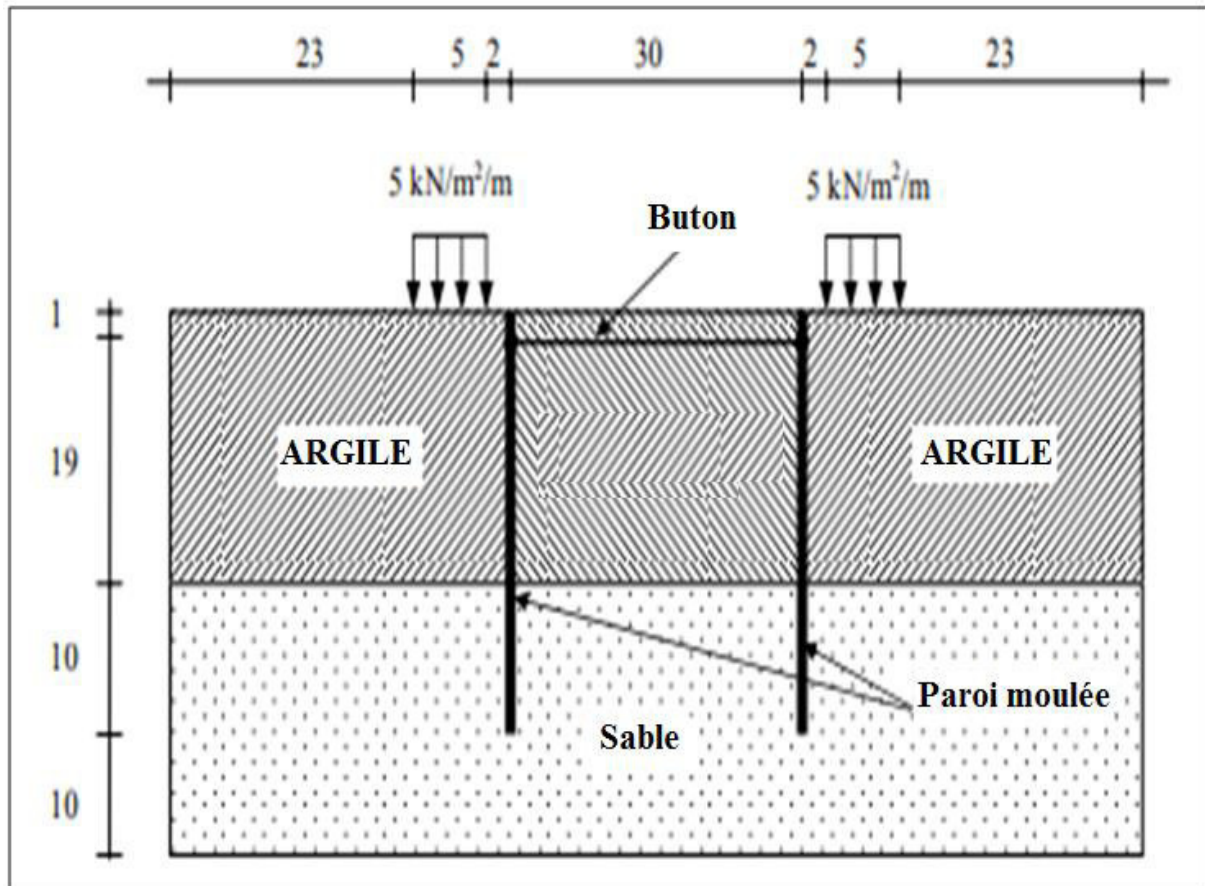


Figure 3 model de la géométrie de l'excavation submergée.



**Tableau 1 : Caractéristiques géotechniques des couches de sols**

| Paramètres             | Nom            | Couche argileuse | Couche sableuse | Unités              |
|------------------------|----------------|------------------|-----------------|---------------------|
| Poids volumique saturé | $\gamma_{sat}$ | 18               | 20              | KN / m <sup>3</sup> |
| Poids volumique humide | $\gamma_h$     | 16               | 17              | KN / m <sup>3</sup> |
| Module de Young        | E              | 10000            | 40000           | KN / m <sup>2</sup> |
| Coefficient de Poisson | $\nu$          | 0.35             | 0.3             |                     |
| Cohésion               | C'             | 5                | 1               | KN / m <sup>2</sup> |
| Angle de frottement    | $\phi$         | 25               | 32              | °                   |

**Tableau 2: Propriétés de la paroi**

| Paramètre              | Nom      | Valeur           | Unité                |
|------------------------|----------|------------------|----------------------|
| Rigidité normale       | EA       | $7.5 \cdot 10^6$ | KN/m                 |
| Rigidité de flexion    | EI       | $1 \cdot 10^6$   | KN/m <sup>2</sup> /m |
| Coefficient de Poisson | $\nu$    | 0                | -                    |
| Épaisseur équivalente  | <b>D</b> | 1.265            | M                    |

**Tableau3 : Propriété des butons**

| Paramètre               | Nom | Valeur         | Unité |
|-------------------------|-----|----------------|-------|
| Modèle de comportement  |     | Elastique      | -     |
| Rigidité normale        | EA  | $2 \cdot 10^6$ | KN    |
| Espacement dans le plan | Ls  | 5              | M     |

### III-3 Phasage et déroulement des travaux:

1. Initialisation des contraintes
2. Application de la charge de bâtiment.
3. Installation de la paroi moulée
4. Excavation de 2m
5. Mise en place du buton
6. Excavation de 10 m
7. Excavation jusqu'à une profondeur de 20 m

### III-4 Modèle numérique bidimensionnelles de l'ouvrage :

La modélisation numérique est effectuée en conditions bidimensionnelles de déformations planes en utilisant le logiciel PLAXIS et dans le cas Bidimensionnel avec le module PLAXIS [Vermeer and Brinkgreve, (1998)]. Le maillage retenu comporte 1000 éléments triangulaires à 15 nœuds dans le cas bidimensionnels et environs 7000 éléments dans le cas tridimensionnel. Des éléments d'interface le long de la surface de contact sol-paroi de soutènement sont considérés. Leur comportement est régi par le critère de Mohr-Coulomb avec des paramètres fournis en tableau

Le déroulement du calcul se fait suivant les étapes suivantes :

- Mise en place des parois de soutènement par activation des éléments de poutres, (La perturbation de l'état des contraintes initiales dans le terrain par la mise en place des parois n'est pas prise en compte dans ce travail),

- Application de la force uniformément répartie sur la structure (pré chargement du terrain) avant excavation
- Phases d'excavation par suppressions successives des couches de sol d'un mètre d'épaisseur, et activation des butons.

### III-4.1 maillage:

Pour faire le maillage dans le plan, nous avons utilisés l'axe de symétrie (c'est-à-dire, seule la moitié de la structure est modélisée) puisque l'structure a un axe de révolution (figure :2-1), et des éléments triangulaires à 15 nœuds par élément, chaque nœud peut avoir deux degrés de liberté (deux déplacements suivant  $x$  et  $y$  respectivement), pour trouver des résultats plus précis.

La génération du maillage sera faite automatiquement

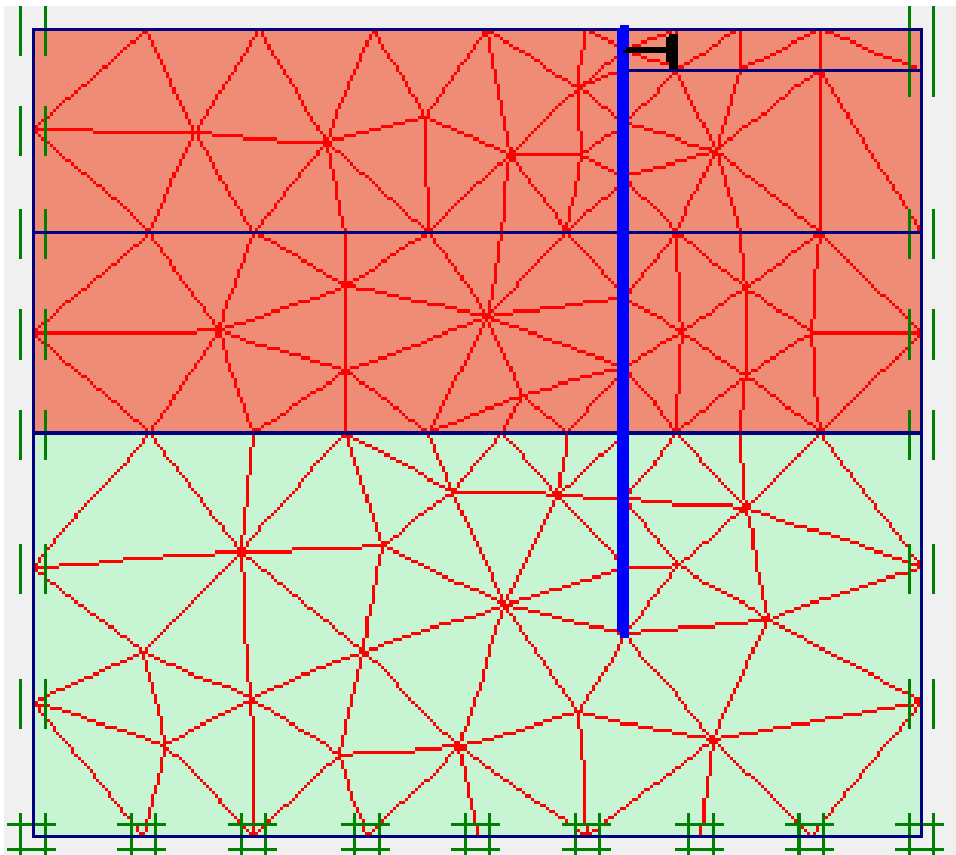


Figure 3-1: Maillages retenus maillage bidimensionnel

## III-4.2 Conditions aux limites:

Les conditions aux limites imposées à la structure sont les suivantes :

- ✓ Le bas de l'éprouvette est totalement bloqué dans toutes les directions, rotation et translation par rapport aux axes principaux  $x$  et  $y$ .
- ✓ Les deux côtés de l'éprouvette sont bloqués en rotation et translation par rapport à l'axe  $x$ .
- . Lors du calcul, le logiciel Plaxis va distribuer cette charge surfacique sur les nœuds pour avoir des charges nodales (figure 2-2).

Avec les conditions aux limites appliquées (figure 3-2), la structure est considéré

comme une couche de sol couvrant une large surface sont chargées verticalement, c'est à-dire seule la déformation verticale est nulle ( $\varepsilon_y \neq 0$ ), c'est la modélisation la plus réaliste.

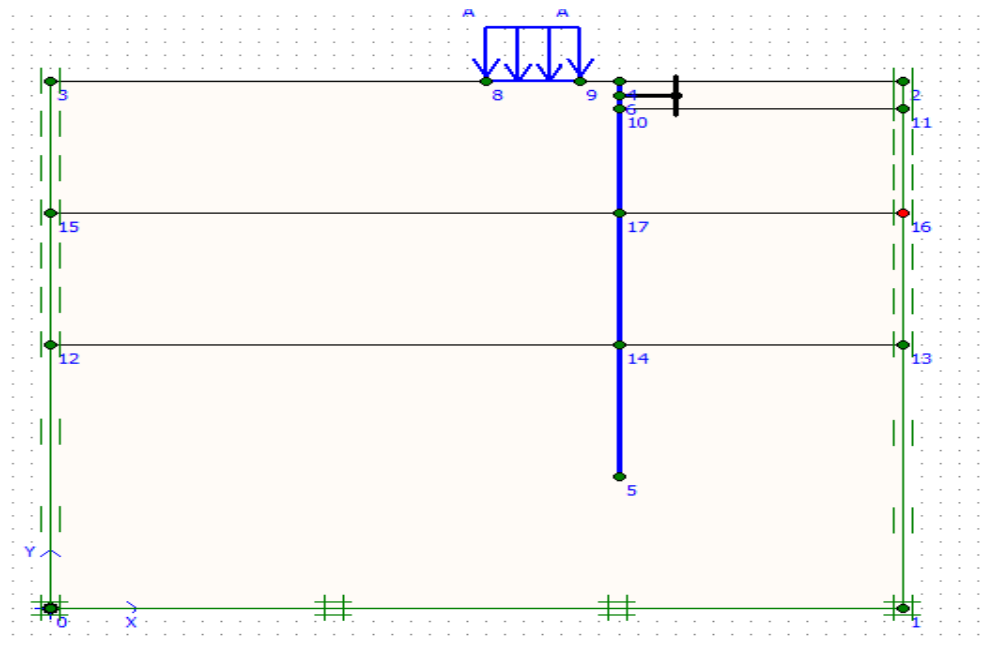


Figure 3-2: Conditions aux limites

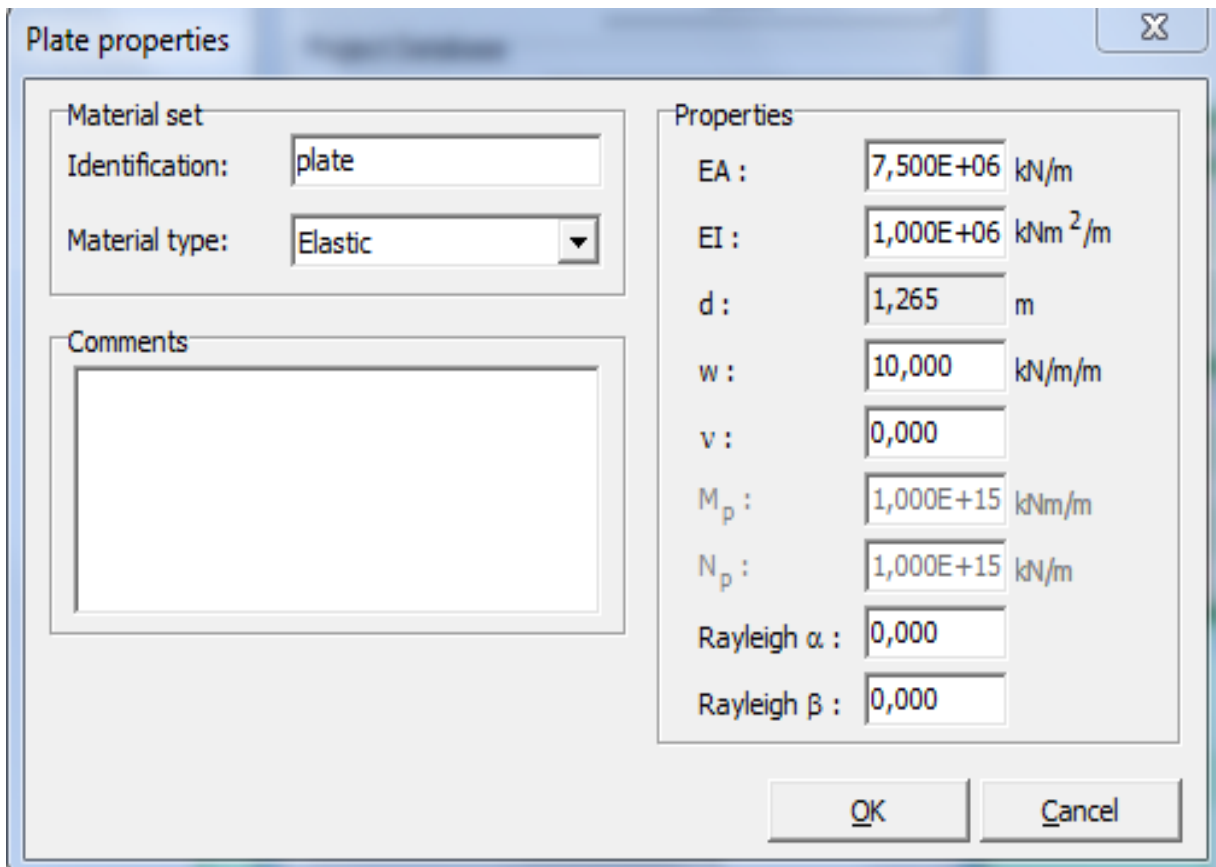


Figure 3-3: les paramètres des matériaux sur la fenêtre de propriété plaxis 2D

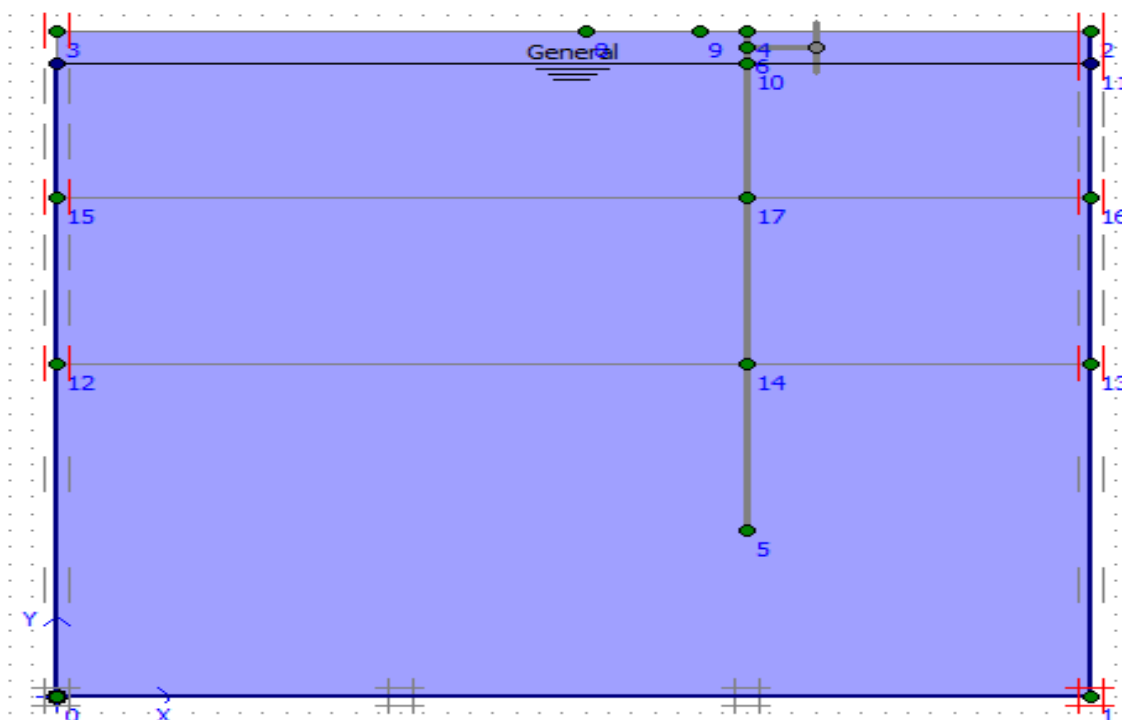


Figure 3-4 : Les conditions initiales

III .5 Analyse des résultats numériques

III .5 -1-Déformation du maillage

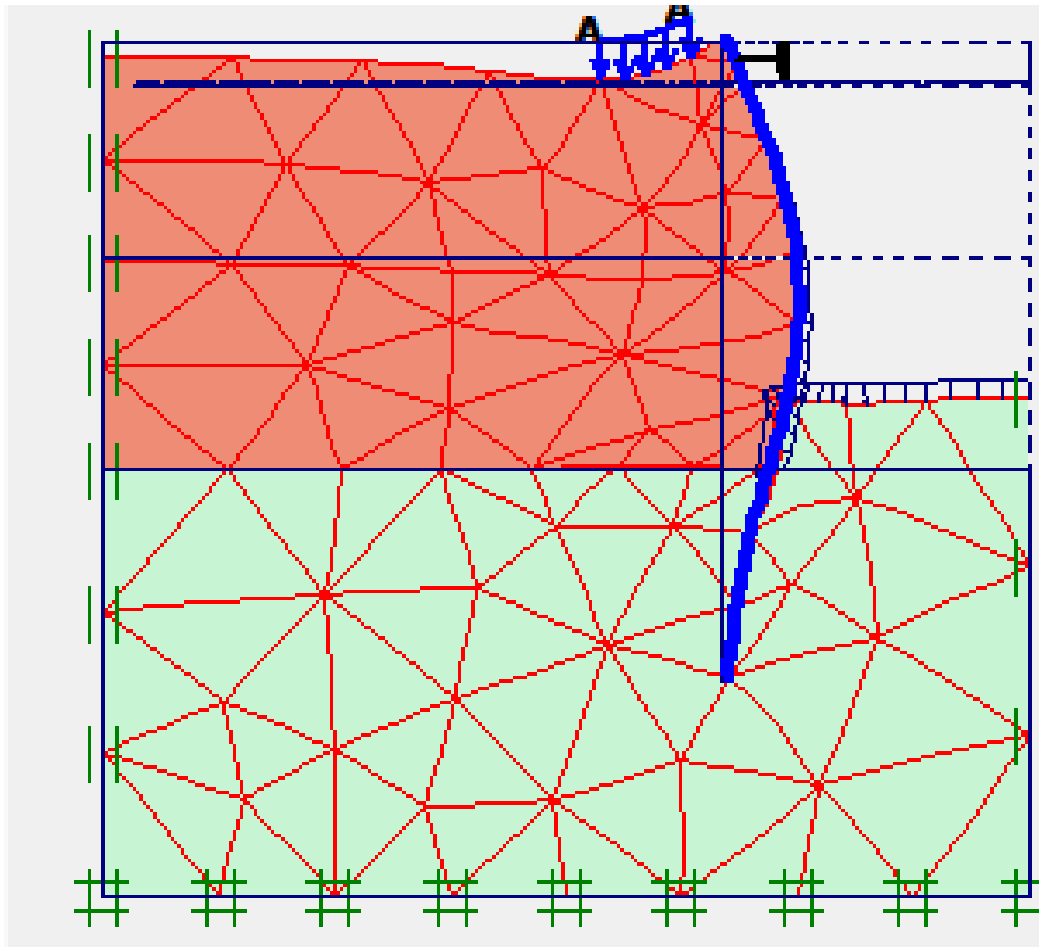


Figure 3-5 Déformations du maillage

III .5 .2 Tassement de terrain derrière la paroi:

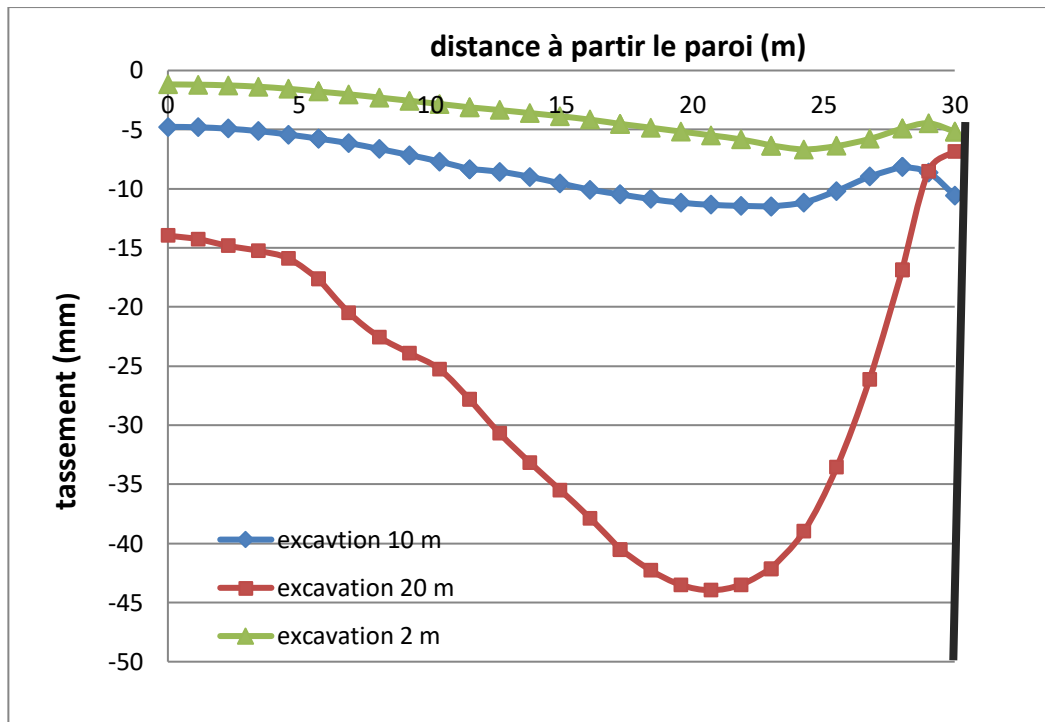


Figure 3-6 : Tassement du sol derrière la paroi dans des différentes phases d'excavation.

La figure montre le tassement de terrain derrière la paroi de soutènement durant les différentes phases d'excavation, à la fin des travaux on constate que le tassement maximal est de 43.96 mm, et il est situé à une distance 9 m à partir de la paroi (soit à 0.5 H), ce tassement représente 0.22 % de la profondeur de l'excavation.

III .5 .3 déplacement horizontale de la paroi

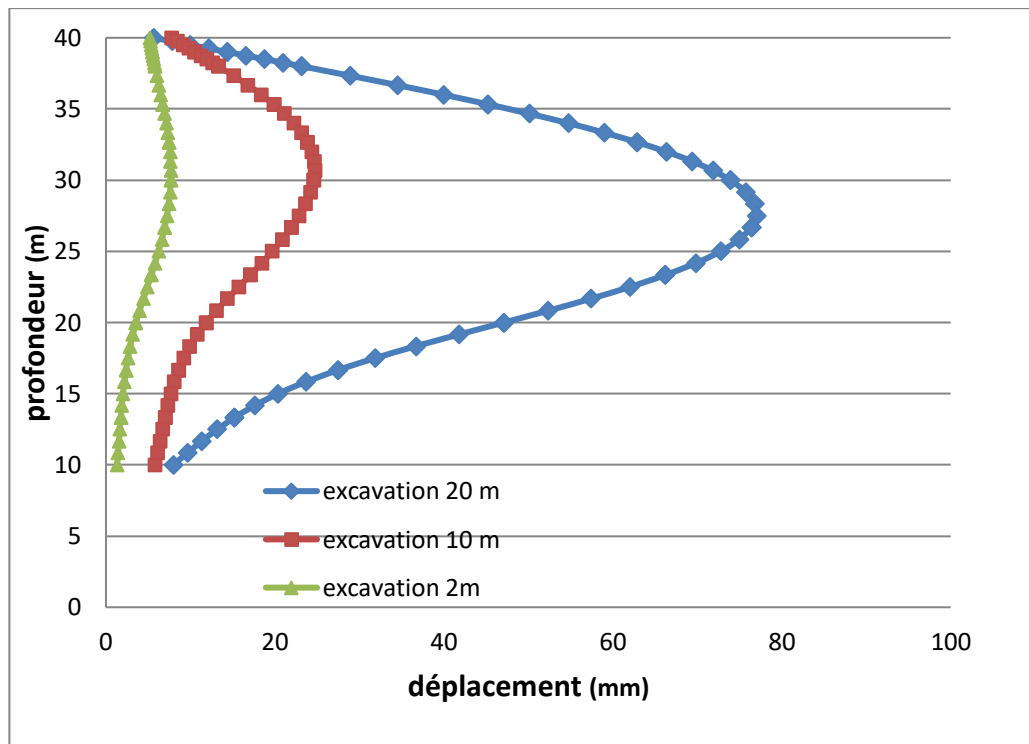


Figure 3-7 :Déplacement horizontal de la paroi au cours des différentes phases de réalisation.

La figure montre le déplacement horizontal de la paroi de soutènement en fonction de la profondeur au cours des différentes phases de réalisation. Nous constatons que la valeur maximale du déplacement horizontal de la paroi à la phase finale d'excavation est de 77.018 mm c'est-à-dire 0.38 % de la profondeur de l'excavation et il est situé a une profondeur de 12.5 m a partir de la tête de la paroi.



III- 5-4 Moment de flexion :

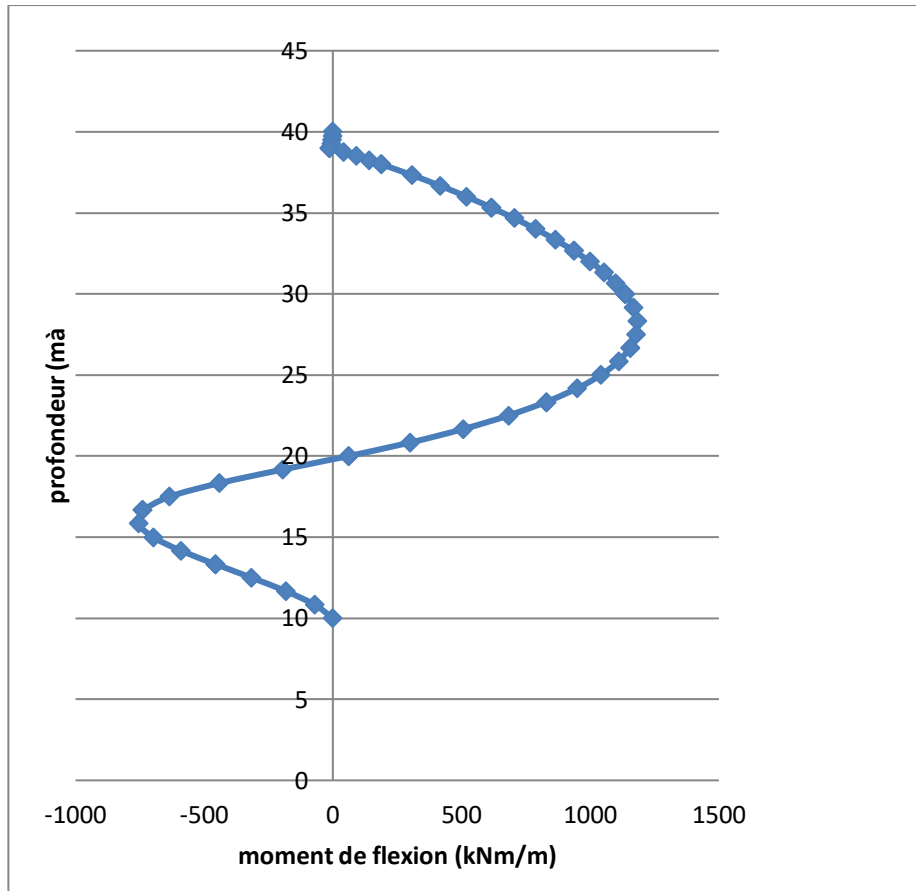


Figure 3-8 moments de flexion (phase final).

D'après la figure 3.8, on constate que le moment max est  $1.8 \cdot 10^3$  kNm/m à une profondeur de 12.5 m (le point de déplacement latéral maximal)

### III- 5-5 Efforts tranchant dans la paroi

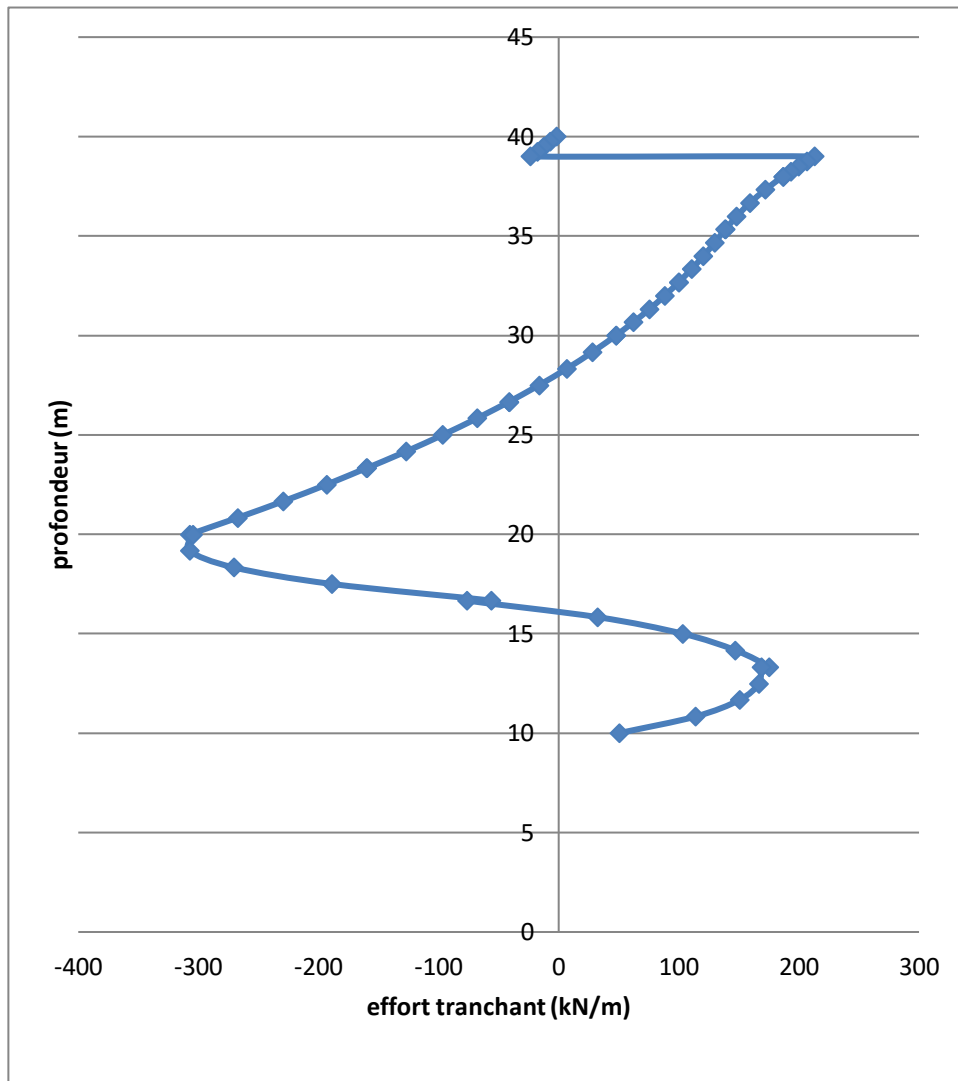


Figure3-9 : Efforts tranchant dans la paroi

D'après la figure on constate que l'effort maximal est (-307 kN/m) à la profondeur de 20m (le point ou le moment de flexion a été nul).

### III- 5-6 Efforts dans le buton :

Tableau4 : Efforts dans le buton

| Phase          | Effort dans le buton (KN/m) | Effort total (KN) |
|----------------|-----------------------------|-------------------|
| Excavation 10m | -134.086                    | -670.43           |
| Excavation 20m | -236.437                    | -1182.185         |

D'après les résultats obtenus on remarque que l'effort de compression dans le buton en phase d'excavation finale augmente de 76% par rapport à la phase précédente (excavation de 10 m).

### III- 5-7 Conclusion :

D'après les résultats numériques obtenus de cette étude on peut tirer les points suivants :

- la valeur maximale du déplacement horizontal de la paroi à la phase finale d'excavation représente 0.38 % de la profondeur de l'excavation et il est situé à une profondeur de 0.62 H à partir de la tête de la paroi.
- le tassement maximal est de 43.96 mm, et il est situé à une distance 9 m à partir de la paroi (soit à 0.5 H), ce tassement représente 0.22 % de la profondeur de l'excavation.
- D'après les résultats obtenus on remarque que l'effort de compression dans le buton en phase d'excavation finale augmente de 76% par rapport à la phase précédente (excavation de 10 m).

## 4-1 Introduction

Dans ce chapitre on va faire une étude paramétrique sur l'influence de la rigidité de la paroi ainsi que l'influence de la rigidité du buton sur le comportement de l'ouvrage

## 4-2 Effets de la rigidité de la paroi

Pour voir l'influence de la rigidité de la paroi sur le comportement de l'ouvrage, on a fait varier la rigidité de la manière suivante (du flexible au très rigide) tout en maintenant la rigidité du buton constante

-Rigide= la rigidité \*10

-Très rigide = la rigidité \*100

-Flexible = la rigidité /3

### 4-2-1 Effets sur le déplacement horizontal de la paroi

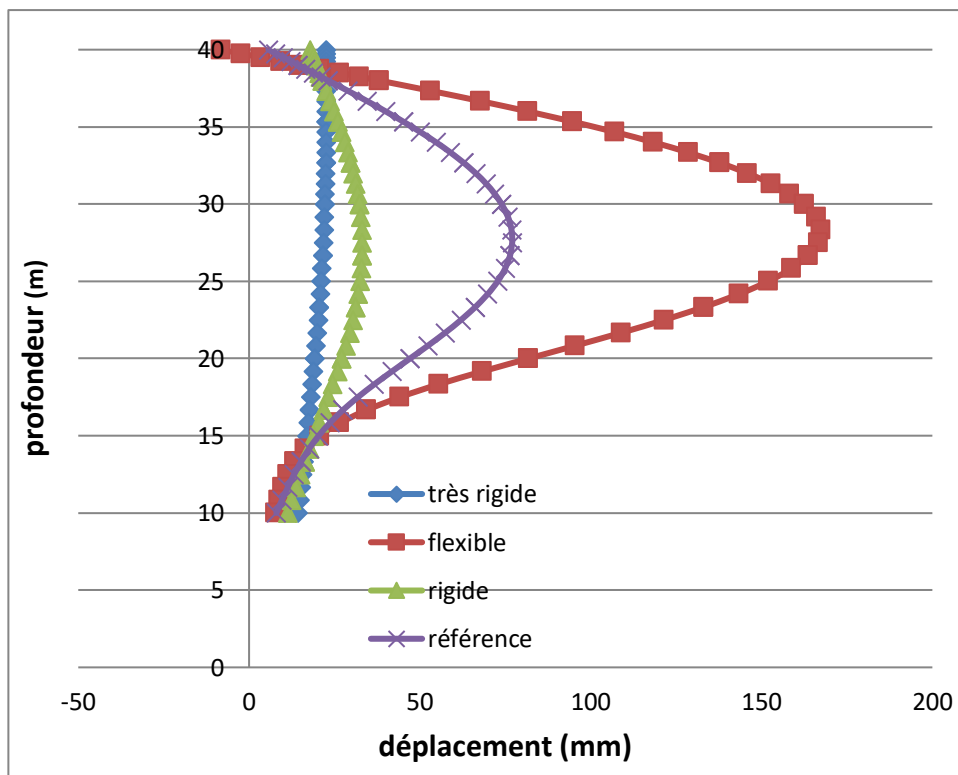


Figure 4-1 Effet de la rigidité de la paroi sur le déplacement horizontal

La figure montre que le déplacement horizontal de la paroi augmente lorsque la rigidité de la paroi de soutènement diminue, nous notons que lorsque la rigidité de la paroi diminue de trois fois de sa valeur de référence, le déplacement est augmenté de 117.9%.

## Chapitre 4 : Analyse paramétrique

Lorsque la rigidité de la paroi augmente de 10 fois (rigide) le déplacement horizontal de la paroi diminue de 133 %. En revanche, lorsque la rigidité de la paroi augmente de 100 fois (très rigide) le déplacement horizontal de la paroi ne diminue que de 50%.

Ainsi, l'augmentation de la rigidité de la paroi au delà de dix fois n'aura pas d'effet sensible sur les déplacements.

La position de déplacement horizontal maximal de la paroi n'est pas affectée par la variation de la rigidité de la paroi.

### 4-2-2 Effets sur le tassement

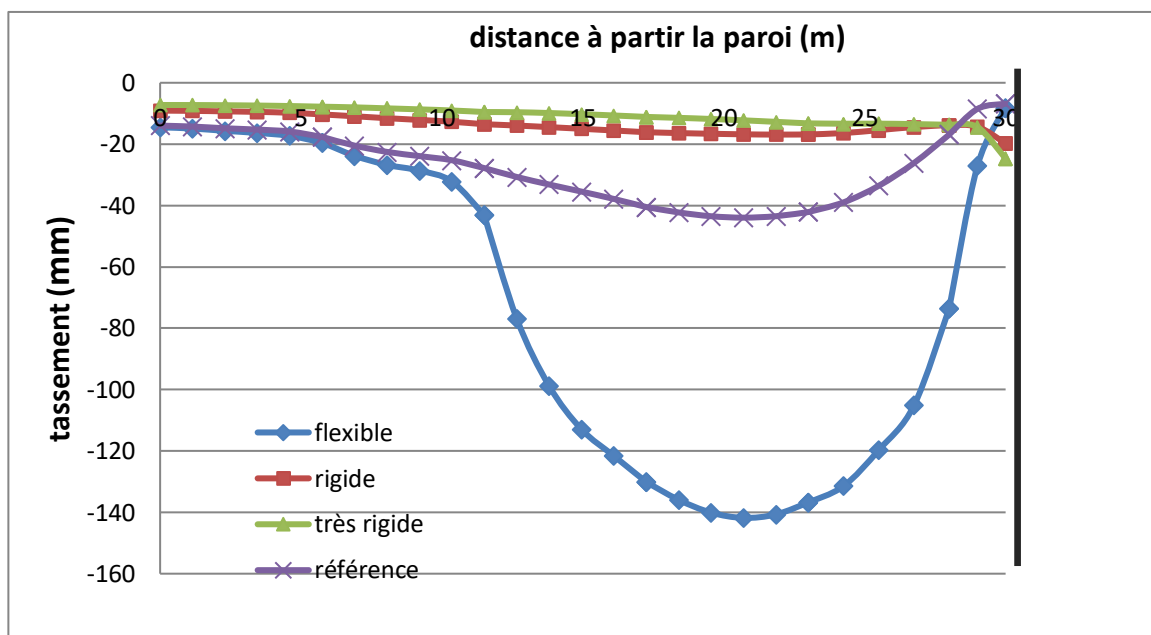


Figure 4-2: effet de la rigidité de la paroi sur le tassement du terrain derrière la paroi

La figure montre que le tassement augmente lorsque la rigidité de la paroi de soutènement diminue, nous notons que lorsque la rigidité de la paroi diminue de trois fois que sa valeur de référence, le tassement est augmenté de 225%.

Lorsque la rigidité de la paroi augmente de 10 fois (rigide) le tassement diminue de 81 %. En revanche, lorsque la rigidité de la paroi augmente de 100 fois (très rigide) le tassement diminue de 18.6%. Ainsi, l'augmentation de la rigidité de la paroi au delà de dix fois n'aura pas d'effet sensible sur les déplacements.

La position de tassement maximal n'est pas affectée par la variation de la rigidité de la paroi.

### 4-3 Variation de la rigidité du buton

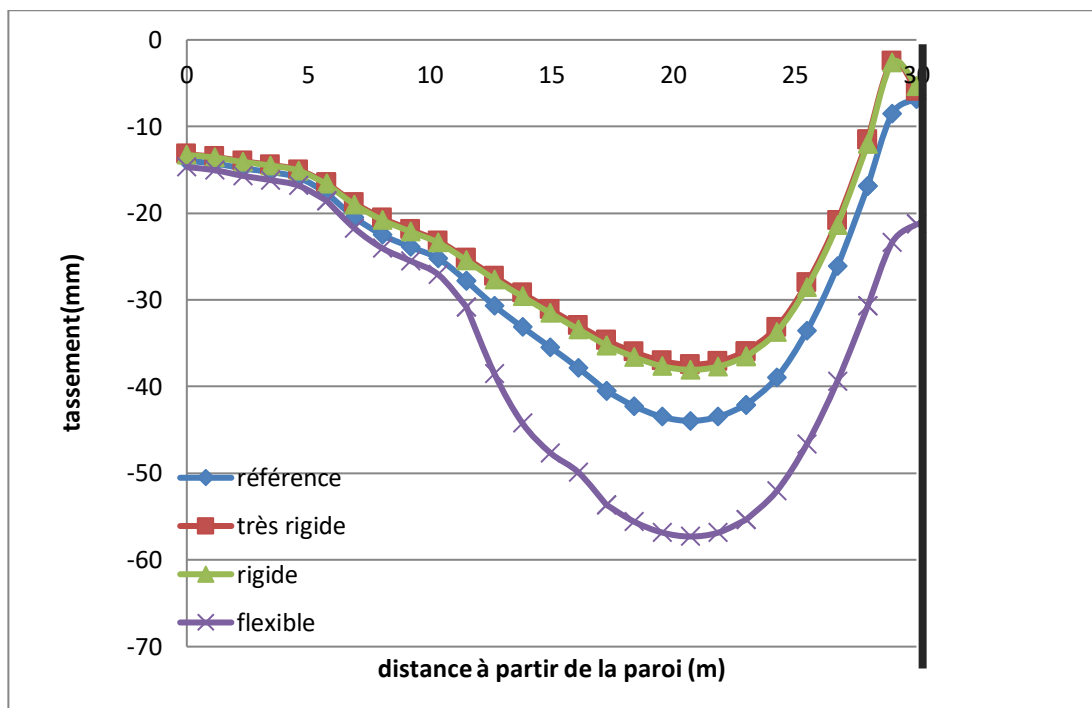
Pour voir l'influence de la rigidité du buton sur le comportement de l'ouvrage, on a fait varier la rigidité de la manière suivante (du flexible au très rigide) tout en maintenant la rigidité de la paroi constante (avec rigidité de paroi référence).

-Rigide= la rigidité \*10

-Très rigide = la rigidité \*100

-Flexible = la rigidité /3

#### 4-3-1 Effets sur le tassement



**Figure 4-3 Effets de la variation de la rigidité du buton sur le tassement du terrain derrière la paroi.**

La figure montre que le tassement augmente lorsque la rigidité du buton diminue, nous remarquons que lorsque la rigidité du buton diminue de trois fois que sa valeur de référence, le tassement est augmenté de 30 %.

Lorsque la rigidité du buton augmente de 10 fois (buton rigide) le tassement diminue de 10%. En revanche, lorsque la rigidité de la paroi augmente de 100 fois (buton très rigide) le tassement reste presque inchangeable.

Ainsi, l'augmentation de la rigidité du buton au delà de dix fois n'aura pas d'effet sensible sur les tassements.

La position de tassement maximal n'est pas affectée par la variation de la rigidité du buton.

### 4-3-2 Effets sur le déplacement horizontal de la paroi

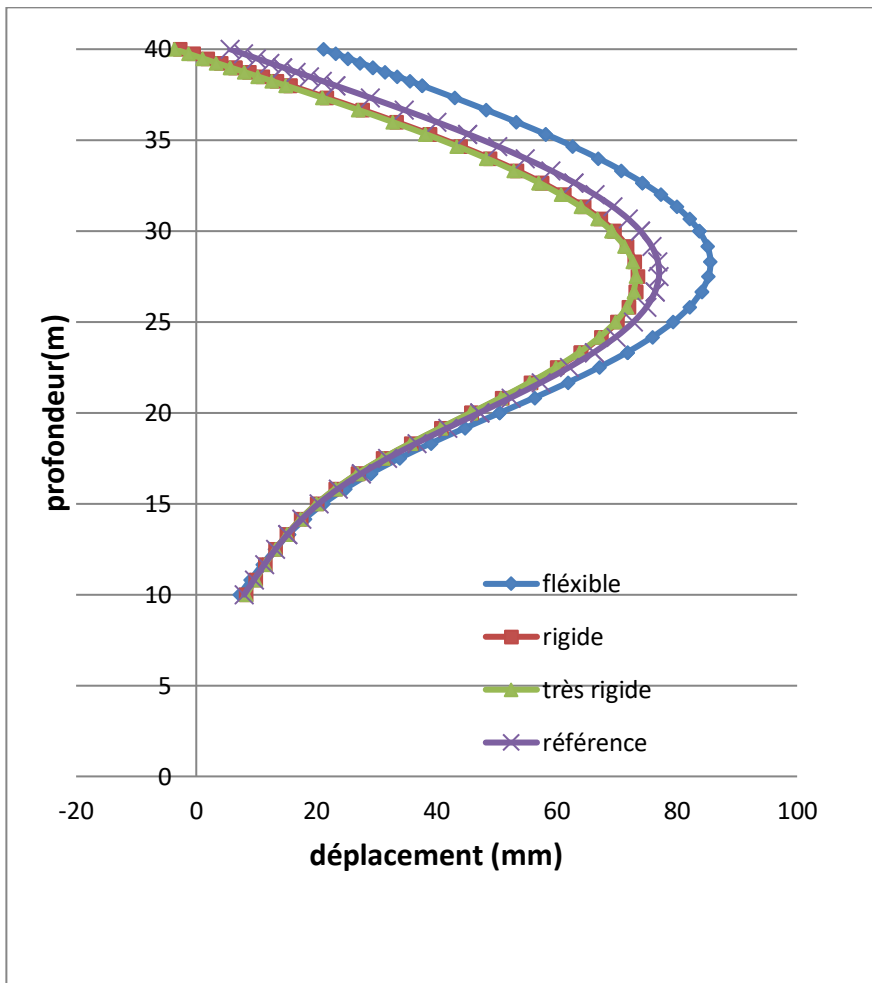


Figure 4-4 Effet de la rigidité du buton sur le déplacement horizontal

La figure montre que le déplacement horizontal de la paroi augmente lorsque la rigidité du buton diminue, nous constatons que lorsque la rigidité du buton diminue de trois fois que sa valeur de référence, le déplacement est augmenté de 11%.

Lorsque la rigidité du buton augmente de 10 fois (buton rigide) le déplacement horizontal de la paroi diminue seulement de 5%. En revanche, lorsque la rigidité du buton augmente de 100 fois (buton très rigide) le déplacement horizontal de la paroi reste presque invariant.

En conséquence, l'augmentation de la rigidité du buton au delà de dix fois n'aura pas d'effet sensible sur les déplacements.

La position de déplacement horizontal maximal de la paroi n'est pas affectée par la variation de la rigidité du buton.



## Conclusion générale

Notre étude représente une analyse numérique bidimensionnelle d'une excavation profonde submergée butonnée de profondeur de 20 m et de largeur 30 m. La paroi moulée utilisé est de 30 m de profondeur et de 1.265 m d'épaisseur.

D'après les résultats obtenus on a pu tirer les conclusions suivantes :

- la valeur maximale du déplacement horizontal de la paroi à la phase finale d'excavation représente 0.38 % de la profondeur de l'excavation et il est situé à une profondeur de 0.62 H à partir de la tête de la paroi.
- le tassement maximal est de 43.96 mm, et il est situé à une distance 9 m à partir de la paroi (soit à 0.5 H), ce tassement représente 0.22 % de la profondeur de l'excavation.
- D'après les résultats obtenus on remarque que l'effort de compression dans le buton en phase d'excavation finale augmente de 76% par rapport à la phase précédente (excavation de 10 m).

## Références bibliographiques

Addenbrooke T.I., Potts D.M., Dabee B. (2000) Displacement flexibility for multipropped retaining wall design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , 126

(8), 718-726.

Bourgeois E., Mestat Ph., Nguyen P.D., Marten S., Delattre L. (2004) Retours d'expérience sur la modélisation numérique des parois moulées par éléments finis. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Lille.

Bureau de normalisation NBN EN 1538 Exécution des travaux géotechniques spéciaux. Parois moulées. Bruxelles, NBN, 2010.

Bureau de normalisation NBN EN 1992-3 Eurocode 2. Calcul des structures en béton. Partie 3 : silos et réservoirs. Bruxelles, NBN, 2006.

Clough G.W., O'Rourke T.D. (1990) Construction- induced movements of in situ walls. Proceeding, Design and Performance of Earth Retainings Structure, ASCE Special Conference, Ithaca, New York, 439-470.

Fadi HAGE CHEHADE<sup>1</sup>, Walid CHEHADE<sup>1</sup>, Hussein MROUEH<sup>2</sup>, Isam SHAHROUR<sup>2</sup>

Hage Chehade F., Barake M., Chehade W., Mroueh H., Shahrou I. (2005) Etude numérique de l'interaction excavation – fondations superficielles. Symposium International sur les Géotechniques dans les Villes, Lille Villeneuve d'Ascq, France.

Hage Chehade F., Chehade W., Mroueh H., Shahrou I. (2008) Réponse d'une structure en surface adjacente à une excavation profonde : approche numérique. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG'08), Nantes, 18-20 juin 2008, France.

LGCGE, Université de Lille 1-Sciences et Technologies, France<sup>2</sup>.

Long M.. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 127, No. 3, 203-224, 2001

Marcu A., Popa H. (2004) La surveillance du comportement d'une structure de soutènement et des bâtiments avoisinants dans la ville de Bucarest. Int. Conf. on Geotechnical Design, Beyrouth, 141-146.

Moorman C. (2004) Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new world wide database. *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, 44(1), 87-98, February 2004,)

Ng C.W.W., Lings M.L. Effects of modeling soil nonlinearity and wall installation on back- analysis of deep excavation in stiff clay. *Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 121, No. 10, 687-695, 1995  
Schneebeli G. Les parois moulées dans le sol. Eyrolles, éditeur Paris. 87, 1972

Ou C.-Y., Liao J.-T., Cheng W. L. (1993) Building response and ground movements induced by a deep excavation. *Geotechnique* 50(3), 209-220.

Sébastien Burlon - CETE NP

Modélisation numérique des mouvements du sol induits par des excavations et des injections de compensation

.Vermeer P.A., Brinkgreve R.B.J. (1998) PLAXIS Finite element code for soil and rock analyses. version 7, Rotterdam : Balkema.

*Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2010 - Grenoble 7-9 juillet 2010*

Université Libanaise, Centre de modélisation – PRASE – EDST – Beyrouth, IUT (Saida) – Liban

