

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

N° :



**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

**FILIERE : GENIE CIVIL**

**OPTION : Géotechnique**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par: Magoura nadjib**

**Intitulé**

**Comportement d'un écran de soutènement  
renforcé par des armatures métalliques**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Pr.RAHMOUNI zine el Abidine	Université de M'sila	Président
Mr.TALLAH naoui	Université de M'sila	Rapporteur
Mr.LAHMADI azzeddine	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2016 /2017**

## **REMERCIEMENTS**

*Je ne remercie jamais assez ALLAH, le tout puissant de nous avoir permis de mener à bien ce modeste travail.*

*En premier lieu, nous remercions **Mr. KHEMISSA Med**, professeur à l'Université de M'Sila et **Mr. TALLAH NAOUI** Maitre Assistant à l'Université de M'sila qui ont bien voulu proposer le thème de Master, pour son aide précieux, sa disponibilité durant toute la durée de notre projet.*

*Je remercie également les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre travail.*

*A tous nos enseignants à toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je dirai merci*

**DEDICACES**

*En signe de respect et de reconnaissance,  
Je dédie ce modeste travail à  
Toute la famille, mon père  
Ma chère mère pour sa patience et ses sacrifices.  
A mes frère et mes deux soeurs, à  
Tous mes amis (es).*

*Toute la promotion du Master spécialité géotechnique  
2016-2017*

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<b>CHAPITRE I : « generalites sur les ouvrages des soutènements »</b>	
I.1. Les ouvrages des soutènements.....	2
I.2. Les Classes d'ouvrages de soutènement .....	2
I.3. Les différents types des ouvrages des soutènements .....	3
I.4. Généralités sur les palplanches .....	5
I.4.1. Les rideaux de palplanches (figure 1.3).....	5
I.5. Les type de palplanches .....	6
I.5.1. Palplanches en porte à faux .....	6
I.5.2. Rideaux plans (rideaux simples).....	6
I.6. L'usage de palplanches.....	7
I.7. Mise en place de palplanches .....	7
I.8. Dimensionnement d'un rideau de palplanche .....	7
<b>CHAPITRE II : « les methodes de calcul des rideaux et des parois »</b>	
II.1. Généralités sur les méthodes de calcul des rideaux et des parois .....	9
II.2. Méthodes de calcul aux états limites.....	12
II.2.1. Rideau ancré. Simplement buté en pied .....	12
II.2.2. Rideau non ancré en tête et encastré en pied .....	14
II.2.3. Cas des rideaux fichés dans l'argile .....	16
II.3. Méthode des éléments finis .....	17
II.3.1. Principes généraux de modélisation .....	17
II.3.2. Notion d'éléments de massif .....	18
II.3.3. Définition de la géométrie du modèle et construction de maillage .....	18
II.3.4. Modélisation du sol et choix des paramètres .....	18
II.3.5. La modélisation de l'écran .....	19
II.3.6. Modélisation du phasage d'opération et la conduite des calculs.....	19
<b>CHAPITRE III : « presentaien de l'outil numerique de calcul »</b>	
III.1. INTRODUCTION.....	20
III.2. Présentation Du Logiciel .....	20
III.3. Les points forts de PLAXIS .....	21
III.4. Les sous-programmes de PLAXIS .....	21

III.4.1.	Le programme d'entrée de données (Input) .....	21
III.4.2.	Le programme de calcul (Calculations).....	22
III.4.3.	Le programme de résultats (Output).....	23
III.4.4.	Le programme courbes (Curves) .....	23
III.5.	Modèles de comportement de PLAXIS .....	24
III.5.1.	Modèle élastique linéaire:.....	24
III.5.2.	Modèle de Mohr-Coulomb: .....	24
III.5.3.	Modèle pour les roches fracturées (Jointed Rock Model):.....	24
III.5.4.	Modèle de sol avec écrouissage (Hardening Soil Model): .....	25
III.5.5.	Modèle pour les sols mous (Soft Soil Model): .....	25
III.5.6.	Modèle pour les sols mous avec fluage (Soft Soil Creep Model): .....	25
III.5.7.	Modèle défini par l'utilisateur: .....	25
III.6.	Conclusion.....	26

#### **CHAPITRE IV : « établissement d'un modèle de calcul »**

IV.1.	INTRODUCTION.....	28
IV.2.	Dimensions géométriques du modèle numérique .....	29
IV.2.1.	La géométrie du modèle .....	29
IV.3.	Caractéristiques des matériaux .....	30
IV.3.1.	Propriétés des couches des sols .....	30
IV.3.2.	Les caractéristiques des éléments structuraux .....	31
IV.4.	Les conditions aux limites.....	31
IV.5.	Génération du maillage .....	32
IV.6.	Conditions initiales.....	32
IV.6.1.	Conditions hydrauliques (figure 4.4).....	32
IV.6.2.	Contraintes initiales (figure 4.5).....	33
IV.7.	Procédure de calcul .....	34
IV.8.	Les principaux résultats.....	35
IV.9.	Résultats de la phase 5 .....	36
IV.9.1.	Déformation de maillage .....	36
IV.9.2.	Déformation des éléments structuraux .....	36

#### **CHAPITRE V : « étude paramétrique »**

V.1.	Introduction .....	38
V.2.	Etude de l'Effet des interfaces .....	38
V.2.1.	influence des interfaces sur le comportement du palplanche .....	39

V.2.2.	influence des interfaces sur le comportement du tirant .....	42
V.3.	Effet des paramètres géotechniques .....	43
V.3.1.	<i>Cohésion <math>c</math></i> .....	43
V.3.2.	<i>Angle de frottement <math>\varphi</math></i> .....	45
V.3.3.	<i>Module d'Young <math>E</math></i> .....	47
V.3.4.	<i>Coefficient de Poisson <math>\nu</math></i> .....	49
VI.	Conclusion générale .....	53

# LISTE DES FIGURES

Figure 1.1- Mur de soutènement en gabion .....	2
Figure 1.1- Mur de soutènement en béton armé .....	3
Figure 1.2- Mur en terre armée .....	3
Figure 1.3- rideaux de palplanches .....	5
Figure 1.4- Rideaux plans (Bousquet, 1980). .....	6
Figure 2.1-comportement d'un rideau ancré en tete, soumis a une force horizontale croissante..	9
Figure 2.2-rideau de palplanches soumis à une distribution de pression normale $p(z)$ .....	10
Figure 2.3 -incompatibilité entre l'hypothèse du module de réaction et le développement d'un effet de voute.....	11
Figure 2.4-rideau ancré en tête, simplement buté en pied.....	13
Figure 2.5-calcul à état limite d'un rideau encastré non ancré (sol pulvérulent).....	14
Figure 2.6- hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré .....	14
Figure 2.7- hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré .....	15
Figure 2.8- Hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré.....	16
Figure 2.9- pression des terres à court terme sur un rideau battu dans une argile homogène....	17
Figure 2.10- Zones en plasticité aux environs de soutènement d'excavation.....	19
Figure 3.1- Différents programmes de calcul en PLAXIS 2D. ....	21
Figure 3.2- Le programme d'entrée de données.....	22
Figure 3.3- Le programme de calcul (Calculations) .....	22
Figure 3.4- Le programme de résultats (Output).....	23
Figure 3.5- Le programme courbe (Curves).....	23
Figure 3.6- Représentation monodimensionnel du comportement élasto-plastique.....	26
Figure 4.1- Dimensions géométriques du modèle : $(55 \times 45) \text{ m}^2$ .....	29
Figure 4.2- Vue en coupe du projet.....	30
Figure 4.3- Maillage du projet.....	32
Figure 4.4- Conditions hydrauliques initiales .....	33
Figure 4.5- Génération des contraintes initiales. ....	33
Figure 4.6- phases de calcule. ....	34
Figure 4.7- etape de excavation et mise les clous.....	35
Figure 4.8- Phase 5 : déformation de maillage .....	36
Figure 4.9- parement : résultats de la phase 5. ....	37
Figure 5.1- influence des interfaces sur les déplacements horizontaux .....	40
Figure 5.1- influence des interfaces sur sur les moment fléchissants.....	41
Figure 5.2- influence des interfaces sur sur les contraintes tangentielle .....	42
Figure 5.1- influence de cohésion sur les déplacements horizontaux.....	44
Figure 5.2- influence de cohésion sur les moment fléchissants .....	44
Figure 5.3- influence de L'angle de frottement sur les déplacements horizontaux .....	46
Figure 5.4- influence de L'angle de frottement sur les moment fléchissants.....	46
Figure 5.5- influence de module d'Young sur les déplacements horizontaux .....	48

<i>Figure 5.6- influence de module d'Young sur les moment fléchissants .....</i>	<i>49</i>
<i>Figure 5.7- influence de Coefficient de Poisson sur les déplacements horizontaux.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 5.8- influence Coefficient de Poisson sur les moment fléchissants .....</i>	<i>50</i>

# **LISTE DES TABLEAUX**

## **➤ PREMIER CHAPITRE**

Tableau 1.1 : Différents types de soutènements d'après SCHLOSSER.....(4)

## **➤ QUATRIEME CHAPITRE**

Tableau 4.1: propriétés des couches de sols et des interfaces.....(30)

Tableau 4.2: Les caractéristiques du rideau de palplanches.....(31)

Tableau 4. 3: Propriétés des ancrages.....(31)

Tableau 4.3: Propriétés des géogrilles.....(31)

## NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS

$\gamma_{unsat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	<i>Poids volumique "non saturé"</i>
$\gamma_{sat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	<i>Poids volumique "saturé"</i>
$E_{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	<i>Module d'Young</i>
$EA$	[kN/m]	<i>Rigidité normale</i>
$EI$	[kNm <sup>2</sup> /m]	<i>Rigidité de flexion</i>
$\nu$	[-----]	<i>Coefficient de Poisson</i>
$C_{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	<i>la cohésion</i>
$C'$	[kN/m <sup>2</sup> ]	<i>la cohésion effective</i>
$\varphi$	[°]	<i>l'angle de frottement</i>
$\varphi'$	[°]	<i>l'angle de frottement interne effectif</i>
$\psi$	[°]	<i>l'angle de dilatance</i>
$R_{inter}$	[-----]	<i>Résistance d'interface</i>
$w$	[kNm/m]	<i>Poids</i>
$L_s$	[m]	<i>Espacement</i>
$F_a$	[kN]	<i>force de poussée</i>
$F_p$	[kN]	<i>force de butée</i>
$F_c$	[kN]	<i>La force de contrebutée</i>
$T$	[kN]	<i>l'effort d'ancrage</i>
$K_a$	[-----]	<i>coefficient de poussée</i>
$K_p$	[-----]	<i>coefficient de butée</i>
$D$	[m]	<i>la fiche</i>
$H$	[m]	<i>La hauteur</i>
$Z_0$	[m]	<i>La hauteur de butée</i>

## الهدف

جدار الإسناد الحاجز لديه نطاق واسع في قطاع الطرق والبناء و أعمال الهندسة المدنية.

طرق تصميم الجدران الاستنادية المتمركزة حاليا على قواعد مختلفة للحساب. والطرق العددية لديها ميزة مع مراعاة أدق لسلوك واجهة التربة وجدار التربة

مع التطورات التكنولوجية الحديثة من المواد، أصبح من الممكن الآن جعل جدار الاسناد الحاجز في جميع الحالات مستقر، في ظل الشروط المتعددة من الموقع، والبيئية، والهندسة والارتفاع.

ويركز الهدف من هذا العمل على النمذجة العددية وتحليل سلوك الجدار الاستنادي باستخدام طريقة العناصر المحدودة العددي باستخدام برنامج بلاكسيس ثنائي الأبعاد 8 0.2

يركز تحليل النتائج على تشوه الجدار، والانحناء في مختلف الحظاظ، وتحرك الأفقي والضغط على الأراضي.

**الكلمات الرئيسية:** واجهة، هيكل التفاعل التربة، ورقية جدار كومة، التحجيم النمذجة العددية، موهر-كولوم، بلاكسيس ثنائي الأبعاد

## RÉSUMÉ

La paroi moulée offre un large champ d'application dans le domaine routier pour la réalisation d'ouvrages de Génie Civil.

Les méthodes de dimensionnement des écrans de soutènement reposent actuellement sur diverses règles de calcul. Les méthodes numériques présentent l'avantage de prendre en compte de manière plus précise le comportement du sol et de l'interface sol-paroi.

Avec les récents développements technologiques des matériels, il est désormais possible de faire de la paroi moulée dans presque tous les types de sols, et sous de multiples contraintes de site, d'environnement, de géométrie et de hauteur.

L'objet du présent travail porte sur la modélisation numérique et l'analyse du comportement d'un écran de soutènement du type palplanche métallique stabilisée avec tirant fichée dans une couche d'argile par la méthode numérique aux éléments finis en utilisant le logiciel Plaxis 2D-v8.2, dans laquelle on a étudié l'effet de l'interaction sol-structure sur la stabilité du parois.

Le sol est homogène et sec, son comportement est décrit par une loi élasto-plastique du type Mohr-Coulomb avec la cohésion du sol  $C$  et un angle de frottement interne  $\phi$ , la paroi moulée est modélisée par élément « poutre ». Les simulations sont à exécuter des coefficients réducteurs de l'interface (sol-paroi) pris variables.

L'analyse des résultats se focalise sur la déformée de la paroi, les moments fléchissant, les déplacements horizontaux et les pressions des terres.

**mots-clefs** : Interface, Interaction sol structure, Paroi en palplanche, Dimensionnement Modélisation numérique, Mohr-coulomb, Plaxis2D.

## ABSTRACT

The molded wall offers a wide field of application in the road sector for the realization of civil engineering works.

The methods of dimensioning retaining screens are currently based on various calculation rules. Numerical methods have the advantage of taking more precisely into account the behavior of the soil and of the soil-wall interface

With the recent technological developments of the materials, it is now possible to make the wall molded in almost all kinds of soils, and under multiple constraints of site, environment, geometry and height.

The aim of this work is to numerically model and analyze the behavior of a retaining screen of the type sheet piling stabilized with pulling in a layer of clay by the numerical method of the finite elements using the software Plaxis 2D-v8 .2, in which the effect of soil structure interaction on the stability of the wall was investigated.

The soil is homogeneous and dry, its behavior is described by an elastoplastic law of the Mohr-Coulomb type with the cohesion of the soil  $C$  and an internal friction angle  $\phi$ , the molded wall is modeled by "beam" element. The simulations are made of reducing coefficients of the interface (soil-wall) taken variable.

The analysis of the results focuses on the deformed wall, bending moments, horizontal displacements and soil pressures.

**keywords:** Interface, Soil structure interaction, Sheet piling, Dimensioning Numerical modeling, Mohr-coulomb, Plaxis2D.

## INTRODUCTION GENERALE

L'analyse des interactions entre les ouvrages de génie civil et les sols, est une préoccupation de plus en plus forte dans le domaine de la géotechnique, en particulier en milieu urbain lors de la construction d'ouvrages souterrains complexes à proximité de bâtiments existants ou de l'exécution de fouilles à proximité d'immeubles .

Dans ce contexte, ce travail s'intéresse à la modélisation numérique et l'analyse du comportement d'un écran de soutènement du type palplanche métallique stabilisée avec tirant fichée dans une couche d'argile par la méthode numérique aux éléments finis en utilisant le logiciel Plaxis 2D-v8.2 , dans laquelle on a étudié l'effet de l'interaction sol structure sur la stabilité du paroi. Outre ce travail est considéré comme une initiation à la recherche dans le domaine de la simulation numérique en 2D.

Le mémoire, est composé de 5 chapitres, comme indiqué au sommaire ci-dessus.

- Le premier chapitre fait une revue bibliographique portant sur les différents types des ouvrages des soutènements et les rideaux palplanche ainsi que leurs usages dans le domaine de génie civil.
- Le second chapitre décrit les méthodes de calcul et dimensionnement des rideaux palplanche , la méthode des éléments finis est un outil très général de résolution d'équations aux dérivées partielles, mais son utilisation en géotechnique reste limitée dans la pratique .
- Le troisième chapitre décrit le code des éléments finis PLAXIS Conçu par des géotechniciens numériques, et résume Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS (le modèle élastique-plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement).
- Le quatrième chapitre est consacré à la simulation numériquement du comportement d'une paroi en palplanche stabilisée par des tirants en utilisant le code PLAXIS2D.
- Le cinquième chapitre est réservé à l'analyse l'effet des facteurs relatifs à l'interface entre le paroi , les tirants et le sol, le module Young, la cohésion et l'angle de frottement interne du sol .

En résumé, ce travail vise à étudier l'effet de l'interaction sol structure sur le comportement d'une paroi stabilisée avec des tirants.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top and bottom, all with rounded ends and small circular details.

**PREMIER CHAPITRE**  
**GENERALITES SUR LES OUVRAGES DES SOUTENEMENTS**

# PREMIER CHAPITRE

## GENERALITES SUR LES OUVRAGES DES SOUTÈNEMENTS

### I.1. Les ouvrages des soutènements

Les ouvrages de soutènement sont des constructions ont pour but de prévenir l'éboulement ou le glissement des talus raides ou verticaux; leur mise en œuvre peut être faite à titre temporaire ou définitif. La réalisation des ouvrages de soutènement est nécessaire, soit pour protéger les chaussées routières contre le risque d'éboulement ou d'avalanches dans les zones montagneuses, soit pour réduire l'emprise des talus naturels dans les sites citadins, lors de la construction d'une route, d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art.



Figure 1.1- Mur de soutènement en gabion

### I.2. Les Classes d'ouvrages de soutènement

Distinguons deux grandes classes d'ouvrages de soutènement :

Qui sont constitués d'une paroi résistante et d'une semelle de fondation, comme les murs en béton armé en (T renversé ou L) ou les murs-poids, qu'ils soient en maçonnerie (briques, pierres,...) ou formés d'éléments spéciaux (gabions métalliques,...).



**Figure 1.1- Mur de soutènement en béton armé**

Les écrans de soutènement qui sont constitués uniquement d'une paroi résistante comme les rideaux de palplanches, les parois moulées en béton armé, murs en terre armée avec parement composé d'écailles en béton.



**Figure 1.2- Mur en terre armée**

### **I.3. Les différents types des ouvrages des soutènements**

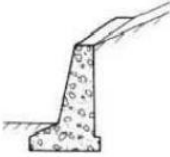
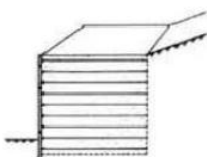
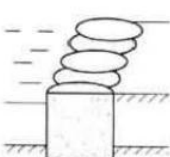

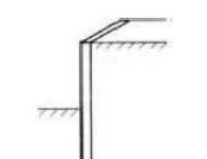
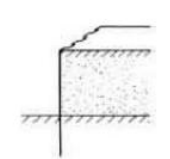
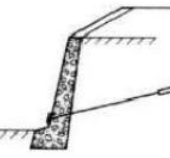
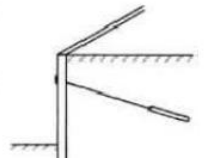
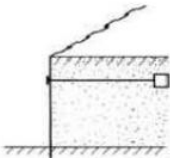
Un ouvrage de soutènement est employé soit pour retenir un sol excavé, qu'il s'agit de soutènement en déblai, soit pour retenir un sol artificiel construit par couches compactées qu'il s'agit de soutènement en remblai.

Il existe diverses classifications des ouvrages de soutènement basées sur le mode de fonctionnement d'ouvrage, leur matériau de construction, la rigidité du système mur-sol, ou par la durée de vie de l'ouvrage.

La reprise des efforts de poussée ou de butée peut s'assurer par différents modes de fonctionnement. Citons les trois modes suivants :

- Le poids de l'ouvrage
- L'encastrement de l'ouvrage
- L'ancrage de l'ouvrage

Le tableau 1.1 montre les différents types de soutènement.

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

**Tableau 1.1 : Différents types de soutènements d'après SCHLOSSER.**

#### I.4. Généralités sur les palplanches

Un ouvrage de soutènement est une construction qui permet de retenir les massifs de terre pour la réalisation d'excavations verticales.

Il existe une multitude d'ouvrages de soutènement, utilisés selon les contraintes et les besoins du chantier tels que les parois moulées, les murs poids ou cantilever, les parois parisiennes et berlinoises ou les rideaux de palplanches.

L'ouvrage de soutènement étudié dans ce mémoire est un écran de soutènement de type rideaux de palplanches.

##### I.4.1. Les rideaux de palplanches (figure 1.3)

Les rideaux de palplanches sont des pièces longues à section mince qui, juxtaposées, constituent des parois planes ou cylindriques, appelées rideaux (Bousquet, 1980).

Constitués de palplanches métalliques en général, emboîtées les unes dans les autres et battues dans le sol de fondation, pour former un écran vertical, le plus souvent rectiligne, servant de soutènement à un massif de sol

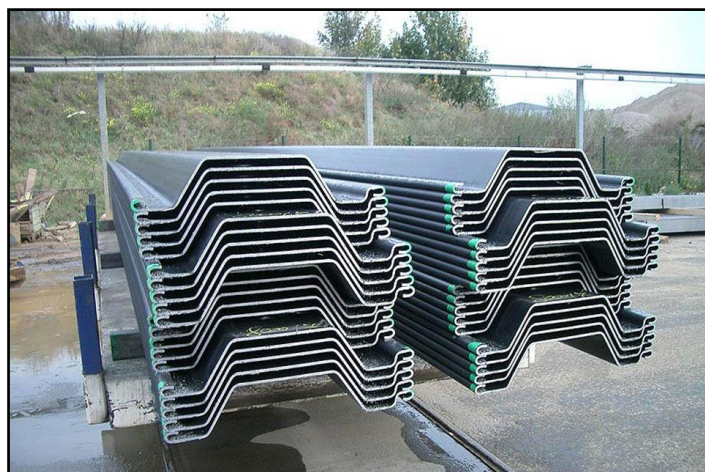


Figure 1.3- rideaux de palplanches

## I.5. Les type de palplanches

Selon la définition il existe beaucoup de types et de profils de palplanches, cela dépend de la résistance souhaitée. On trouve des palplanches excessivement lourdes (grande résistance avant déformation) et d'autre très légère. Cela dépend de l'utilisation que l'on veut en faire.

On peut classer les palplanches selon la géométrie et la forme:

### I.5.1. Palplanches en porte à faux

Les palplanches peuvent être construites en plusieurs types de matériaux (acier, aluminium, bois, béton armé, glass en fibre, vinyle, PVC etc.).

### I.5.2. Rideaux plans (rideaux simples)

Ils peuvent être encastés ou non en pied ou en tête, renforcés ou non d'un ou de plusieurs niveaux de tirants (ancrage) ou d'étais.

Les dispositifs de renforcement de ce type de rideaux sont les liernes, butons (éléments allongés en bois, en métal, rarement en béton, reprenant des efforts de poussée) ou tirants qui interviennent dans les calculs de stabilité (Bousquet, 1980).

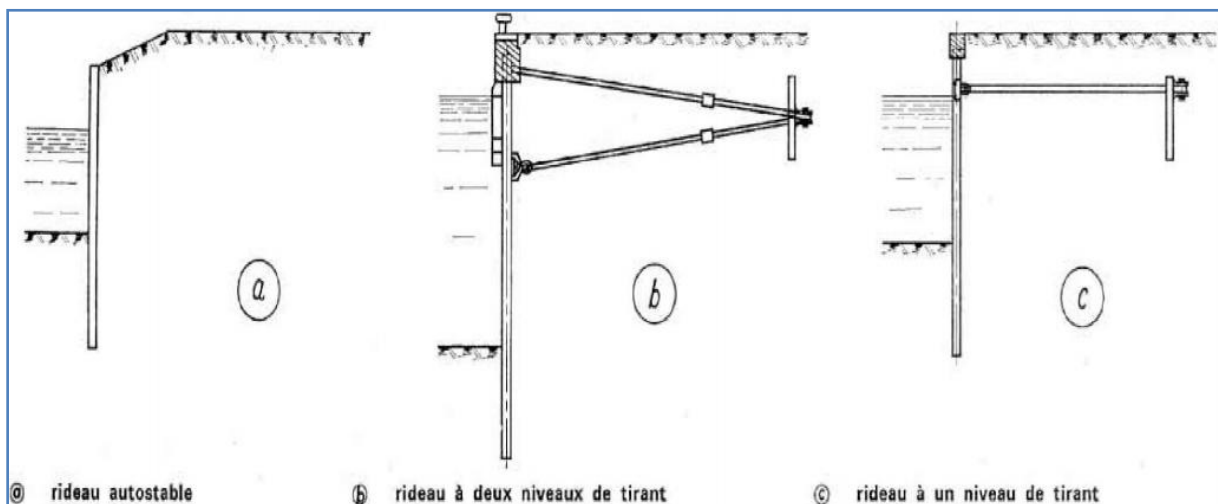


Figure 1.4- Rideaux plans (Bousquet, 1980).

## I.6. L'usage de palplanches

Les rideaux de palplanches constituent une importante catégorie d'ouvrages de soutènement. Ils sont principalement utilisés dans les ouvrages portuaires et dans ceux construits dans le cadre de l'aménagement des rivières et des canaux : murs de quai, bajoyers d'écluse, batardeaux, etc.

On distingue :

- L'utilisation de palplanches à titre provisoire : pour permettre l'exécution de travaux de fondation ou des batardeaux en rivière, écran d'étanchéité, blindage de fouille.
- l'utilisation de palplanches à titre définitif : lorsqu'elles sont incorporées dans les ouvrages; dans ce dernier cas elles sont portées en compte, éléments constitutifs de quais, écluses, protections de berges, caissons de fondations, murs de soutènement, para fouilles.

Donc les palplanches permettent de constituer un mur de soutènement, un batardeau, une palée ou un écran imperméable et assurer des blindages de fouilles.

## I.7. Mise en place de palplanches

Il existe trois grands types de mise en place des palplanches. La méthode par battage, la mise en place par vibrofonçage et la mise en place par presse hydraulique.

- **La méthode de battage** : c'est la méthode la plus ancienne, son principe un rideau de palplanches est battu bien à la verticale pour remplir mieux.
- **La méthode de vibrofonçage** : elle devient de plus en plus courant de nos jours, l'objectif de cette technique est de diminuer les frottements internes des sols non cohérents ce qui a pour effet de réduire les efforts latéraux des palplanches mises en place.
- **La méthode de vérinage** : elle reste rarement utilisée sur chantier, Un vérineur est une machine hydraulique utilisée pour le fonçage des palplanches mais également pour l'extraction de celles-ci.

## I.8. Dimensionnement d'un rideau de palplanche

La base du calcul d'un rideau de palplanches fait appel à des notions de poussées et butées

Les calculs peuvent être traités par méthode analytique ou graphique suivant les méthodes classiques de la loi de Coulomb ou de la méthode de Blum. D'autres méthodes de calcul faisant appel aux notions élastoplastiques se traite par des programmes de calcul sur ordinateur qui font intervenir les modules de réaction (Rido, Talren, Denebola (Graitec), AMretain), ces méthodes sont en général utilisées par les bureaux d'études spécialisées dans le dimensionnement de palplanches car elles offrent des résultats plus précis qui diminuent les risques de sous dimensionnement.

Avant de mener à bien une étude de dimensionnement d'un rideau de palplanches, il est important de prendre en compte les données suivantes :

- Caractéristiques des sols,
- Coupes géotechniques,
- Les niveaux d'eau,
- Les surcharges,
- Les différentes cas d'application des efforts pendant et après la construction,
- Les effets dus aux variations de niveau d'eau de part et d'autre du rideau,
- les résultats d'essais géotechniques (pénétrömètre, pressiömètre, essai Proctor),
- Les affouillements éventuels.

L'objectif du dimensionnement du rideau est de déterminer la fiche nécessaire aux palplanches ainsi que le module d'inertie nécessaire qui permettront le choix du type de profilé.

La vérification d'un rideau de palplanches peut se faire par de nombreuses méthodes qui dépendent généralement du type de rideau (batardeau, rideaux doubles, gabion, rideau simple). Cette synthèse ne nous permet pas de développer toutes ces méthodes<sup>11</sup> (méthodes de Terzaghi, Cummings, Schebili, Kilajima, Brinch, Hansen) qui ont donné lieu à d'importants ouvrages littéraires dans lesquels on peut retrouver les détails de ces méthodes.



A decorative border resembling a scroll, with a vertical line on the left and horizontal lines at the top and bottom, all ending in small circular curls at the corners.

## **DEUXIEME CHAPITRE**

### **LES METHODES DE CALCUL DES RIDEAUX ET DES PAROIS**

## DEUXIEME CHAPITRE

### LES METHODES DE CALCUL DES RIDEAUX ET DES PAROIS

#### II.1. Généralités sur les méthodes de calcul des rideaux et des parois

La flexibilité du rideau rend le schéma de calcul beaucoup plus complexe que pour les ouvrages rigides. Ainsi, La distribution des efforts sur la partie en fiche dépend considérablement de l'intensité de l'effort  $F$  exercé par le massif de remblai. Comme le montre la figure 2.1

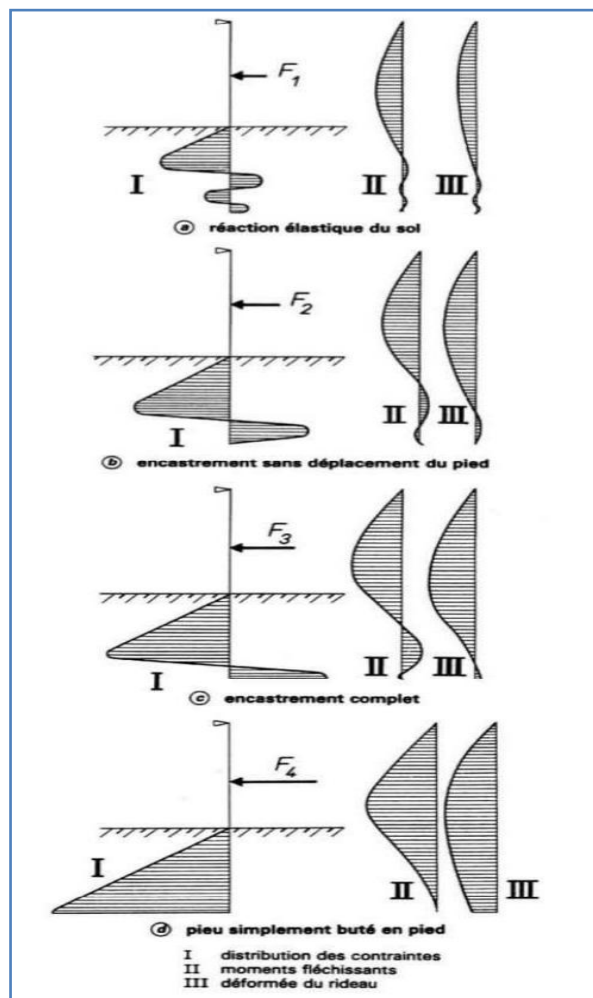


Figure 2.1-comportement d'un rideau ancré en tête, soumis à une force horizontale croissante

Pour de faibles valeurs de  $F$ , la réaction du sol est proportionnelle aux déplacements du rideau et le sol se comporte comme un matériau élastique (figure 2.1.a)

À partir d'une valeur  $F_2$  de  $F$ , la réaction du sol se réduit à une butée et à une contrebutée. Tant que  $F$  reste inférieur à la valeur  $F_3$ , il n'y a pas de déplacement du pied du rideau (figure 2.1.b).

Lorsque  $F$  atteint la valeur  $F_3$ . Le pied du rideau se déplace vers l'amont, ce qui mobilise la contrebutée maximale. Le moment d'encastrement est alors maximal. On dit qu'il y a encastrement complet dans le sol (figure 2.1.c).

Lorsque  $F$  continue à croître, la butée augmente. Tandis que la contrebutée diminue. le rideau est dit partiellement encasté. Pour la valeur  $F_4$ , la contrebutée disparaît et la butée maximale est mobilisée sur toute la hauteur en fiche. Le rideau. Qui est alors en équilibre limite, est dit simplement buté en pied (figure 2.1.d).

En pratique. La fiche adoptée pour un rideau flexible est généralement comprise entre la fiche correspondant à l'encastrement complet et celle correspondant à la butée simple.

on peut modéliser complètement l'interaction entre le sol et le rideau. Les méthodes de calcul les plus courantes consistent à considérer une interaction simplifiée dans laquelle le rideau (ou la paroi) est assimilé à une poutre soumise à une distribution de pression normale  $p(z)$  sur toute sa hauteur (figure 2.2) et où l'inconnue est la déformée  $y(z)$  de la poutre

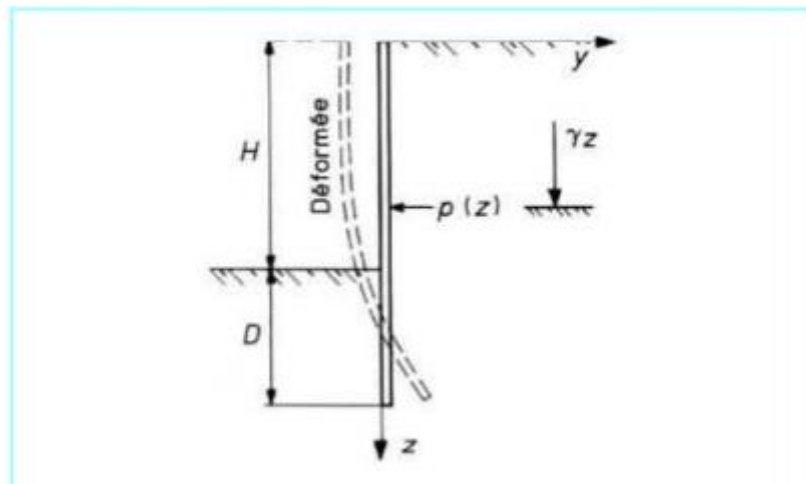


Figure 2.2-rideau de palplanches soumis à une distribution de pression normale  $p(z)$

La pression normale  $p(z)$  apportée par le sol est supposée être proportionnelle à la contrainte normale verticale supposée. Quant à elle, égale au poids des terres. Avec un coefficient  $K$  ne dépendant que du déplacement  $y(z)$  du rideau au niveau considéré:

-Pour  $z \leq H$  :  $p(z) = k(y) \gamma z$

-Pour  $z \geq H$  :  $p(z) = k(y) \gamma z - k(-y) \gamma (z-H)$

La valeur du coefficient  $K(y)$  est comprise entre celle du coefficient de poussée  $K_a$  et celle du coefficient de butée  $K_p$

L'ensemble de ces hypothèses est malgré tout assez restrictif. Par exemple. L'hypothèse d'un coefficient  $K$  ne dépendant que du déplacement  $y$  au niveau considéré est généralement fautive. Et cela d'autant plus que se développent des effets de voûte dans le sol derrière la paroi ou le rideau. Cette hypothèse suppose, en effet. Que le sol réagisse par tranches horizontales sans aucune interaction de cisaillement entre elles (figure 2.3.a). Alors que la mobilisation d'un effet de voûte impose au contraire que se développent de fortes contraintes de cisaillement entre les tranches (figure 2.3.b). L'existence de contraintes de cisaillement sur des plans horizontaux entraîne par ailleurs que la contrainte  $\sigma_v$  n'est plus principale et n'est donc plus égale à  $\gamma z$ .

L'équilibre de la poutre se traduit par l'équation :

$$EI = \frac{d^4 y}{dz^4} + p(z) = 0$$

Avec  $E$  module d'élasticité.

$I$  moment d'inertie.

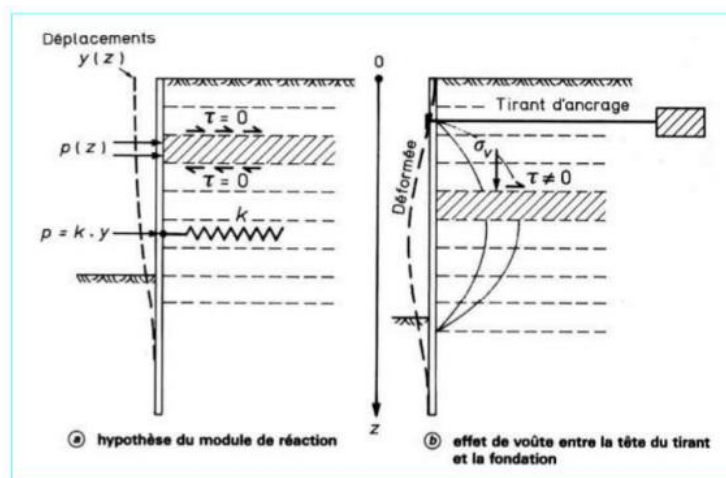


Figure 2.3 -incompatibilité entre l'hypothèse du module de réaction et le développement d'un effet de voûte

La résolution de cette équation. Qui donne la déformée  $y(z)$  et. Par suite, les contraintes de flexion dans les palplanches. Nécessite la connaissance de la fonction  $K(y)$  et des conditions aux limites du rideau. Or le fonction  $K(y)$  est très mal connue et certaines des conditions aux limites, comme la longueur de la fiche des palplanches. Sont des inconnues du problème. C'est pourquoi la plupart des méthodes sont fondées sur des hypothèses simplificatrices.

On peut distinguer schématiquement les deux types de méthodes suivantes:

- Méthodes aux états limites :  $k(y) = ka$  ou  $kp$
- Méthodes des éléments finis

## II.2. Méthodes de calcul aux états limites

Deux méthodes classiques sont couramment utilisées:

- La première. Où le rideau est ancré en tête et simplement buté en pied
- La seconde, dans laquelle le rideau n'est pas ancré en tête. Mais résiste uniquement par un bon encastrement dans le sol de fondation.

### II.2.1. Rideau ancré. Simplement buté en pied

Un rideau ancré en tête est dit simplement buté en pied lorsque sa fiche est suffisamment faible pour permettre une rotation du rideau autour de son point d'ancrage et un déplacement du pied mobilisent la butée maximale. Le diagramme des efforts exercés sur le rideau, dans le cas d'un sable, en représenté sur la figure 2.4

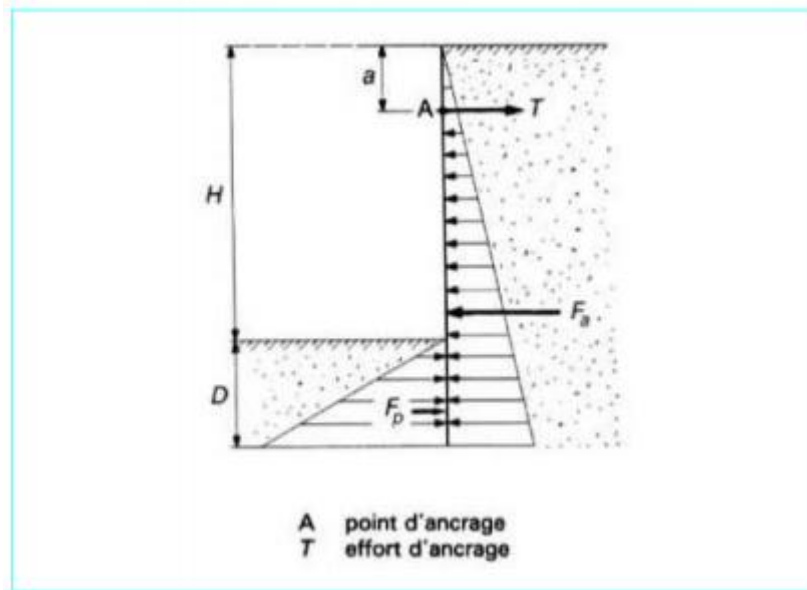


Figure 2.4-rideau ancré en tête, simplement buté en pied

Les inconnues à déterminer sont la fiche  $D$  et l'effort d'ancrage  $T$ . L'équilibre statique du rideau fournit les deux équations nécessaires au dimensionnement.

- Moment résultant nul au point d'ancrage A :

$$Fa \left[ \frac{2}{3}(H + D) - a \right] = Fp \left( \frac{2}{3}D + H - a \right) \quad (1)$$

Avec  $F_a$  force de poussée exercée sur la face amont du rideau.

$F_p$  force de butée sur la face avale.

Le coefficient  $2/3$  étant du a la répartition triangulaire des pressions.

- Résultante horizontale nulle :

$$T = Fa - Fp \quad (2)$$

La première relation explicitée permet de déterminer la fiche  $D$  à partir d'une équation de 3em degré, a savoir:

$$2(k_p - k_a)D^3 + [3(H - a)k_p - 3(2H - a)k_a]D^2 - 6H(H - a)k_aD - H^2(2H - 3a)k_a = 0 \quad (3)$$

La valeur de  $D$  étant alors connue, l'équation (2) fournit la valeur de l'effort d'ancrage  $T$

Pour tenir compte d'un coefficient de sécurité par rapport à l'équilibre limite ainsi calculé, on admet généralement que l'on ne mobilise que la moitié de la butée, ce qui, dans l'équation déterminant la fiche, conduit à remplacer  $k_P$  par  $k_P/2$

**II.2.2. Rideau non ancré en tête et encastré en pied**

Un rideau non ancré, battu dans un sol pulvérulent. Subit une rotation autour d'un point O situé dans sa partie en fiche. La figure (2.5) montre les déplacements du rideau et les efforts normaux correspondants.

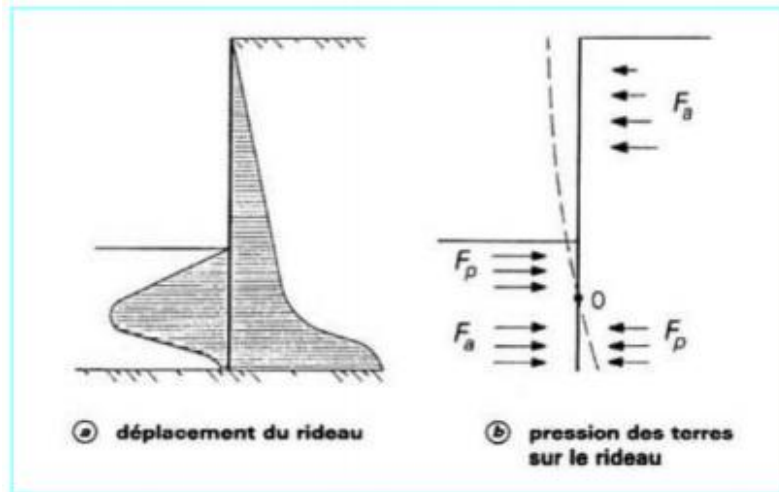


Figure 2.5-calcul à état limite d'un rideau encastré non ancré (sol pulvérulent)

Le calcul est fait par la méthode de Rankine, à partir des hypothèses simplificatrices suivantes figure (2.6):

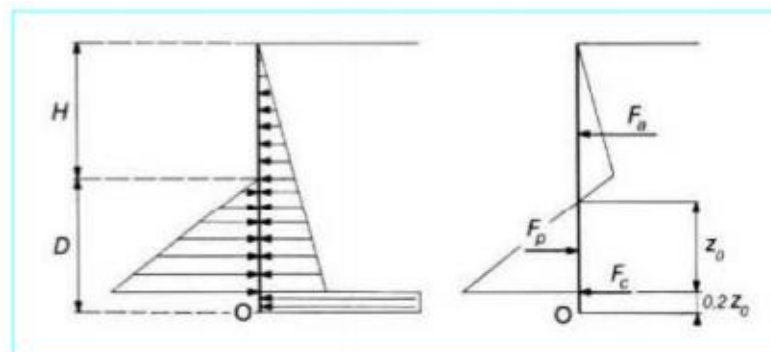
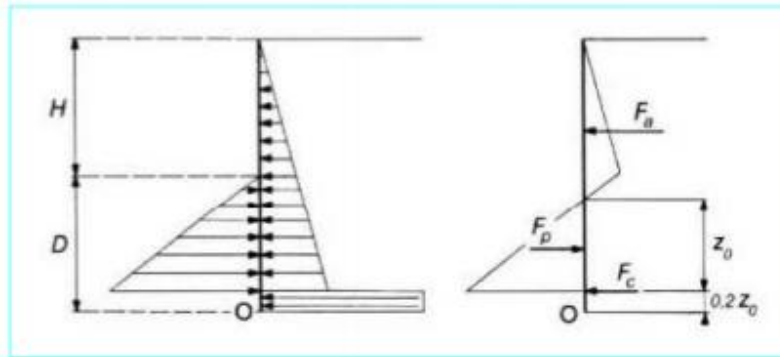


Figure 2.6- hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré

Le calcul est fait par la méthode de Rankine, à partir des hypothèses simplificatrices suivantes figure (2.7):



**Figure 2.7- hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré**

- Le sol des deux côtés du rideau. Au-dessus du point de rotation  $O$ , est en état d'équilibre limite;
- Les efforts de contrebutée sont équivalents à une force horizontale  $F_C$  appliquée au niveau du centre de rotation  $O$ .

On prend généralement une hauteur de contrebutée égale à 20 % de la hauteur de butée  $Z_0$ .

Cela réduit les inconnues du problème au nombre de deux:

- La hauteur de butée  $Z_0$ ;
- La force de contrebutée  $F_C$ .

Elles peuvent alors être calculées par les équations de la statique traduisant l'équilibre du rideau.

La valeur de  $Z_0$  est déterminée en écrivant l'équilibre des moments autour du point  $O$ . ce qui donne une équation du troisième degré en  $Z_0$ , analogue a celle donnant la valeur de la fiche  $D$  [formule 3].

La fiche du rideau a alors pour expression:

$$D = \frac{H}{k_p^2 - 1} + Z_0 + 0,2Z_0$$

La force de contrebutée  $F_C$  s'obtient en écrivant qu'on projection horizontale la résultante générale des forces s'exerçant sur le rideau est nulle, soit:

$$F_C = F_P - F_a$$

Pour tenir compte d'un coefficient de sécurité par rapport à l'équilibre limite ainsi calculé, on considère que la moitié de la butée est mobilisée, ce qui, dans les calculs, conduit à remplacer  $k_P$  par  $k_P/2$ . Il est alors possible de déterminer la valeur maximale du moment fléchissant dans le rideau à partir du diagramme des pressions de figure (2.8), et de choisir un type de palplanche d'inertie convenable.

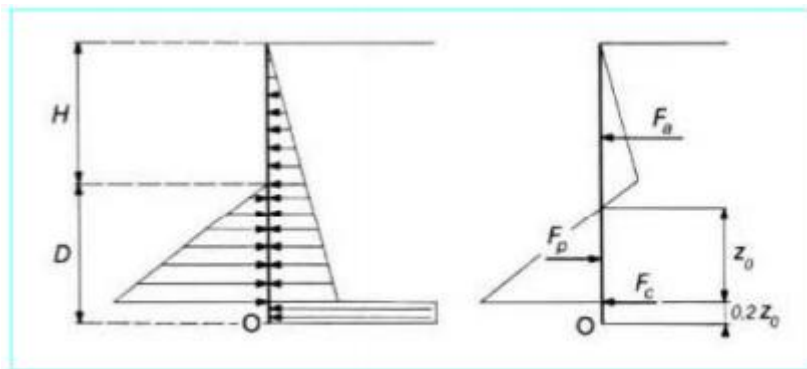


Figure 2.8- Hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré

### II.2.3. Cas des rideaux fichés dans l'argile

Les rideaux fichés dans l'argile et supportant un remblai de sol pulvérulent. ou les rideaux foncés entièrement dans de l'argile avec dragage ultérieur. se calculent par des méthodes tout à fait analogues.

Il faut cependant noter que, pour l'argile, le calcul doit être fait à la fois à court terme ( $C_U, \varphi_U = 0$ ) et à long terme ( $C', \varphi'$ ). Ainsi, l'étude d'un rideau battu dans une argile est plus complexe que celle d'un rideau battu dans un sable, puisqu'il faut tenir compte de l'évolution dans le temps du comportement de l'argile.

À court terme. Les efforts de poussée et de butée sont évalués à partir de la cohésion non drainée ( $C_U$ ) du matériau. Et les contraintes utilisées sont les contraintes totales.

À long terme. Où l'on utilise les caractéristiques intrinsèques granulaires de résistance au cisaillement ( $C', \varphi$ ). Il faut tenir compte des pressions interstitielles correspondant au régime permanent

L'équilibre des poussées et des butées s'exercent sur un rideau non ancré dans une argile figure (2.9) n'est possible que si l'on a l'inégalité:

$$C_U \geq \gamma H/4$$

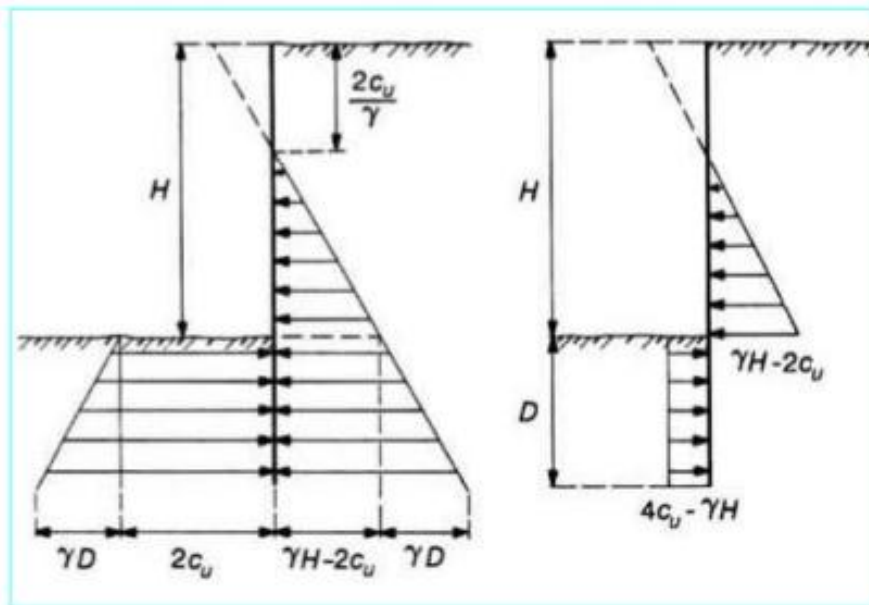


Figure 2.9- pression des terres à court terme sur un rideau battu dans une argile homogène

### II.3. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est un outil très général de résolution d'équations aux dérivées partielles, mais son utilisation en géotechnique reste limitée dans la pratique à l'exception des tunnels, en raison de son efficacité en combinaison avec la méthode convergence - confinement. Cet emploi limité en géotechnique que dans d'autres disciplines, est rendu essentiellement à la difficulté dans l'identification du comportement des matériaux naturels d'une part et de l'enchaînement complexe lié à l'apport et l'enlèvement des matériaux d'autre part. Néanmoins

#### II.3.1. Principes généraux de modélisation

Puisqu'il s'agit d'étudier le comportement d'un écran auto-stable fiché dans un sable sec, les principes généraux de modélisation concernent uniquement les points suivants :

- La loi de comportement du sol
- La définition de l'état de contrainte initiale
- Le choix des paramètres
- La modélisation de l'écran
- La modélisation de l'interface sol-structure
- Le phasage des opérations et la conduite du calcul

### **II.3.2. Notion d'éléments de massif**

Un massif est défini généralement comme un milieu continu représentant un certain volume de matériau dans l'espace. Un élément fini de massif représente alors un volume élémentaire de matériau solide ou non (métal, béton, roche, sol, liquide) dont le comportement mécanique peut être décrit par un ensemble d'équations (lois de comportement et d'interactions).

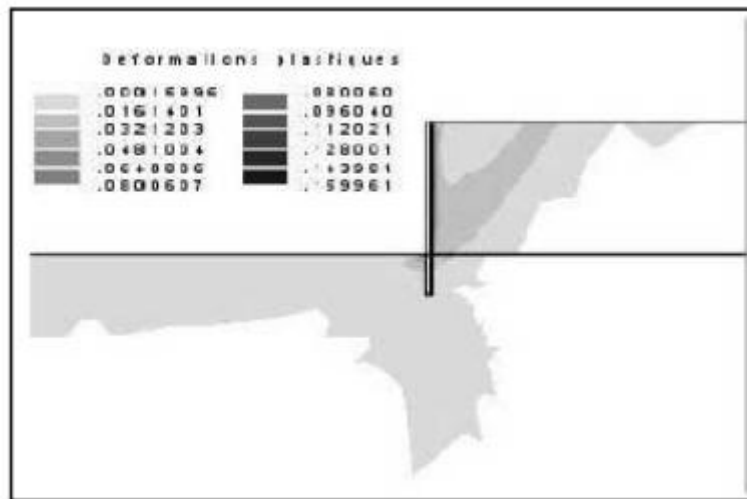
### **II.3.3. Définition de la géométrie du modèle et construction de maillage**

Dans le cas d'un ouvrage de soutènement non appuyé, Les dimensions géométriques du modèle numérique définissent les grandeurs des bords limites par rapport à l'ouvrage (soutènement) pour éviter toute influence sur son comportement. Il n'existe pas de règles qui s'imposent pour les appliquer mais des recommandations d'usage sont fortement appréciées. Le choix du type de maillage et de sa densité sont laissés au soin du projeteur suivant l'outil de calcul en possession qui puisse satisfaire entre la finesse de représentation et le temps de calcul.

### **II.3.4. Modélisation du sol et choix des paramètres**

En particulier, les ouvrages de soutènement se caractérisent en phase de service par des zones importantes de sol travaillant en plasticité. Ce phénomène concerne les terrains soutenus se trouvant à l'état d'équilibre limite de poussée et ceux situés en fond de la fouille par effet de déchargement du sol et du fait de la compression latérale due au soutènement. En

effet, la présence de zones plastiques limite l'emploi des lois de comportement qui ne permettent pas de rendre compte des états de rupture du sol figure (2.10).



**Figure 2.10- Zones en plasticité aux environs de soutènement d'excavation**

### II.3.5. La modélisation de l'écran

La modélisation de l'écran fait appel à l'utilisation au choix par des éléments de massif ou par des éléments de poutre à épaisseur nulle. Les éléments de massif sont mieux adaptés aux parois moulées et les éléments de poutre aux rideaux de palplanches. La différence entre ces deux éléments dans l'effet de l'interaction sol structure, les éléments poutre ne peut pas transmettre de contraintes tangentielles à l'écran, ni d'efforts normaux ou tangentiels en pied de l'écran

### II.3.6. Modélisation du phasage d'opération et la conduite des calculs

Dans la plupart des codes de calcul, la partie élastique de loi de comportement a été linéarisée afin de réduire le temps de calcul cependant la non-linéarité du comportement du sol est prise en compte par décomposition de l'excavation en certaines étapes et chacune de ces étapes elle-même est décomposée en un certain nombre d'incrément afin de faciliter la convergence des calculs.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical line on the left side and curved ends at the top and bottom, framing the text.

## **TROISIEME CHAPITRE**

### **PRESENTAION D L'OUTIL NUMERIQUE DE CALCUL**

## **TROISIEME CHAPITRE**

### **PRESENTAION DE L'OUTIL NUMERIQUE DE CALCUL**

#### **III.1. INTRODUCTION**

L'utilisation d'outils de modélisation numérique connaît depuis une vingtaine d'années un développement considérable dans le domaine de la géotechnique. La modélisation numérique permet l'analyse du comportement des matériaux sous diverses conditions de sollicitation. Les simulations numériques sont souvent utilisées pour résoudre des problèmes complexes. Les techniques numériques comme les méthodes d'éléments finis et des différences finies sont plus flexibles et plus versatiles que les solutions analytiques, qui sont surtout appliquées à des situations simples ou idéalisées. En choisissant des paramètres représentatifs, des conditions aux frontières et des modèles constitutifs adéquats, les simulations numériques peuvent mener à une évaluation réaliste des problèmes géotechniques.

Dans le présent chapitre, nous donnons une description du code de calcul par élément finis PLAXIS 2D, qui sera utilisé dans notre étude et plus particulièrement La description de quelques modèles de comportement disponibles dans ce code.

#### **III.2. Présentation Du Logiciel**

Le logiciel PLAXIS 2D 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 PLAXIS 2D 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 2D a été étendu à plein d'autre domaine de la géotechnique. En 1998, la première version de PLAXIS 2D pour Windows est développée. Durant la même période une version 3D du logiciel a été développée. Après quelques années de développement le logiciel PLAXIS 3D Tunnel program est sorti en 2001.

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 manuel d'utilisation du code PLAXIS [Brinkgreve et al (2003)] présente une description Détaillée du logiciel.

### III.3. Les points forts de PLAXIS

- La convivialité de l'interface pour la saisie des données et pour l'interprétation des résultats ;
- 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.

### III.4. Les sous-programmes de PLAXIS

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves) ( Figure 3.1) :

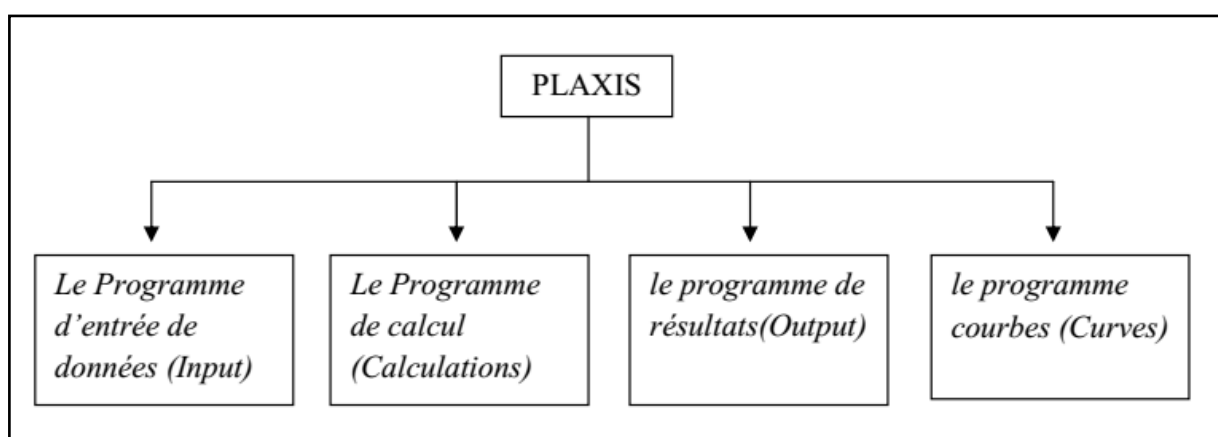


Figure 3.1- Différents programmes de calcul en PLAXIS 2D.

#### III.4.1. 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.

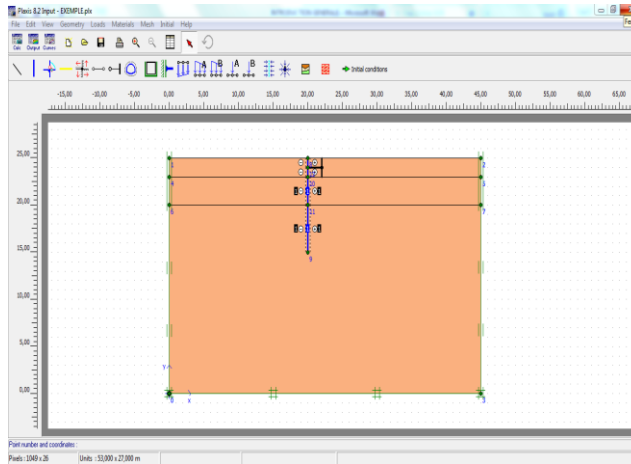


Figure 3.2- Le programme d'entrée de données

### III.4.2. Le programme de calcul (Calculations)

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

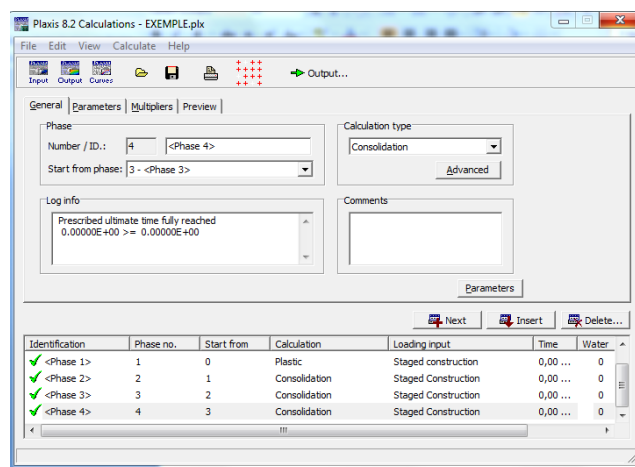


Figure 3.3- Le programme de calcul (Calculations)

### III.4.3. Le programme de résultats (Output)

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

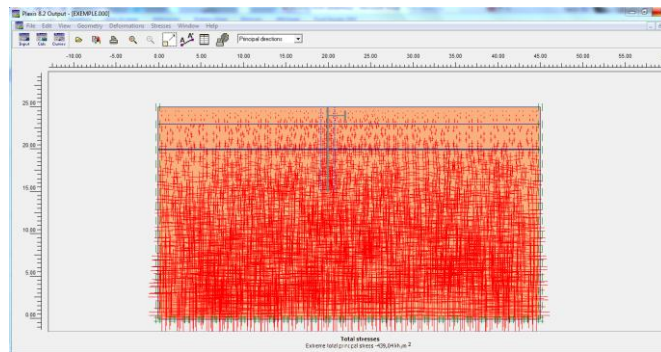


Figure 3.4- Le programme de résultats (Output)

### III.4.4. Le programme courbes (Curves)

Ce programme contient tout le nécessaire pour générer des courbes charges-déplacements, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.

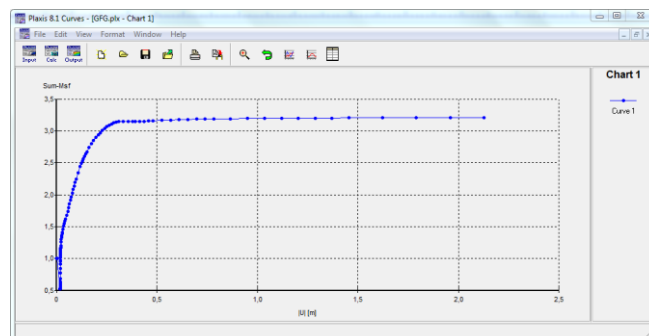


Figure 3.5- Le programme courbe (Curves)

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

- Utilisation du préprocesseur « Plaxis Input », pour la génération des données (maillage, jeu des données et contraintes initiales).
- Lancement du code de calcul éléments finis « Plaxis Calculate », pour effectuer la résolution numérique du problème étudié.
- Utilisation de post-processeur « Plaxis Output », pour l'interprétation des résultats sur écran graphique.
- Utilisation de post-processeur « Plaxis curve », pour l'interprétation des courbes (courbe de consolidation, chemin des contraintes, . . .etc.).

### III.5. Modèles de comportement de PLAXIS

PLAXIS propose différents modèles, qui permettent de simuler le comportement d'un sol. Un commentaire rapide sur les modèles disponibles est donné ci-dessous:

#### III.5.1. Modèle élastique linéaire:

Ce modèle représente la loi de *Hooke* pour l'élasticité linéaire et isotrope. Il comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module d'*Young*  $E$ , et le coefficient de *Poisson*  $\nu$ . Le modèle linéaire élastique est très limité pour simuler le comportement d'un sol. Il est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol.

#### III.5.2. Modèle de Mohr-Coulomb:

Ce modèle bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. Il comporte cinq paramètres: le module d'*Young*,  $E$ , le coefficient de *Poisson*,  $\nu$ , la cohésion,  $c$ , l'angle de frottement,  $\varphi$ , et l'angle de dilatance,  $\psi$ .

#### III.5.3. Modèle pour les roches fracturées (Jointed Rock Model):

C'est un modèle élasto-plastique anisotrope, pour lequel, le cisaillement plastique peut se produire seulement dans un nombre limité de directions de cisaillement. Ce modèle peut être utilisé pour simuler le comportement des roches stratifiées ou fracturées.

**III.5.4. Modèle de sol avec écouissage (Hardening Soil Model):**

C'est un modèle hyperbolique de type élasto-plastique, formulé dans le cadre de la plasticité avec écouissage en cisaillement. De plus, ce modèle prend en compte l'écouissage en compression, pour simuler le compactage irréversible d'un sol sous le premier chargement en compression. Ce modèle permet de simuler le comportement des sables, des graviers, et même les sols mous, comme les argiles et les limons

**III.5.5. Modèle pour les sols mous (Soft Soil Model):**

C'est un modèle de type Cam-Clay, qui permet de simuler le comportement des sols mous, comme les argiles normalement consolidées ou de la tourbe. Ce modèle s'applique très bien aux situations où la consolidation primaire est prépondérante.

**III.5.6. Modèle pour les sols mous avec fluage (Soft Soil Creep Model):**

C'est un modèle du deuxième ordre, formulé dans le cadre de la viscoplasticité. Il permet de simuler le comportement des sols mous, comme les argiles ou les tourbes normalement consolidées, en fonction du temps. Ce modèle prend en compte la compression logarithmique.

**III.5.7. Modèle défini par l'utilisateur:**

Cette option permet de définir et d'utiliser des lois de comportement autres que les modèles standards de PLAXIS.

**Remarque :**

Toutes les modélisations ont supposé un comportement élasto-plastique, répondant au modèle à critère de rupture de *Mohr-Coulomb*, qui est le modèle le plus couramment utilisé en mécanique des sols. Le comportement élasto-plastique peut être représenté par le modèle monodimensionnel (figure 3.) comprend un ressort de raideur  $K$  (pour symboliser l'élasticité), et un patin de seuil  $S_0$ .

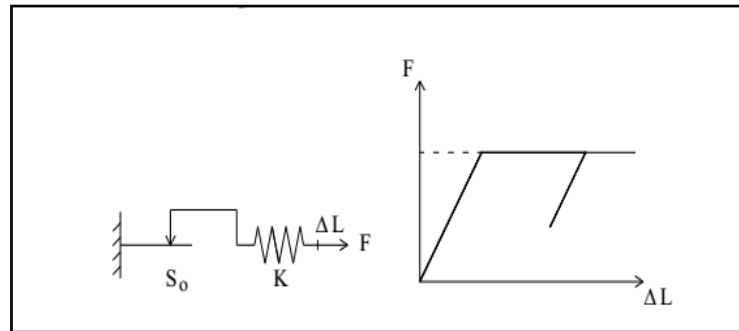


Figure 3.6- Représentation monodimensionnelle du comportement élasto-plastique.

Le modèle élasto-plastique "*Mohr-Coulomb*" est caractérisé par cinq paramètres, qui sont :

- En élasticité
  - $E$  module d'élasticité de *Young*,
  - $\nu$  coefficient de *Poisson*,
- En plasticité
  - $c$  cohésion,
  - $\varphi$  angle de frottement,
  - $\psi$  angle de dilatance.

### III.6. Conclusion

Ce rapide tour d'horizon des différents 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 sophistiqués. Souvent la détermination des paramètres nécessite des techniques d'optimisation. Ces modèles appartiennent au domaine de recherche.

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, 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.



**QUATRIEME CHAPITRE**  
**ÉTABLISSEMENT D'UN MODELE DE CALCUL**

## **QUATRIEME CHAPITRE**

### **ÉTABLISSEMENT D'UN MODELE DE CALCUL**

#### **IV.1. INTRODUCTION**

Dans toute étude géotechnique, la modélisation est une étape décisive qui conditionne la qualité des analyses de diagnostic ou de prévision du comportement des sols et des ouvrages. Un modèle n'est pas seulement une série d'équations représentant le comportement physique ou mécanique du sol, c'est aussi une représentation géométrique de l'espace, qui délimite les couches ou volumes occupés par chaque matériau (sol, roche, eau, béton, métal, géo synthétiques, etc.) et précise la place des conditions aux limites et des interfaces, avec leurs conditions de contact

Dans ce chapitre nous allons utiliser le code PLAXIS 2D pour, simuler numériquement le comportement d'un écran de soutènement en sol renforcé par des nappes des tirants d'ancrage

## IV.2. Dimensions géométriques du modèle numérique

Le modèle numérique envisagé pour simulations et calculs est dimensionné comme suivant (figure 4.1):

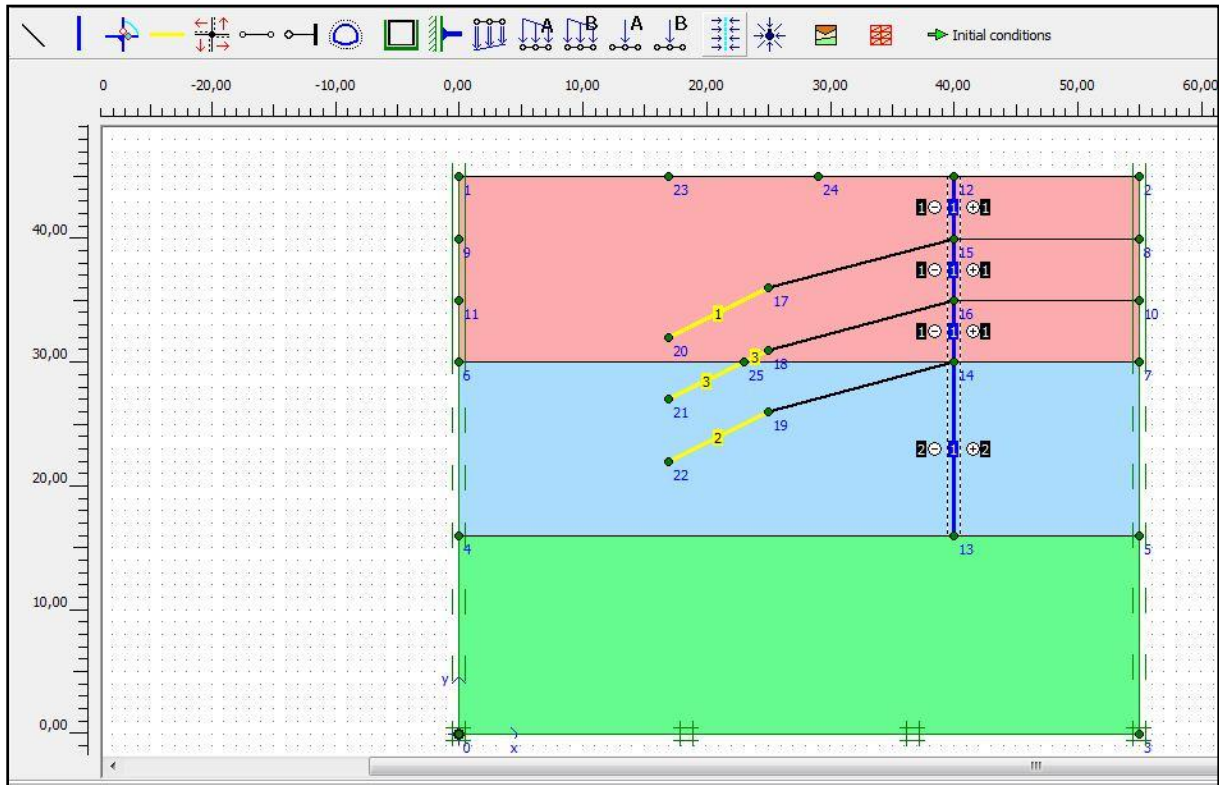


Figure 4.1- Dimensions géométriques du modèle : (55x45) m<sup>2</sup>

### IV.2.1. La géométrie du modèle

Le projet est symétrique il sera modélisé par un modèle géométrique plan (2D) de 55 m de largeur sur 45 m de profondeur. Ce modèle est présenté sur la figure 4.2 trois couches de sol composent la géologie du site :

- une couche de remblai en surface de 15 m de profondeur
- une couche d'argile compacte en surface de 14 m de profondeur
- une couche d'argile sableux de 16 m d'épaisseur

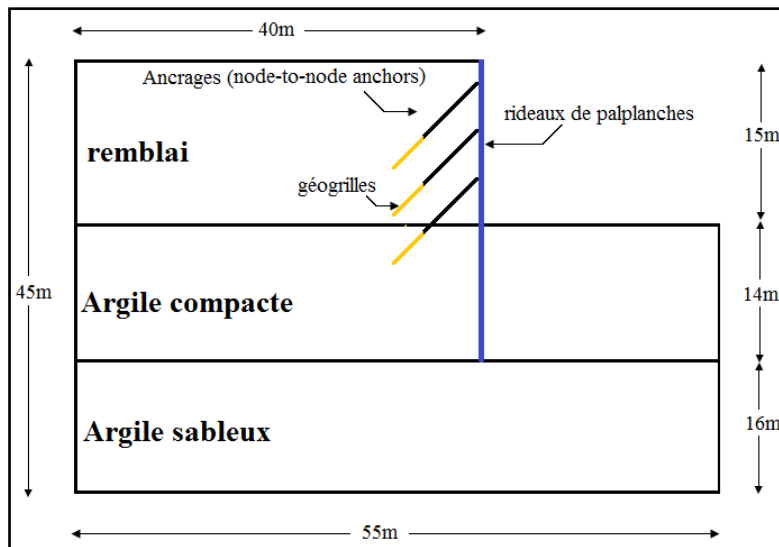


Figure 4.2- Vue en coupe du projet

### IV.3. Caractéristiques des matériaux

#### IV.3.1. Propriétés des couches des sols

Le sol est constitué d'un trois couches, le modèle de comportement est celui de Mhor-Coulomb (*MC*) drainé. Les paramètres  $E_{ref}$ ,  $c_{ref}$ ,  $\psi$  et  $R_{inter}$  sont variables selon le cas simulé comme il est indiqué dans la table ci-après :

Paramètres	symbole	remblai	Argile compacte	Argile sableux	Unité
Modèle du matériau	Model	MOHR-COULOMB			-
Type de comportement	Type	DRAINE			-
Poids volumique "non saturé"	$\gamma_{unsat}$	17.00	17.00	18.00	[kN/m <sup>3</sup> ]
Poids volumique "saturé"	$\gamma_{sat}$	20.00	21.00	21.10	[kN/m <sup>3</sup> ]
Module d'Young (constant)	$E_{ref}$	$8.0 \cdot 10^3$	$3.0 \cdot 10^4$	$8.0 \cdot 10^4$	[kN/m <sup>2</sup> ]
Coefficient de Poisson	$\nu$	0.30	0.25	0.30	-
Cohésion	$C_{ref}$	1.00	48.00	53.00	[kN/m <sup>2</sup> ]
Angle de frottement	$\varphi$	30.00	32.00	17.93	[°]
Angle de dilatance	$\psi$	0.00	2.00	0.00	[°]
Facture de Rigidité	$R_{inter}$	0.65	1.00	0.70	-

Tableau 4.1: propriétés des couches de sols et des interfaces

### IV.3.2. Les caractéristiques des éléments structuraux

- caractéristiques du rideau de palplanches

Paramètres	symbole	valeur	Unité
Type de comportement	<i>Material type</i>	Elastique	-
Rigidité normale	<i>EA</i>	$2.00.10^7$	[kN/m]
Rigidité de flexion	<i>EI</i>	$1.67.10^6$	[kNm <sup>2</sup> /m]
Poids	<i>w</i>	15.00	[kNm/m]
Coefficient de Poisson	<i>v</i>	0.15	-

**Tableau 4.2: Les caractéristiques du rideau de palplanches**

- Propriétés des ancrages (éléments node-to-node anchor)

Paramètres	symbole	valeur	Unité
Type de comportement	<i>Material type</i>	Elastique	-
Rigidité normale	<i>EA</i>	$2.0.10^5$	[kN/m]
Espacement	<i>Ls</i>	1.0	[m]

**Tableau 4. 3: Propriétés des ancrages**

- Propriétés des géogrilles

Paramètres	symbole	valeur	Unité
Type de comportement	<i>Material type</i>	Elastique	-
Rigidité normale	<i>EA</i>	$2.0.10^5$	[kN/m]

**Tableau 4.3: Propriétés des géogrilles**

### IV.4. Les conditions aux limites

Avant débutée mon modèle j'ai procédé à des simulations préliminaires, pour fixée les dimensions du modèle, et pour choisir les limites.

Les conditions aux limites sont prises en compte en bloquant les déplacements horizontaux et verticaux du modèle en utilisant l'option par défaut (Standard Fixities).

#### IV.5. Génération du maillage

Le modèle de référence se fait par des éléments à 15 nœuds. Le nombre d'éléments est de 337 et celui des nœuds est de 2875. Les dimensions du maillage sont données par la figure 4.3

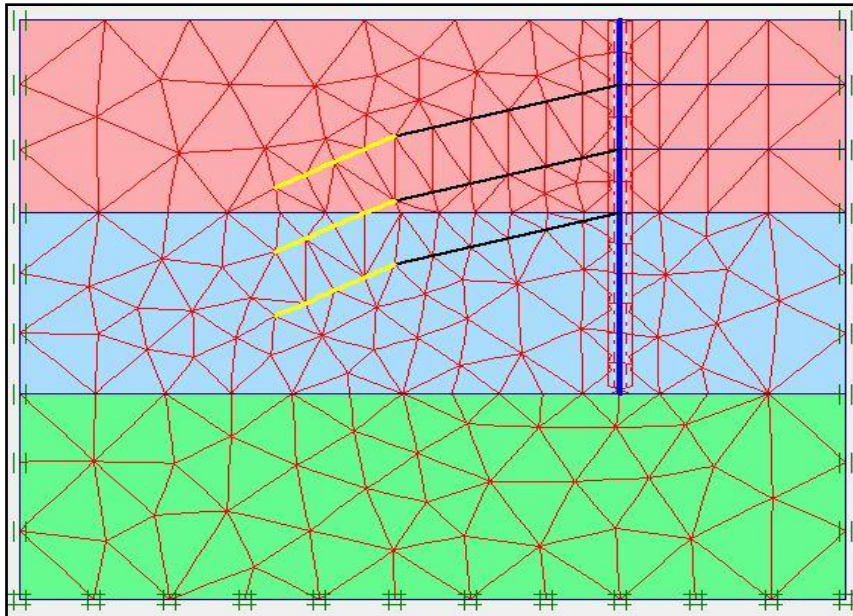


Figure 4.3- Maillage du projet

#### IV.6. Conditions initiales

Les conditions initiales nécessitent la génération des pressions interstitielles initiales ainsi que des contraintes initiales.

##### IV.6.1. Conditions hydrauliques (figure 4.4)

Le niveau de la nappe phréatique initiale est null (0.00 m)

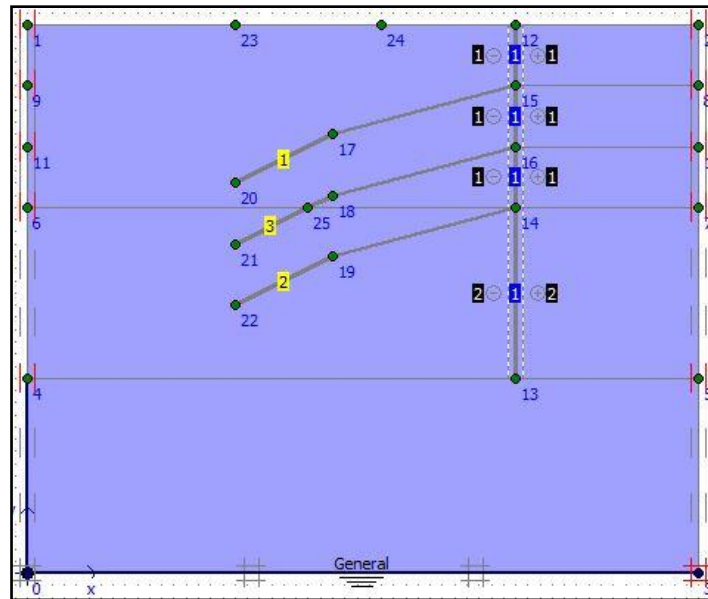


Figure 4.4- Conditions hydrauliques initiales

#### IV.6.2. Contraintes initiales (figure 4.5)

Pour le calcul des contraintes initiales, il faut désactiver les éléments de sol crée par défaut. On génère alors les contraintes initiales en prenant les valeurs de  $K_0$  par défaut. La valeur de  $K_0$  est proposée automatiquement d'après la formule de Jaky.  $K_0 = 1 - \sin\phi$

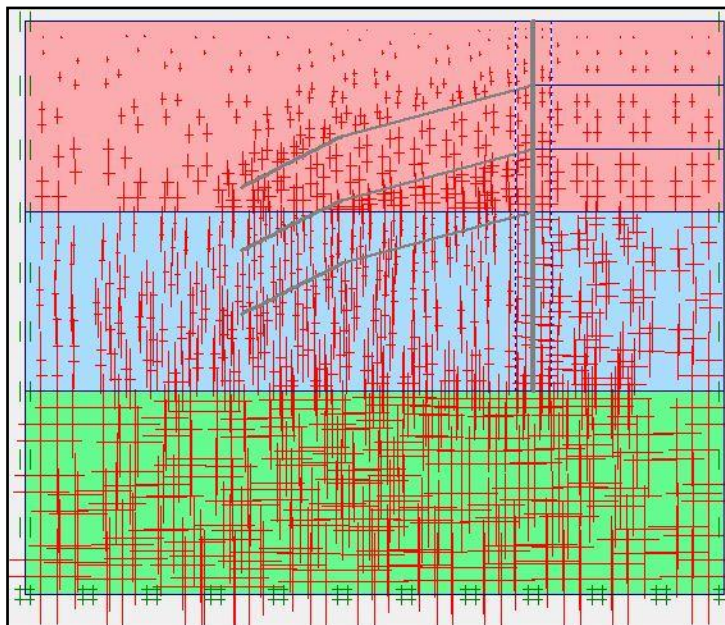
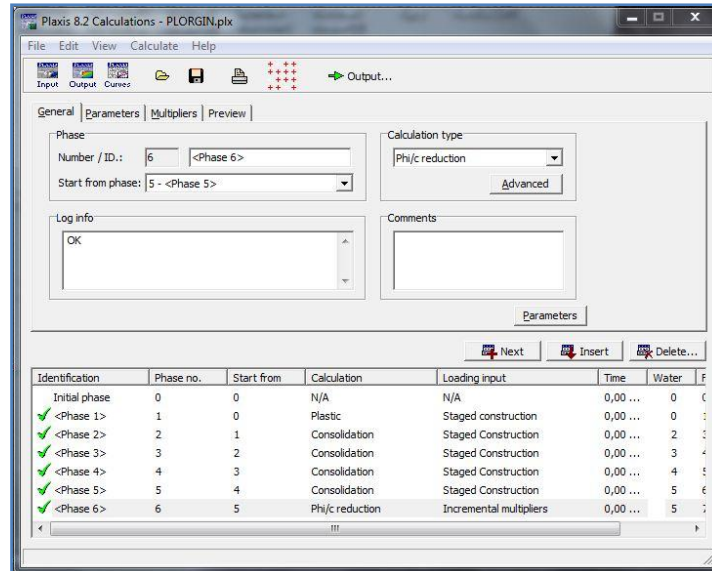


Figure 4.5- Génération des contraintes initiales.

## IV.7. Procédure de calcul

Le calcul du modèle de référence se fait en 6 phases (figure 4.6):



**Figure 4.6- phases de calcul.**

*Phase 1* : Calcul plastique

*Phase 2* : Mise en place la palplanche jusqu'à Z=29m (figure 4.7.a)

*Phase 3* : excavation jusqu'à Z=5m et Mise en place de premier tirant (figure 4.7.b)

*Phase 4* : terrassement jusqu'à Z=10m et Mise en place de deuxième tirant (figure 4.7.c)

*Phase 5* : terrassement jusqu'à Z=15m et Mise en place de troisième tirant (figure 4.7.d)

*Phase 6* : Calcul coefficient de sucrété

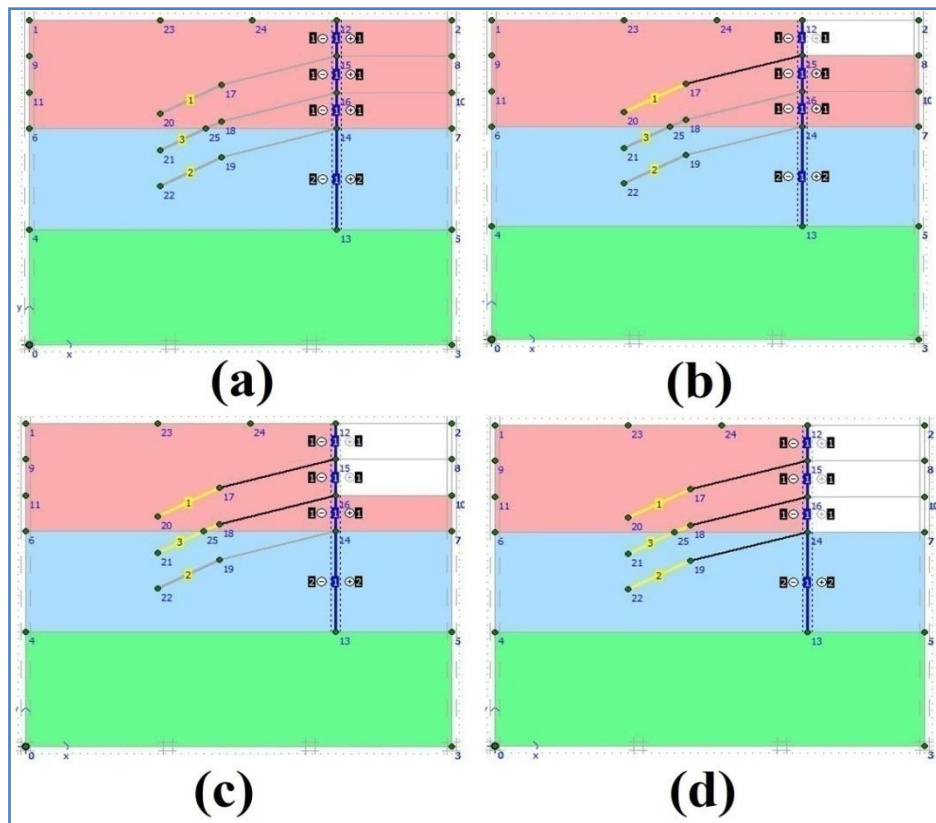


Figure 4.7- étape de excavation et mise les clous.

#### IV.8. Les principaux résultats

On s'intéressera à deux types de déformation : déformation de forme et déformation interne telle que :

- Déformation de maillage.
- Déformation des éléments structuraux indiquée par :
  - ✓ Déplacement horizontale
  - ✓ La courbe de Axial forces.
  - ✓ La courbe de Forces de contrainte.
  - ✓ La courbe du moment.

## IV.9. Résultats de la phase 5

### IV.9.1. Déformation de maillage

La déformation de maillage et des éléments structuraux sont représentés sur la (figure 4.8). On note un déplacement total maximum de  $33.63 \cdot 10^{-3}$

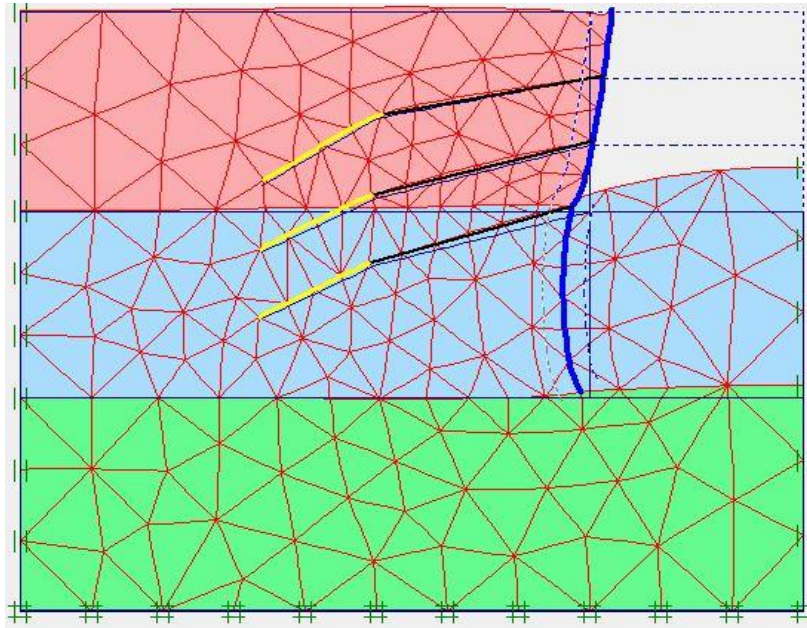


Figure 4.8- Phase 5 : déformation de maillage

### IV.9.2. Déformation des éléments structuraux

Le déplacement horizontale est de  $18.37 \cdot 10^{-3}$  m

force Axial est de 101.80 kN/m (figure 4.9 a)

Force de contrainte (Shear forces) = -80.13 kN /m (figure 4.9.b).

Le moment fléchissant maximum est de 170.96 kNm/m (figure 4.9 c).

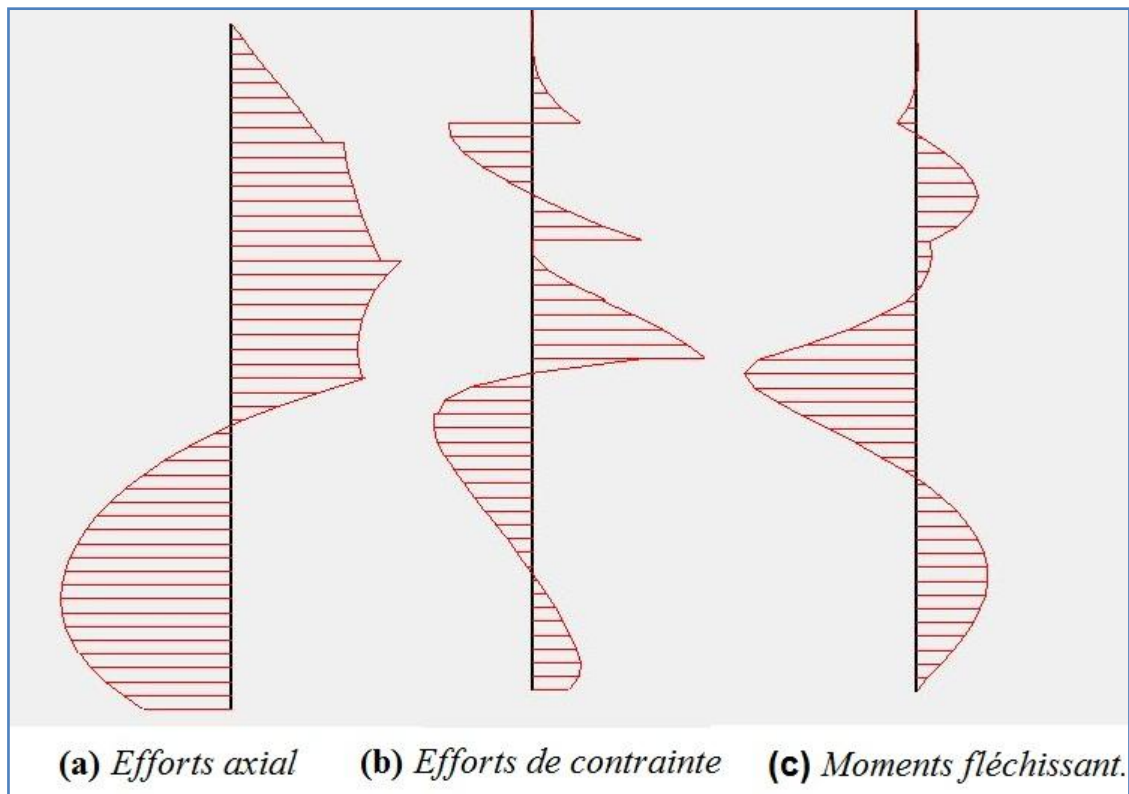


Figure 4.9- parement : résultats de la phase 5.



**CINQUIEME CHAPITRE**  
**ETUDE PARAMERTIQUE**

## CINQUIEME CHAPITRE

### ETUDE PARAMERTIQUE

#### V.1. Introduction

Après l'établissement du modèle et les résultats obtenus, l'étude paramétrique sera effectuée. Il sera question de montrer l'effet de différents paramètres sur les résultats (au niveau de la fouille, sous le parement). On utilise la même coupe du projet, avec les mêmes données et on change chaque fois le paramètre à comparer (les paramètres ont été modifiés un par un), et toujours dans des fourchettes raisonnables.

On a deux types de paramètres :

- Les paramètres de l'interface
- Les paramètres géotechniques.

Les deux types de résultats seront présentés pour la phase 5.

#### V.2. Etude de l'Effet des interfaces

Les interfaces sont utilisées pour modéliser les interactions entre les structures et le sol. Ils sont composés d'éléments "*interface*".

La résistance de l'interface peut être définie grâce aux options suivantes :

##### ***Rigide (Rigid) :***

cette option est utilisée pour que l'interface n'influence pas la résistance du sol avoisinant. Par exemple, les interfaces s'étendant autour des angles d'un élément de structure ne sont pas significatives des interactions sol-structure et ne doivent donc pas subir de réduction de leurs caractéristiques. Ces interfaces doivent être déclarées *Rigid* (ce qui correspond à  $R_{inter} = 1,0$ ). Ainsi, les propriétés de l'interface, y compris l'angle de dilatance  $\psi_i$ , sont identiques aux propriétés du sol excepté le coefficient de Poisson  $\nu_i$ .

**Manuel (Manual) :**

si la résistance d'interface est régie par l'option *Manual*, la valeur de *Rinter* peut être saisie manuellement. En général, pour des interactions réelles entre le sol et un élément de structure, l'interface est plus faible et plus déformable que la couche de sol associée, ce qui signifie que la valeur de *Rinter* est inférieure à 1. Des valeurs représentatives de *Rinter* dans le cas d'interactions entre différents types de sols et de structures peuvent être trouvées dans la littérature. En l'absence d'informations plus détaillées, il est classique de prendre un *Rinter* d'environ 2/3 pour un contact sable-acier et d'environ 1/2 pour des contacts argile-acier ; les interactions avec du béton donnent des valeurs légèrement supérieures. Des valeurs de *Rinter* supérieures à 1 ne devraient normalement pas être utilisées [BRI1, 03].

Les éléments structuraux concernés par cette étude sont :

- Le rideaux de palplanche
- Les tirants d'ancrage

**V.2.1. influence des interfaces sur le comportement du palplanche**

Dans cette étude, la comparaison sera faite sur deux types de résultats :

- Les déplacements horizontale
- Les moments fléchissant

Dans le modèle de référence on a pris un coefficient de rigidité d'interface égale à : 0,67 pour la 1<sup>ère</sup> couche, et rigide pour la 2<sup>ème</sup> couche et 0,70 pour la 3<sup>ème</sup> couche.

Pour les calculs de l'étude paramétrique on utilise :

- $Rinter = 0,3$ .
- $Rinter = 0,6$ .
- $Rinter = 0,8$ .
- $Rinter = 1$  (Rigid)

Pour toutes les couches simultanément

Les résultats des calculs sont :

**parement :**

La comparaison des résultats est présentée par les courbes sur les figures suivantes :

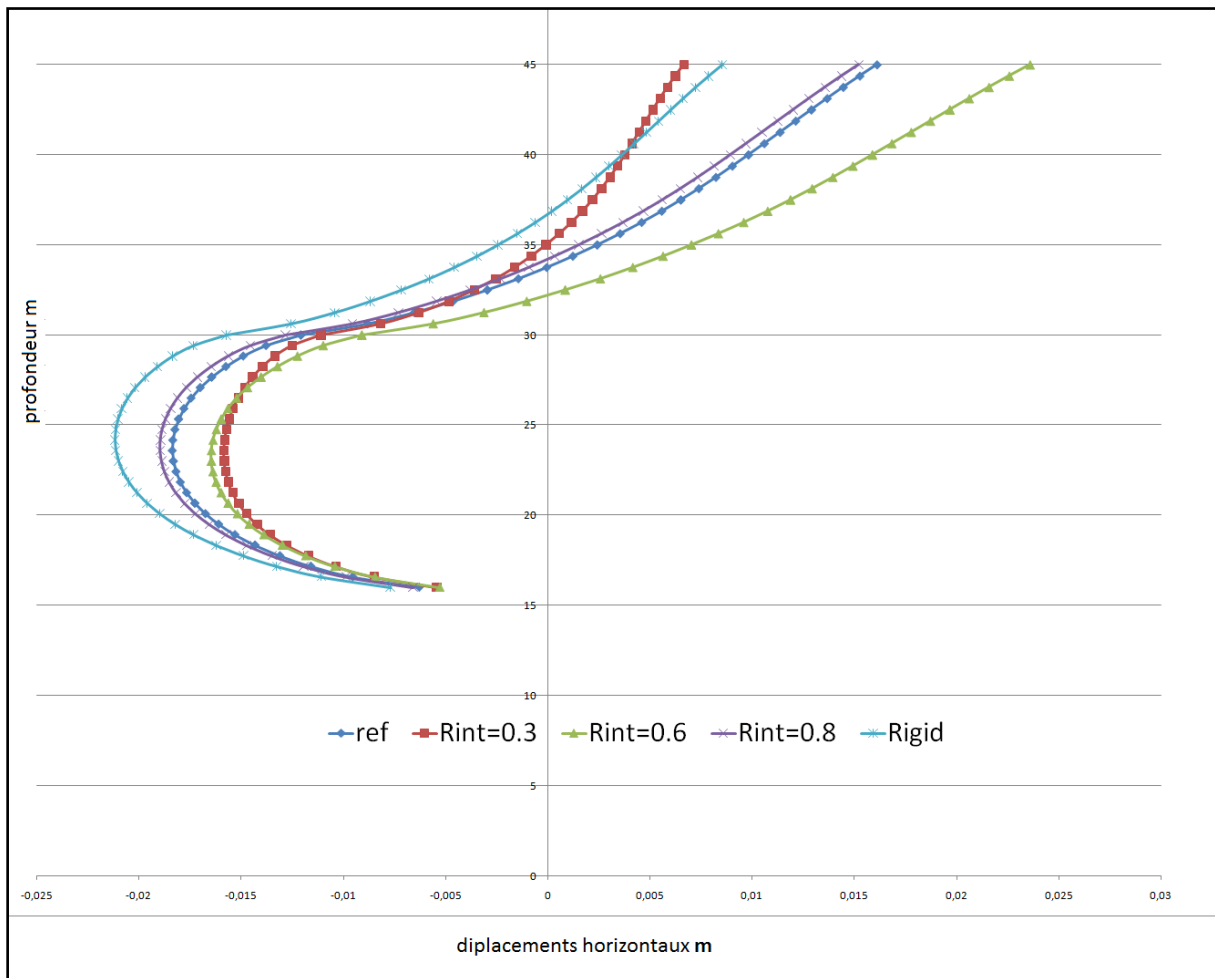


Figure 5.1- influence des interfaces sur les déplacements horizontaux

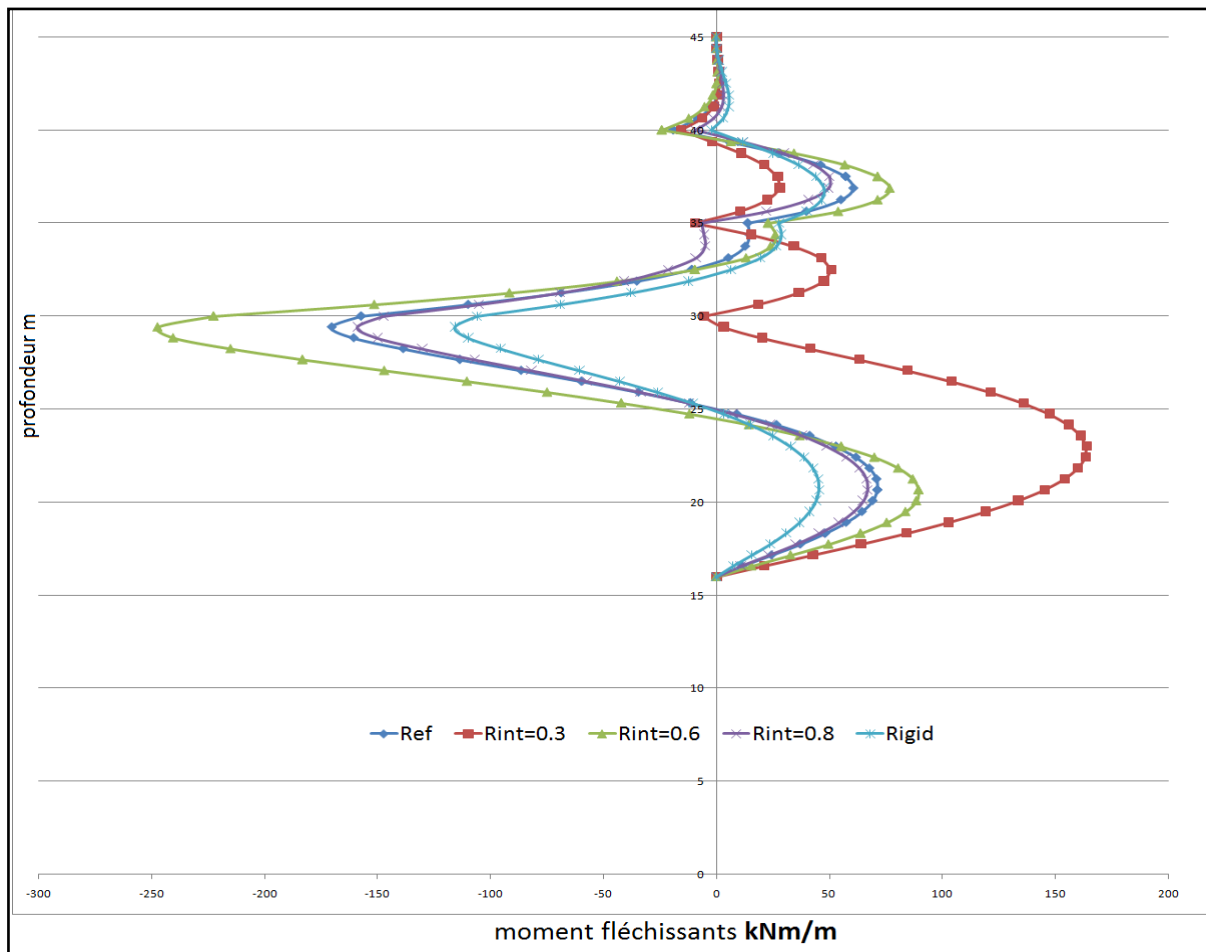


Figure 5.1- influence des interfacessur sur les moment fléchissants

**commentaire :**

Il existe des variations de la variation des résultats des valeurs de rugosité utilisées:

Les valeurs de 0,3 à 0,6 ont un impact important, qui a enregistré une grande valeur pour le déplacement horizontal et la valeur du moment fléchissant

L'influence de ce paramètre est d'autant plus importante que ses valeurs sont plus faibles

### V.2.2. influence des interfaces sur le comportement du tirant

Dans cette étude, la comparaison sera faite sur les contraintes tangentielle:

Pour les calculs de l'étude paramétrique on utilise :

- $R_{inter} = 0,3$ .
- $R_{inter} = 0,6$ .
- $R_{inter} = 0,8$ .
- $R_{inter} = 1$  (Rigid)

Pour toutes les couches simultanément

Les résultats des calculs sont :

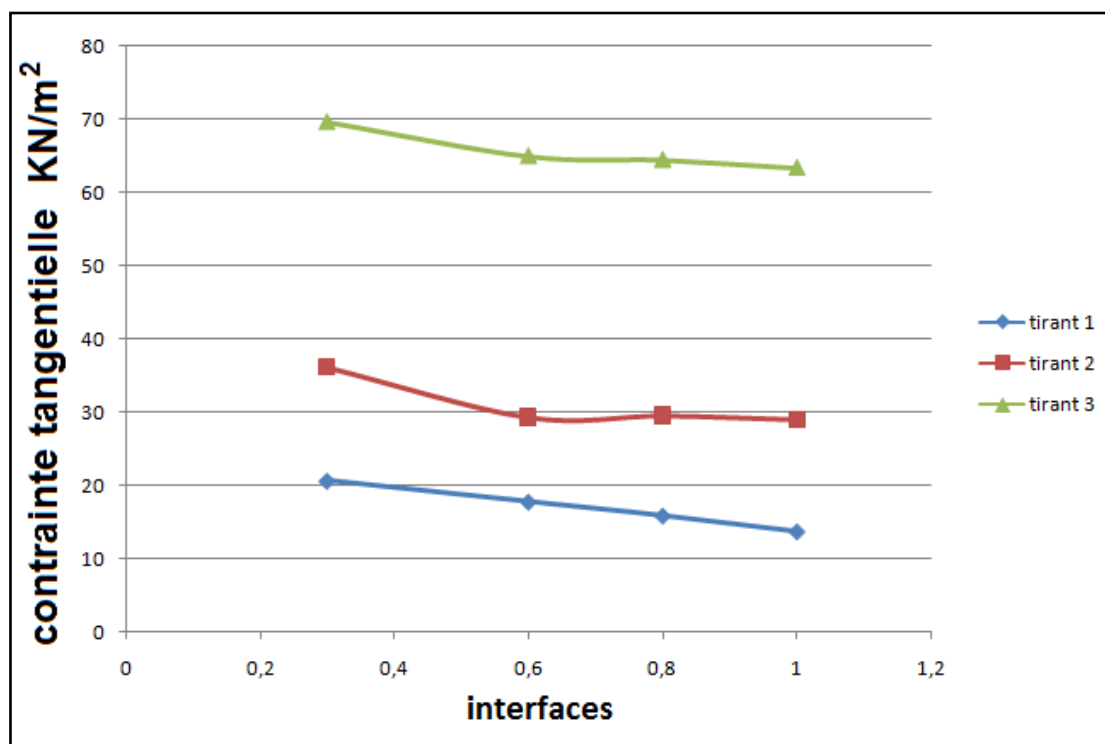


Figure 5.2- influence des interfaces sur sur les contraintes tangentielle

**commentaire :**

Grâce à des courbes noter que la levée de la valeur des interfaces conduit à un manque de valeur contraintes tangentielle

- L'effet de ce paramètre sur les résultats est faible.

### V.3. Effet des paramètres géotechniques

Dans cette étude, la comparaison sera faite sur deux types de résultats :

- Les déplacements horizontale
- Les moments fléchissant

Pour ce qui concerne les paramètres géotechniques on va étudier l'influence de quatre types de paramètres.

Les paramètres du sol sont : la cohésion, l'angle de frottement, le module d'Young (module d'élasticité) et le module de Poisson.

#### V.3.1. Cohésion $c$

Dans le modèle de référence la cohésion  $c = 1.0$  kPa pour la 1ère couche,  $c = 48$  kPa pour la 2ème couche et  $c = 53$  kPa pour la 3ème couche. Pour l'étude paramétriques on fait les calculs pour :

- $c + 25\%$  kPa
- $c - 25\%$  kPa

Pour toutes les couches simultanément.

Les résultats des calculs sont :

#### parement :

La comparaison des résultats est présentée par les courbes sur les figures suivantes :

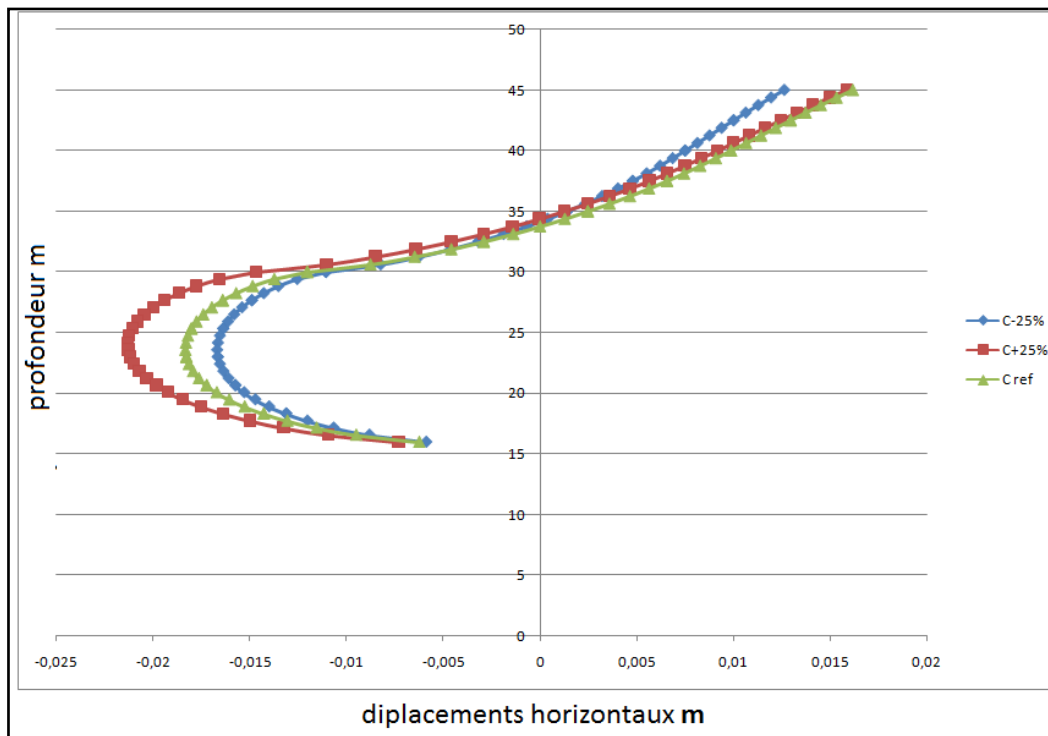


Figure 5.1- influence de cohésion sur les déplacements horizontaux

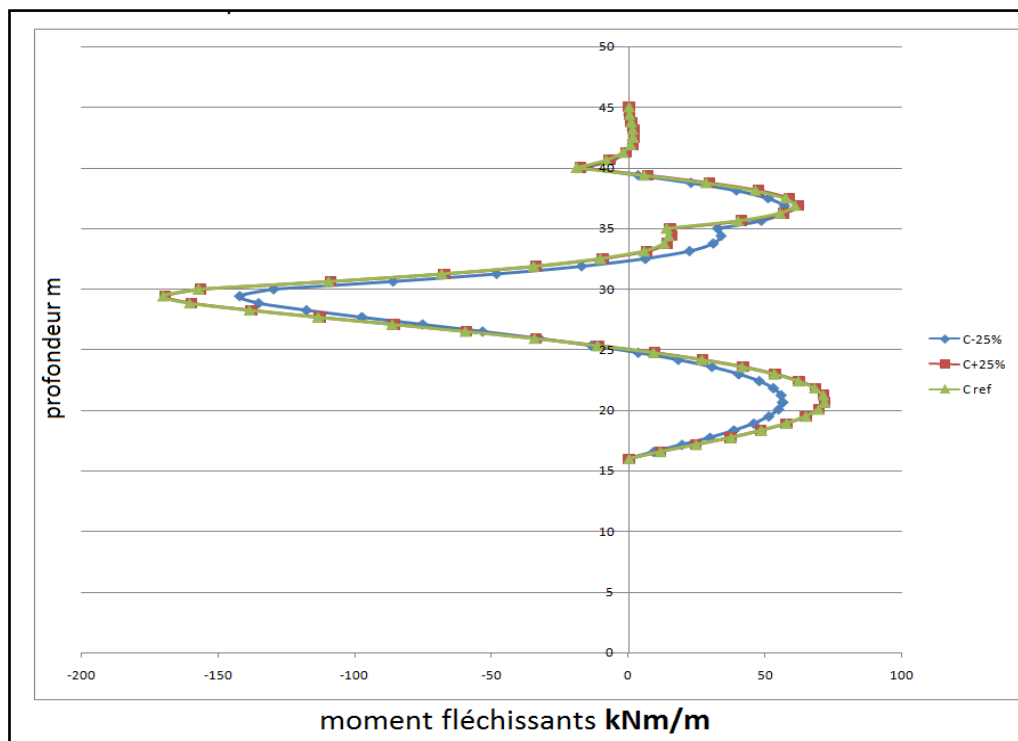


Figure 5.2- influence de cohésion sur les moment fléchissants

**commentaire :**

Une augmentation de la cohésion conduit à :

- on remarque une stabilité des déplacements et des moments ( reste inchangé avec la variation du paramètre C),
- L'effet de ce paramètre sur les résultats est très faible.

Les courbes 5.5 et 5.6 ne sont pas très sensible au variation de paramétré C

**V.3.2. Angle de frottement  $\varphi$** 

L'angle de frottement  $\varphi$  (phi) est entré en degrés. Des angles de frottement élevés, obtenus parfois pour des sables denses, augmenteront de manière substantielle la difficulté numérique des calculs plastiques (BRI1, 2003).

Le temps de calcul varie exponentiellement avec de l'angle de frottement. Par conséquent, les angles de frottement élevés devraient être évités lors des calculs préliminaires pour un projet. Le temps de calcul deviendra important si des angles de frottement supérieurs à 35 degrés sont utilisés. Dans le modèle de référence l'angle de frottement est pris entre 17.93° et 32°.  $\varphi = 30^\circ$  pour la première couche,  $\varphi = 32^\circ$  pour la deuxième couche et  $\varphi = 17.93^\circ$  pour la troisième couche.

Pour l'étude paramétrique, on fait les calculs pour :

- $\varphi +25\%$  kPa
- $\varphi - 25\%$  kPa

**parement :**

La comparaison des résultats est présentée par les courbes sur les figures suivantes :

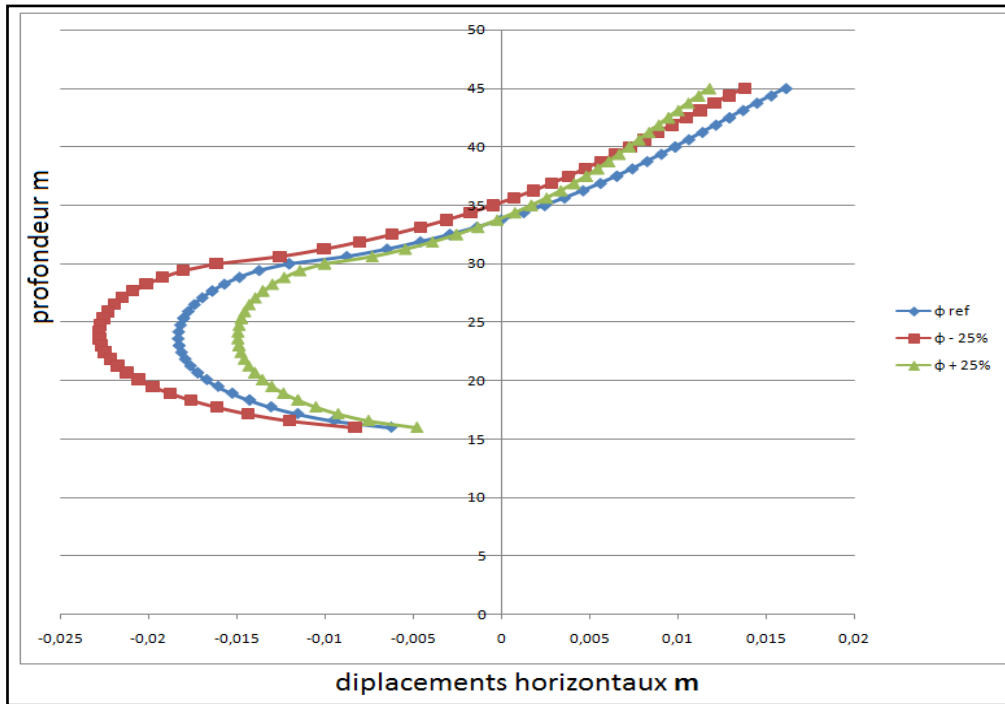


Figure 5.3- influence de L'angle de frottement sur les déplacements horizontaux

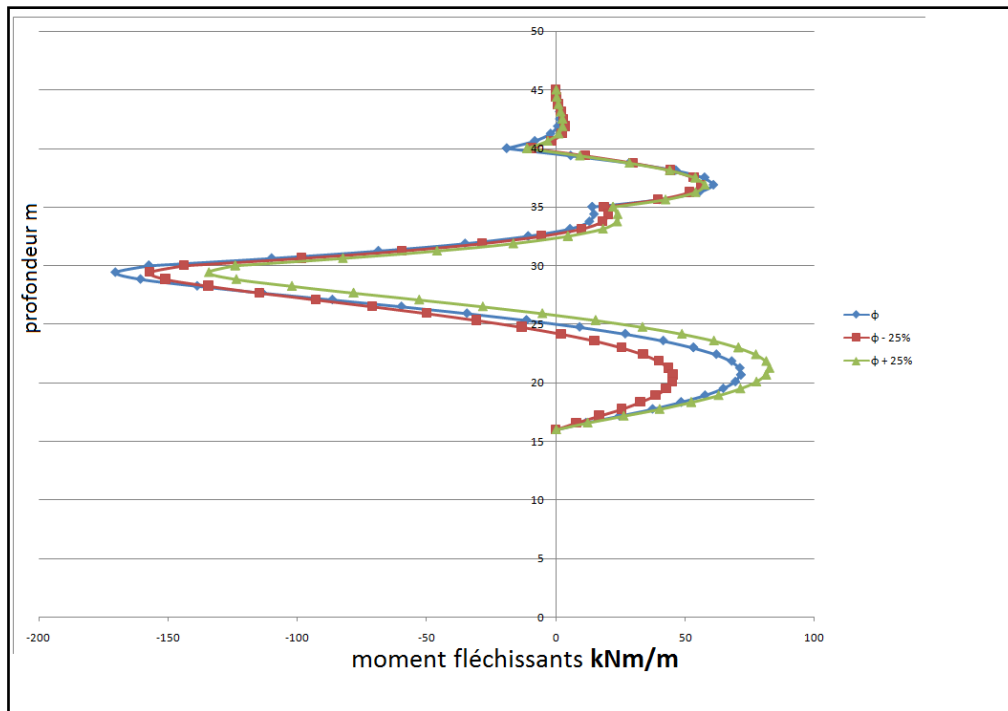


Figure 5.4- influence de L'angle de frottement sur les moment fléchissants

commentaire :

Une augmentation de l'angle de frottement conduit à :

- une diminution très sensible des déplacements de la paroi.
- une diminution très faible des moments dans la paroi.

Une diminution des angles de frottement de 25% a une influence beaucoup plus importante qu'une augmentation de ceux-ci de 25%.

### V.3.3. Module d'Young $E$

*PLAXIS* utilise le module d'Young comme module de déformation de référence dans le modèle élastique et le modèle de Mohr-Coulomb, mais d'autres modules de déformation sont également considérés. Un module de déformation a la dimension d'une contrainte (force par unité de surface). Les valeurs de raideur adoptées dans un calcul demandent une attention particulière parce que la plupart des géomatériaux présente un comportement non linéaire dès le début du chargement (BRI1, 2003).

En mécanique des sols, la pente initiale est appelée  $E_0$  et le module sécant à 50% de la résistance en compression est noté  $E_{50}$ . Pour des argiles très surconsolidées et quelques roches avec un large domaine élastique, il est réaliste d'utiliser  $E_0$  alors que pour les sables et les argiles normalement consolidées, il est préférable de prendre  $E_{50}$ .

Pour les sols, le module initial et le module sécant tendent à augmenter avec la pression de confinement. Par conséquent, les couches de sol en profondeur ont souvent une raideur plus élevée que les couches en surface. De plus, la raideur apparente dépend du chemin de contrainte suivi. La raideur durant les cycles charge-décharge est supérieure à celle durant un chargement primaire. En outre, la raideur observée pour un sol en terme de module d'Young est généralement plus petite pour des compressions drainées que pour du cisaillement. Donc, en choisissant un module de déformation constant pour représenter le comportement du sol,

l'utilisateur devra retenir une valeur qui prenne à la fois en compte le niveau de contrainte et le chemin de contrainte. Remarquons que des comportements de sols dépendant des contraintes sont pris en compte dans les modèles avancés de *PLAXIS*.

Dans le modèle de Mohr-Coulomb, *PLAXIS* propose une option spéciale pour définir une rigidité variable avec la profondeur (voir *Paramètres avancés*).

Dans le modèle de référence on a pris un module pour chaque couche :

- $E = 8 \cdot 10^3$  kPa pour la 1ère couche ;
- $E = 3 \cdot 10^4$  kPa pour la 2ème couche ;
- $E = 8 \cdot 10^4$  kPa pour la 3ème couche.

Pour les calculs de l'étude paramétrique on utilise :

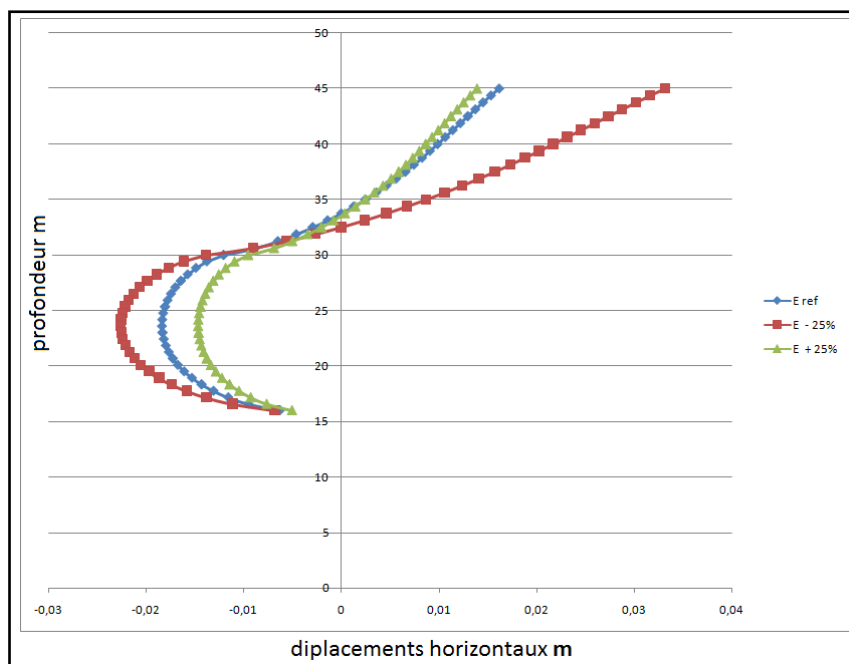
- $E - 25\%$
- $E + 25\%$

Pour tous les modules simultanément.

On obtient les résultats suivants :

**parement :**

La comparaison des résultats est présentée par les courbes sur les figures suivantes :



**Figure 5.5- influence de module d'Young sur les déplacements horizontaux**

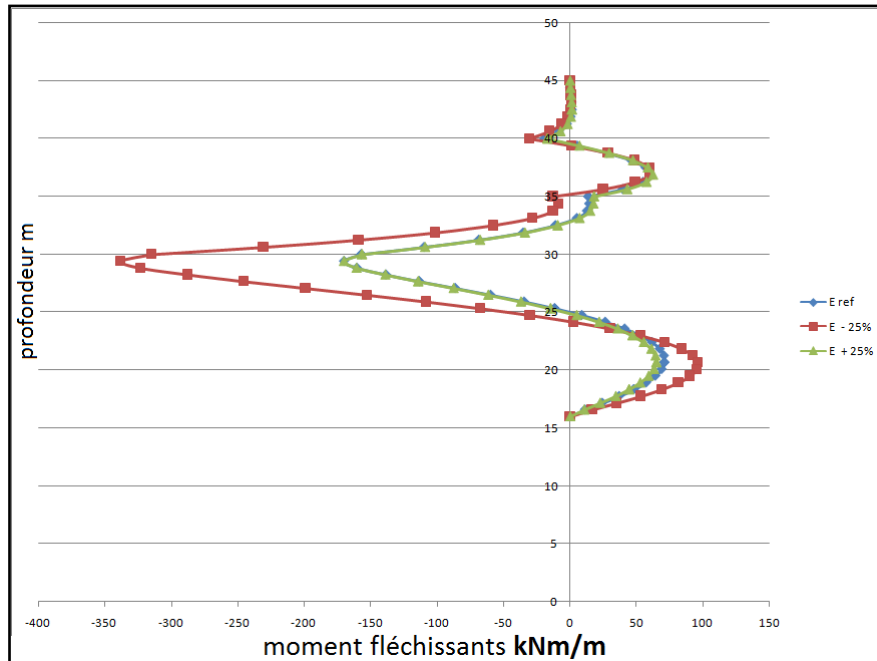


Figure 5.6- influence de module d'Young sur les moment fléchissants

**commentaire :**

Une augmentation du module d'élasticité conduit à :

Sur les figure 5.5, 5.6 nous remarquons que l'augmentation du paramètre E se traduit par une diminution des déplacements et le moment fléchissant.

Une diminution du module d'élasticité de 25% a une influence plus a important qu'une augmentation de ceux-ci de 25%.

L'influence de ce paramètre est d'autant plus importante que ses valeurs sont plus faibles.

**V.3.4. Coefficient de Poisson  $\nu$**

Dans le modèle de référence on a pris un coefficient pour chaque couche :  $\nu = 0.3$  pour la 1ère couche, et  $\nu = 0.25$  pour la 2ème et  $\nu = 0.3$  pour la 3ème couche. Pour les calculs de l'étude paramétrique on utilise :

- $\nu - 25\%$
- $\nu + 25\%$

Pour tous les coefficients simultanément.

Les résultats des calculs sont :

parement :

La comparaison des résultats est présentée par les courbes sur les figures suivantes :

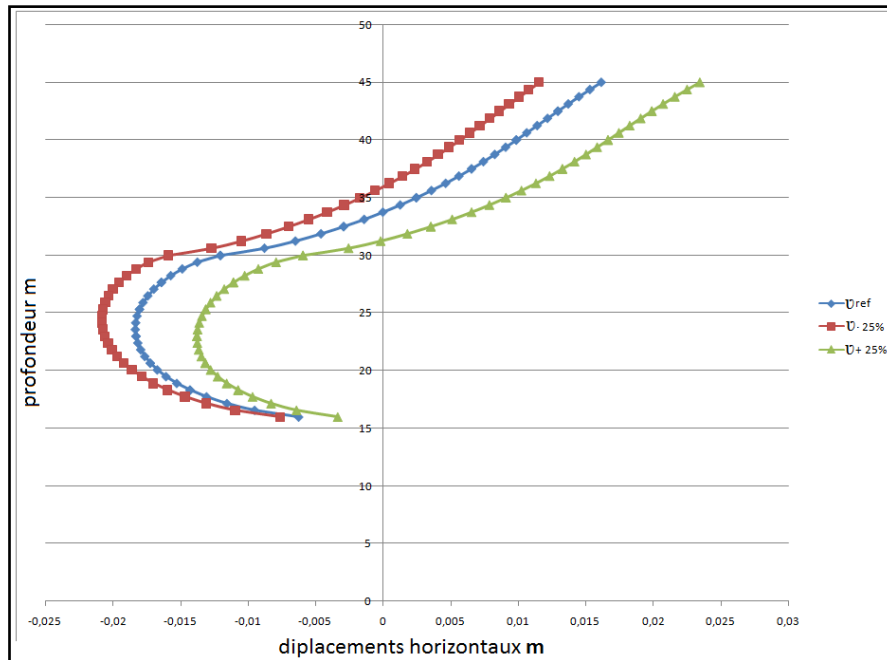


Figure 5.7- influence de Coefficient de Poisson sur les déplacements horizontaux

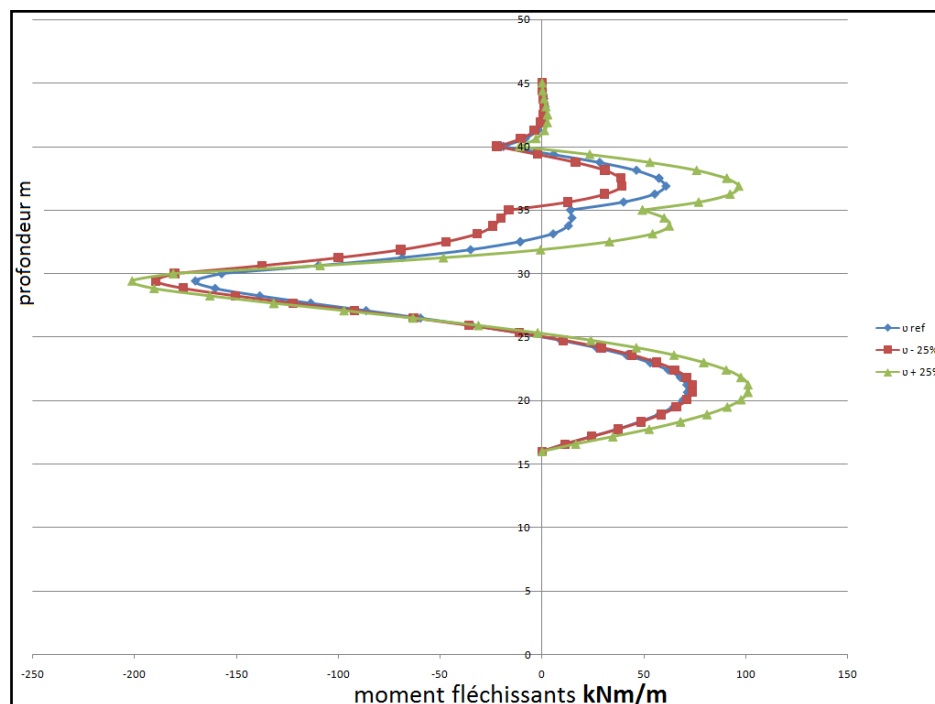


Figure 5.8- influence Coefficient de Poisson sur les moment fléchissants

**commentaire :**

Nous constatons sur les figures 5.7 ,5.8 que la augmentation du coefficient de Poisson conduit à :

- une diminution des déplacements de la paroi
- une diminution très faible des moments dans la paroi,

L'influence de ce paramètre est d'autant plus importante que ses valeurs sont plus faibles



**CONCLUSION GENERALE**

## VI. Conclusion générale

Les palplanches qui présentent d'énormes avantages dans l'économie de matériaux de construction et d'énergie de battage sont très utilisées dans le monde comme ouvrage de protection, de soutènement ou d'étanchéisation des sols et ce notamment dans le domaine des travaux maritimes.

Les méthodes de dimensionnement des écrans de soutènement reposent actuellement sur diverses règles de calcul. Les méthodes numériques présentent l'avantage de prendre en compte de manière plus précise le comportement du sol et de l'interface sol-paroi, elles permettent de représenter les interactions du soutènement avec d'autres composantes de l'ouvrage en donnant des informations très riches relatives aux déplacements et déformations et de prendre en considération l'interaction avec le milieu environnant.

La simulation numérique et l'analyse du comportement d'un écran de soutènement du type palplanche métallique stabilisée avec tirant fichée dans une couche d'argile, avec l'introduction des éléments d'interfaces a permis d'envisager l'effet de l'interaction sol-structure sur le comportement de l'écran à savoir les déplacements et le moment fléchissant, la variation du paramètre de l'interface  $R_{int}$ , nous a permis de conclure que si la valeur  $R_{int} < 0.3$  il aura arrachement des tirants, si  $R_{int}$  varie de  $[0.3 \text{ } 1]$ , on remarque que le moment fléchissant et les déplacements horizontaux sont très sensibles à la variation du paramètre de l'interface  $R_{int}$ , pour la contrainte tangentielle dans les tirants on remarque que si on augmente la rugosité de l'interface on diminue la contrainte tangentielle dans les tirants ce qui implique la stabilité du paroi moulée.

L'étude paramétrique présente un intérêt particulier pour les ingénieurs géotechniciens car elle permet d'évaluer l'influence des paramètres sur la fiabilité des résultats des modélisations. Elle peut être employée pour obtenir les coefficients de variation et pour définir des intervalles de confiance sur les résultats de la modélisation tels que les déplacements, les déformations, les moments fléchissant. Dans la plupart des modélisations géotechniques réalisées, des paramètres géotechniques des matériaux soit la plus importante. Ces résultats, donnent une première idée générale de l'influence de chacun des paramètres du modèle sur Les courbes de moment fléchissant et les déplacements des points situés au niveau de la base, la tête, la gauche de la palplanche. Nous pouvons classer l'ensemble de ces paramètres en deux

catégories. Les paramètres potentiellement les plus influents sont  $\phi$ ,  $C$ . Nous observons que  $E$  et  $\nu$  et le maillage ont une influence moyenne.

En fin on peut conclure que l'interaction sol structure dans les parois moulées ont un grand effet sur le comportement de ces ouvrages, que ce soit pour l'ouvrage entier ou pour les tirants d'ancrage, malgré ça cet effet est toujours négligé dans les études des cas pratiques.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**BAAZIZ Salah Eddine:**«< Modélisation numérique des ouvrages de soutènement en sol renforcé>>, mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de magister, 02/05/2012.

**Ben Hacene Asma:**«< Effet des paramètres de l'interface sur les déformations d'un massif de sol soutenu par un mur rigide>>, mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de master 2<sup>ème</sup> année promotion juin 2015,

**BENNACER mawloud:**«< etude de l'interface «sol-structure» sous chargement monotone a faible confinement>>, mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de master, 2015/2016.

**Brinkgereve R.B.J. et Vermeer P.A. :** « PLAXIS Version 8, manuel de référence », DELFT University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas, 2003.

**Chogueur Aissa:**«< Modelisation numérique d'un écran de soutènement cas de l'interaction écran-fondation>>, mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de magister, 02/06/2013.

**Delattre Luc, (2004)-** Un siècle de méthodes de calcul d'écrans de soutènement : III. La modélisation des écrans de soutènement par la méthode des éléments finis, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées 252-253, Réf.4529-PP.95-117.

**Etienne Flavigny-** Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS- Formation Plaxis 2D , (Téléchargé ).

**Lahmadi Azzeddine:**«< étude paramétrique de l'interaction entre ouvrages :tunnel-batiment-excavation>>, mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de magister, 28/06/2006.

**LCPC:(Techniques et Méthodes des laboratoires des ponts et chaussées).** (2003). ouvrages de soutènement recommandations pour l'inspection détaillée,le suivi et le diagnostic des rideaux de palplanches métalliques