

République Algérienne Démocratique et Populaire  
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



**Ecole Nationale Supérieure**  
**des Travaux Publics**  
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Code : .....

# Mémoire

*Pour l'Obtention du Diplôme de Master*  
*Filière : TRAVAUX PUBLICS*  
*Option : INFRASTRUCTURE DE BASE*

## Thème

*Étude paramétrique sur les propriétés d'interface  
sol pieu*

-Encadré par :

- Mme . BADAOUI AZHAR

- Présenté par :

- BOUZERDOUM HICHAM

**-Promotion 2015-**

*Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.*

## *Remerciements*

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

*En second lieu, mon encadreur*

*Mme: BADAOUI AZHAR, pour ses appréciations compétentes, ses précieux  
conseils et son aide durant toute la période du travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt  
qu'ils ont porté à mon travail. Et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé  
de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*



## Dédicaces

*Je dédie ce travail :*

*À mes parents qui ont suivi avec attention et un grand intérêt mon parcours et ont mis à ma disposition tous les moyens requis pour mon éducation et mon instruction ;*

*À mes chers frères et sœurs ;*

*À tous les membres de ma famille ;*

*À tous ceux qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail.*

<b>Introduction générale :</b> .....	1
 <b>Chapitre I : Généralité sur les pieux</b> 	
I.1 Introduction : .....	2
I.2 Définition d'un pieu : .....	2
I.3 Classification des pieux : .....	3
I.3.1 Classification selon la transmission des charges au sol et le mode de travail du pieu : .....	3
I.3.2 Classification selon leur mode de réalisation : .....	4
I.3.2.a Pieux mis en place avec refoulement du sol : .....	5
I.3.2.b Pieux mis en place avec excavation du sol : .....	6
I.4 Calcul de la capacité portante : .....	7
I.4.1 Essai de chargement statique d'un pieu sous compression axiale : .....	8
I.4.2 Pressiomètre MENARD : .....	10
I.4.2.a Terme de pointe .....	11
I.4.2.b Détermination du frottement latéral unitaire $q_s$ pour un élément de fondation .....	13
I.4.3 Le pénétromètre statique : .....	13
I.4.3.a Terme de pointe : .....	13
I.4.3.b Terme de frottement latéral .....	14
I.4.4 Pénétromètre dynamique .....	15
I.4.4.a Méthode des Hollandais : .....	15
I.4.4.b Méthode de Crandall : .....	16
I.5 Etude d'un pieu isolé : .....	17
I.5.1 Principe de fonctionnement : .....	17
I.5.2 Pieu isolé sous charge axiale .....	18
I.5.2.a La charge limite et la charge limite de fluage .....	18
I.5.2.b Prédimensionnement d'un pieu isolé .....	20
I.6 Etude d'un Groupe de pieux .....	20
I.7 Conclusion .....	21

## Chapitre II : Modélisation du comportement de l'interface

II.1 Introduction :	23
II.2 Définition de l'interface :	23
II.3 Caractérisation de l'interface :	23
II.4 Comportement du matériau de la structure :	25
II.5 Comportement de l'interface :	25
II.5.1 Modèles élastoplastiques bidimensionnels :	25
II.5.2 Modèles élastoplastiques tridimensionnels :	26
II.6 Modélisation numérique du contact par la méthode des éléments finis :	27
II.6.1 Élément de l'interface :	27
II.6.2 Le contact sol – structure :	29
II.6.3 Modélisation des interfaces :	31
II.6.3.1 Approche de type contact :	31
II.6.3.2 Approche de type couche mince :	34
II.8 Conclusion :	35

## Chapitre III : Modélisation numérique

III.1 Présentation de l'ouvrage :	36
III.2 Calcul de la portance ultime du pieu (couche de portance) :	36
III.3 Présentation du logiciel :	38
III.4 Les modèles de comportement intégrés dans Plaxis 3D Foundation :	38
III.4.1 Modèle élastique linéaire :	38
III.4.2 Le modèle de Mohr-coulomb :	39
III.4.2.a Les paramètres du modèle :	39
III.5 Calcul du déplacement et de la déformation sous charge verticale :	41
III.5.1 Simulation numérique du Pieu :	41
III.5.2 Modélisation du Sol :	42
III.5.3 Modélisation de l'interface sol-pieu :	44
III.5.4 Le maillage en 2D :	44
III.5.5 Le maillage en 3D :	44
III.5.6 Les étapes de calcul :	45
III.5.7 Affichage des résultats :	47
III.6 Conclusion :	55

**Chapitre VI : Etude paramétrique**

IV.1 Introduction : .....	55
IV.2 Influence des paramètres d'interface sol-pieu :.....	55
IV.2.1 Influence de la cohésion de l'interface : .....	55
IV.2.1.1 Les résultats : .....	56
IV.2.1.2 Interprétation des résultats :.....	61
IV.2.2. Influence de l'angle de frottement d'interface :.....	61
IV.2.2.1 Les résultats : .....	62
VI.2.2.2 Interprétation des résultats :.....	67
IV.2.3 Influence de la rigidité de l'interface :.....	67
IV.2.3.1 Les résultats :.....	68
IV.2.3.2 Interprétation des résultats :.....	72
IV. Conclusion :.....	73
<b>Conclusion générale : .....</b>	<b>74</b>

**Bibliographie**

**Annexes**

Tableau I.1 Valeurs du coefficient de portance $k_p$ .....	13
Tableau I.2 classification des sols .....	13
Tableau I.3 Détermination des abaques.....	14
Tableau I.4 Les valeurs de facture de portance $K_c$ .....	15
Tableau I.5 Choix $q_s$ max et le coefficient .....	16
Tableau III.1 Différents ouvrages d'art.....	36
Tableau III.2 Caractéristiques du pieu.....	37
Tableau III.3 Valeur du coefficient rhéologique pour des différents sols.....	40
Tableau III.4 Caractéristiques mécaniques du pieu.....	41
Tableau III.5 Caractéristiques mécaniques des couches de sol.....	43
Tableau III.6 Résultats concernant le sol d'assise.....	54
Tableau III.7 Résultats concernant l'interface sol-pieu.....	54
Tableau III.8 Résultats concernant le pieu.....	55
Tableau IV.1 Résultats obtenues pour l'augmentation de la cohésion d'interface .....	56
Tableau IV.2 Résultats obtenues pour l'augmentation de la cohésion d'interface.....	58
Tableau IV.3 L'influence de la variation de la cohésion d'interface.....	60
Tableau IV.4 Résultats obtenues l'augmentation l'angle de frottement d'interface .....	62
Tableau IV.5 Résultats obtenues pour la diminution de l'angle de frottement d'interface	64
Tableau IV.6 L'influence de la variation de l'angle de frottement.....	66
Tableau IV.7 Résultats obtenues pour la diminution de l'angle de frottement d'interface	68
Tableau IV.8 L'influence de la variation de l'angle de frottement.....	70
Tableau IV.9 L'influence de la variation de la rigidité interface.....	72

Figure I.1. Définition de la hauteur d'encastrement L et mécanique De .....	4
Figure I.2 Classification suivant la transmission des charges au sol et le mode de travail du pieu .....	5
Figure I.3 Les types des pieux selon leur mode de réalisation .....	5
Figure I.4 Classification des pieux .....	6
Figure I.5 Schématisation d'un pieu battu moulé .....	7
Figure I.6 Schématisation d'un pieu foré tubé .....	8
Figure I.7 Dispositif de chargement et de mesure pour essai de pieu (schéma de principe).....	9
Figure I.8 Droites et courbes de fluage des 2 <sup>ème</sup> , 5 <sup>ème</sup> , 7 <sup>ème</sup> et 9 <sup>ème</sup> palier .....	10
Figure I.9 Détermination de la charge critique de fluage Q <sub>ce</sub> .....	10
Figure I.10 Essai de chargement de pieu. Courbe effort déplacement en tête .....	11
Figure I.11 Schéma de l'essai pressiométrique et courbe d'interprétation.....	12
Figure I.12 Schéma de calcul de la pression limite nette équivalente .....	12
Figure I.13 Schéma du pénétromètre dynamique .....	17
Figure I.14 Mécanisme de frottement latéral positif et négatif .....	18
Figure I.15 Définition du pieu isolé selon son mode de fonctionnement .....	19
Figure I.16 La courbe de chargement axiale d'un pieu .....	20
Figure I.17 Représentation de la répartition des contraintes pour le cas d'un pieu isolé et le cas du Groupe de pieux .....	21
Figure II.1 Contraintes agissant sur l'interface .....	26
Figure II.2 Élément de l'interface sans épaisseur (Discrétisation numérique du problème de contact sol-structure ).....	27
Figure II.3 Élément d'interface couche mince (Discrétisation numérique du problème de contact sol-structure) .....	28
Figure II.5 Modélisation du contact .....	28
Figure II.4 Exemples des situations d'interface .....	30
Figure II.6 Mode de déformation de l'interface .....	31
Figure II.7 Élément de joint Goodman .....	32
Figure II.8 Élément de joint de type ressort .....	32
Figure II.9 Modèle de Mohr Coulomb .....	33
Figure III.1 Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb .....	39
Figure III.2 Propriété du pieu .....	42
Figure III.3 définition de la charge axiale .....	42
Figure III.4 Propriétés du sol et les limites de ses couches .....	43
Figure III.5 Maillage en 2D du PV1 .....	44
Figure III.6 Maillage en 3D .....	45
Figure III.7 Paramètre de la deuxième phase .....	46
Figure III.8 Le point sélectionné .....	46
Figure III.9 Affichage et interprétation des résultats .....	47
Figure III.10 Présentation de déplacement horizontal du sol .....	48
Figure III.11 Présentation de déplacement vertical du sol .....	48
Figure III.12 Contrainte totale du sol .....	49
Figure III.13 Déplacement vertical à l' interface sol-pieu .....	49
Figure III.14 Déplacement horizontal à l'interface sol-pieu .....	50
Figure III.15 La contrainte effective à l'interface sol-pieu .....	50
Figure III.16 Déplacement vertical du pieu .....	51
Figure III.17 Déplacement horizontal du pieu .....	51
Figure III.18 Moment de pieu .....	52

Figure III.19 Courbe charge-déplacement vertical à l'interface sol-pieu .....	52
Figure III.20 Courbe charge-déplacement horizontal à l'interface sol-pieu .....	53
Figure III.21 Courbe charge-déplacement vertical du pieu .....	53
Figure III.22 Courbe charge-déplacement horizontal du pieu .....	54

فهم الهدف هذا هو واجهة تأثيرا واجهة :  
- يسمح - التركيز تحليل  
العددية واجهة  
- بلاكسيس ثلاثي ابعاد

### Résumé :

La compréhension de l'aspect complexe de l'interaction sol-pieu permet de bien maîtriser la modélisation numérique de l'interface sol-pieu.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier le comportement du système sol-pieu, on se concentrant précisément sur l'analyse des paramètres d'interface, qui influents sur le pieu et le sol de fondation.

Mots clés : Interface sol-pieu, charge axiale, modélisation – PLAXIS 3D, éléments finis.

### Abstract:

Understanding the complex aspect of the soil-pile interaction allows good master the numerical modeling of soil-pile interface.

The objective of this thesis is to study the behavior of soil-pile system, focusing specifically on the analysis of interface parameters that influential on the pile and the foundation soil.

Keywords: soil-pile interface, axial load modeling - PLAXIS 3D finite elements.

## **Introduction générale**

Les ouvrages en génie civil sont fréquemment réalisés sur des sols de différentes qualités. Lorsque la qualité de ces sols est médiocre, les ingénieurs optent pour des fondations profondes pour accéder aux couches de sol offrant une meilleure portance. Parmi celles-ci les fondations sur pieux qui constituent une solution souvent préconisée en construction.

Le comportement d'un pieu isolé ou un groupes des pieux, demeure difficile à analyser et d'appréhender d'une façon complète, puisque il fait intervenir plusieurs paramètres notamment les propriétés du sol, les conditions de contact entre les pieux (interface) et le sol et enfin l'interaction sol-pieux.

L'objet principal de ce travail est d'étudier le comportement d'un pieu isolé sous une charge axiale, Au premier lieu on va estimer les déplacements, les contraintes et les moments du pieu, du sol d'assise et à l'interface sol-pieu, ensuite on passe à l'étude paramétrique on faisant varier les paramètres d'interface sol pieu (la cohésion d'interface, angle de frottement, et la rigidité d'interface), on visualise de nouveaux les résultats afin de déterminer l'influence de ces paramètres sur le comportement des pieux et le sol de la fondation.

Pour réaliser ce travail nous avons opté pour la modélisation tridimensionnelle par éléments finis avec le code du calcul Plaxis 3d foundation. Les simulations numériques ont été effectuées en supposant un comportement type Moh-Coulomb pour le sol et un comportement linéaire élastique pour l'élément pieu. Pour cela, le mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre comporte des généralités sur les pieux, les différents types de pieux selon leur mode de mise en place ainsi que leurs principes de fonctionnement.

Le deuxième chapitre consiste en une modélisation numérique du comportement de l'interaction sol-pieu, il comporte une étude théorique dans laquelle on définit l'interaction sol structure et les caractéristiques définissent cette l'interface.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation numérique de l'interaction sol-pieu sous une charge statique verticale appliquée à la tête du pieu, en utilisant le code de calcul PLAXIS 3D FONDATION.

Dans le quatrième chapitre, une étude paramétrique est réalisée, on faisant varier les paramètres d'interface sol-pieu, et on détermine l'influence de ces paramètres sur le comportement des pieux et des sols de la fondation.

---

# Généralité sur les pieux

---

# I

I.1 Introduction : .....	2
I.2 Définition d'un pieu : .....	2
I.3 Classification des pieux : .....	3
I.3.1 Classification selon la transmission des charges au sol et le mode de travail du pieu : .....	3
I.3.2 Classification selon leur mode de réalisation : .....	4
I.3.2.a Pieux mis en place avec refoulement du sol : .....	5
I.3.2.b Pieux mis en place avec excavation du sol : .....	6
I.4 Calcul de la capacité portante : .....	7
I.4.1 Essai de chargement statique d'un pieu sous compression axiale : .....	8
I.4.2 Pressiomètre MENARD : .....	10
I.4.2.a Terme de pointe .....	11
I.4.2.b Détermination du frottement latéral unitaire $q_s$ pour un élément de fondation .....	13
I.4.3 Le pénétromètre statique : .....	13
I.4.3.a Terme de pointe : .....	13
I.4.3.b Terme de frottement latéral .....	14
I.4.4 Pénétromètre dynamique .....	15
I.4.4.a Méthode des Hollandais : .....	15
I.4.4.b Méthode de Crandall : .....	16
I.5 Etude d'un pieu isolé : .....	17
I.5.1 Principe de fonctionnement : .....	17
I.5.2 Pieu isolé sous charge axiale .....	18
I.5.2.a La charge limite et la charge limite de fluage .....	18
I.5.2.b Prédimensionnement d'un pieu isolé .....	20
I.6 Etude d'un Groupe de pieux .....	20
I.7 Conclusion .....	21

## I.1 Introduction

Lors de la réalisation d'un ouvrage en génie civil, l'ingénieur doit respecter les contraintes engendrées par la superstructure et les éléments de fondations. Dans le cas des fondations profondes, le sol réagit aux sollicitations produites par les pieux.

Le comportement du sol est très complexe; de plus, son hétérogénéité et ses modifications dans le temps le compliquent d'avantage. Il est difficile d'appréhender le comportement des pieux et de définir les facteurs influençant leur comportement et l'ampleur de leur contribution dans un phénomène donné.

## I.2 Définition d'un pieu

Le pieu est un élément de fondation profonde élancé qui est fait d'un matériau ou d'une combinaison de matériaux tels que le bois, l'acier et le béton et qui est préfabriqué et mis en place par battage ou fonçage.

Les pieux sont des fondations profondes prenant appui sur le sol, situé à une profondeur pouvant aller de 6 à 20 m, et même plus. Ils sont couramment circulaires. Leurs diamètres peuvent varier de 0.10 à 1.60 m, et même plus.

Les autres sections possibles des pieux sont les carrés et des polygones tels que les pieux préfabriqués, et les barrettes.

Le pieu est composé de trois parties : "la tête" qui reçoit directement les charges par le biais de la semelle de liaison, "la pointe" qui assure la transmission des charges entre la base du pieu et le sol et enfin "le fût" qui se localise entre la tête et la pointe. [1]

Le pieu est caractérisé par sa longueur d'ancrage "h" qui est la longueur d'encastrement du pieu dans les couches de terrains résistantes, et par sa longueur "L". La hauteur d'encastrement "De" (voir la Figure I.1) doit être prise en compte du fait que les caractéristiques mécaniques de la couche d'ancrage sont suffisamment supérieures par rapport à celles du sol traversé par le pieu. [1]

Un élément de fondation est considéré comme profond lorsque sa hauteur d'encastrement  $D_e/D$  est supérieure à 5. [2]

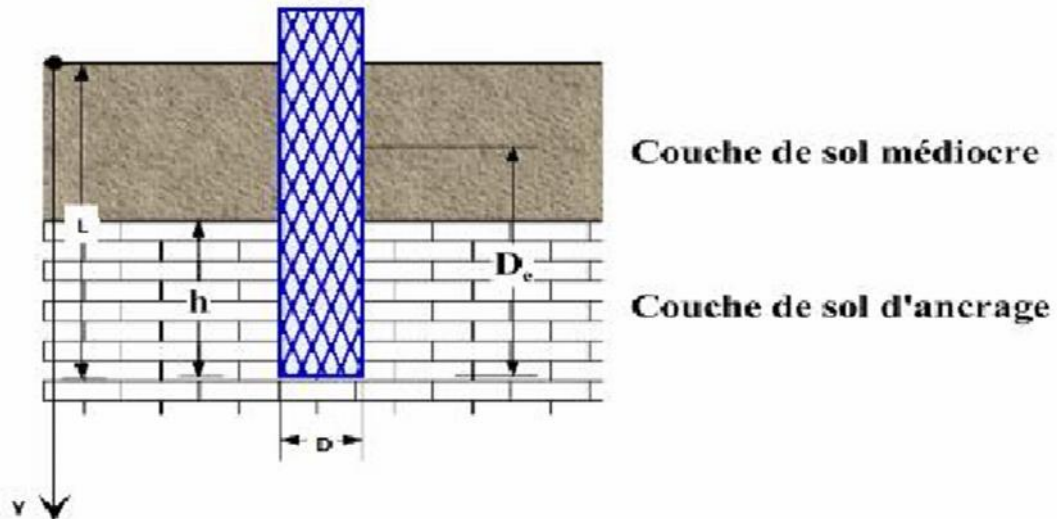


Figure I.1. Définition de la hauteur d'encastrement  $L$  et mécanique  $D_e$  [1]

Le choix du type de pieu dépend :

- De la nature des couches rencontrées dans le terrain,
- De la présence ou non de la nappe phréatique ou de cavité souterraines,
- Des charges à prendre,
- De l'environnement de chantier, et de matériel et de la technicité de l'entreprise.

### I.3 Classification des pieux

#### I.3.1 Classification selon la transmission des charges au sol et le mode de travail du pieu

On distingue:

- **Les pieux colonnes** : ils sont fichés dans une couche résistance et travail en pointe.
- **Les pieux flottants** : ils sont placés dans les sols homogènes et des caractéristiques mécaniques constantes. Ces pieux transmettent essentiellement leurs charges par frottement latérale.
- **Les pieux flottants à la base** : sont des pieux travaillant à la fois en pointe et au frottement latéral dans une ou plusieurs couches et caractéristiques géotechniques convenables [1] Ces différents types de pieux sont représentés sur la figure I.2.

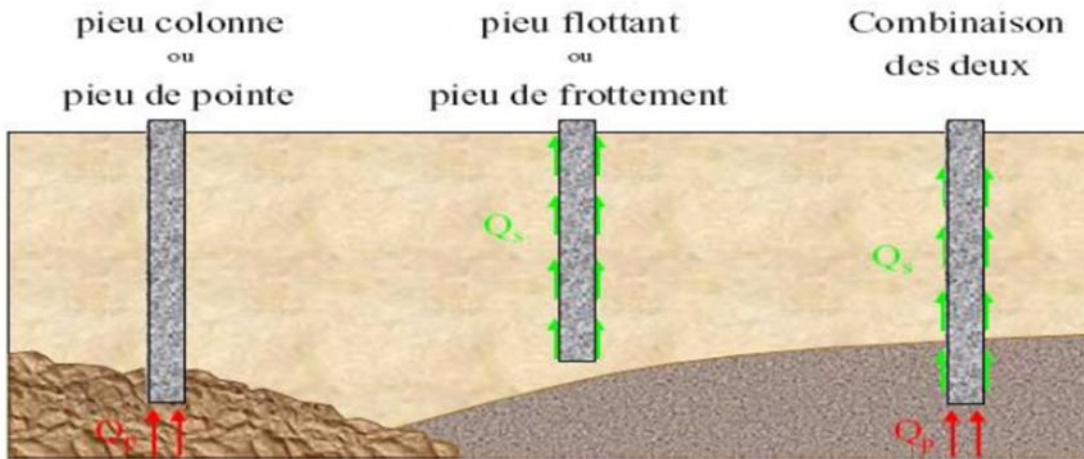


Figure I.2 Classification suivant la transmission des charges au sol et le mode de travail du pieu [3]

### I.3.2 Classification selon leur mode de réalisation

On distingue deux grandes catégories :

- Les pieux mis en œuvre avec refoulement du sol tel que les pieux battus.
- Les pieux mis en œuvre avec excavation du sol tel que les pieux forés.

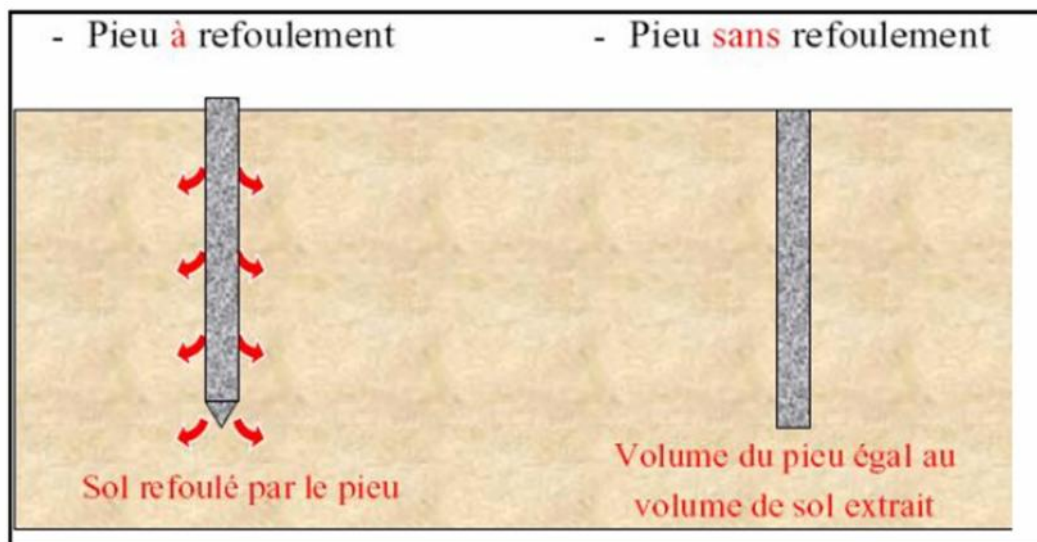


Figure I.3 Les types des pieux selon leur mode de réalisation [3]

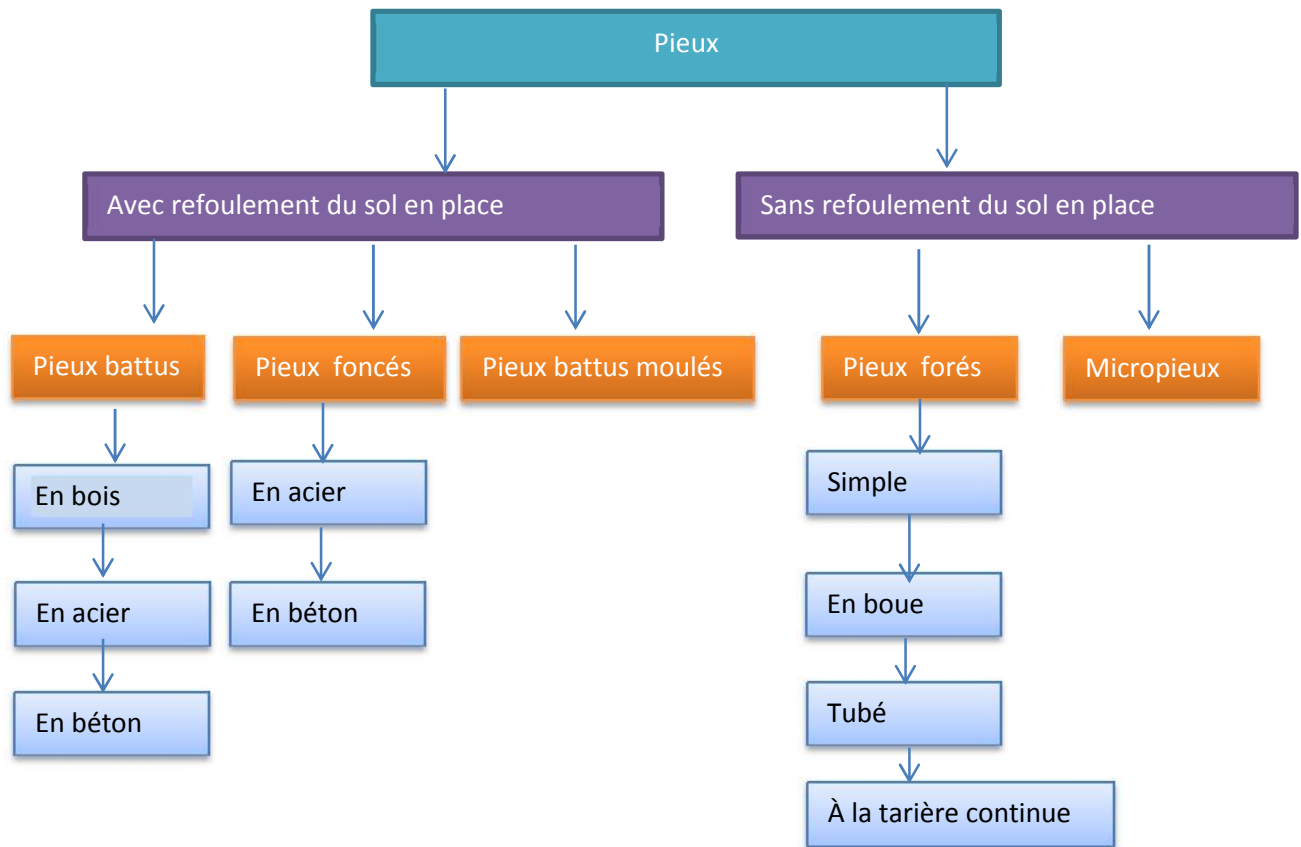


Figure I.4 Classification des pieux [4]

### I.3.2.a Pieux mis en place avec refoulement du sol

Ce sont les pieux battus, les pieux battus moulés et les pieux foncés. En ce qui concerne les pieux battus ; il s'agit d'une manière générale de pieux métalliques et de pieux préfabriqués en béton armé. Pour les seconds, ils sont souvent des pieux battus moulés (Figure I.5)

Les pieux métalliques ont une forme de H ou de tube. Les tubes peuvent être ouverts ou fermés à leur base, ils sont mis en œuvre soit par battage soit par vibration. La mise en œuvre des pieux battus moulés peut être décrite par un battage de tube muni à sa base d'une plaque métallique dans le sol, puis un remplissage du tube de béton lors de son extraction. [5]

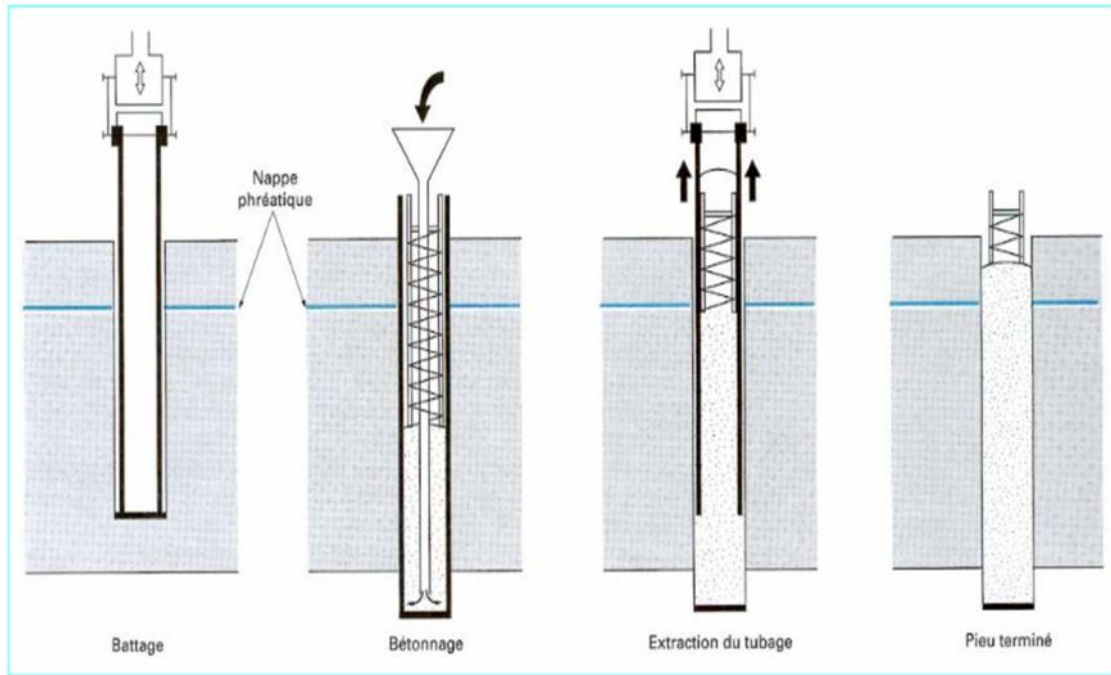


Figure I.5 Schématisation d'un pieu battu moulé [6]

▪ **Avantages et inconvénients :**

En général les pieux refoulant le sol à la mise en place présentent certains avantages qui sont principalement dus à la simplicité et la rapidité de mise en œuvre.

Mais ces types de pieux sont aussi sujets à certains inconvénients tels que l'endommagement de la tête du pieu lors du battage, la déviation, le remaniement du sol, la vibration .....Etc.

**I.3.2.b Pieux mis en place avec excavation du sol**

Leur mise en œuvre requiert un forage préalable, réalisé dans le sol avec un matériel approprié, avec ou sans protection d'un tubage ou de boue assurant la stabilité des parois du forage; ensuite le pieu est bétonné en employant une colonne de bétonnage, selon la technique du tube plongeur qui descend jusqu'à la base du pieu (Figure I.6). [5]

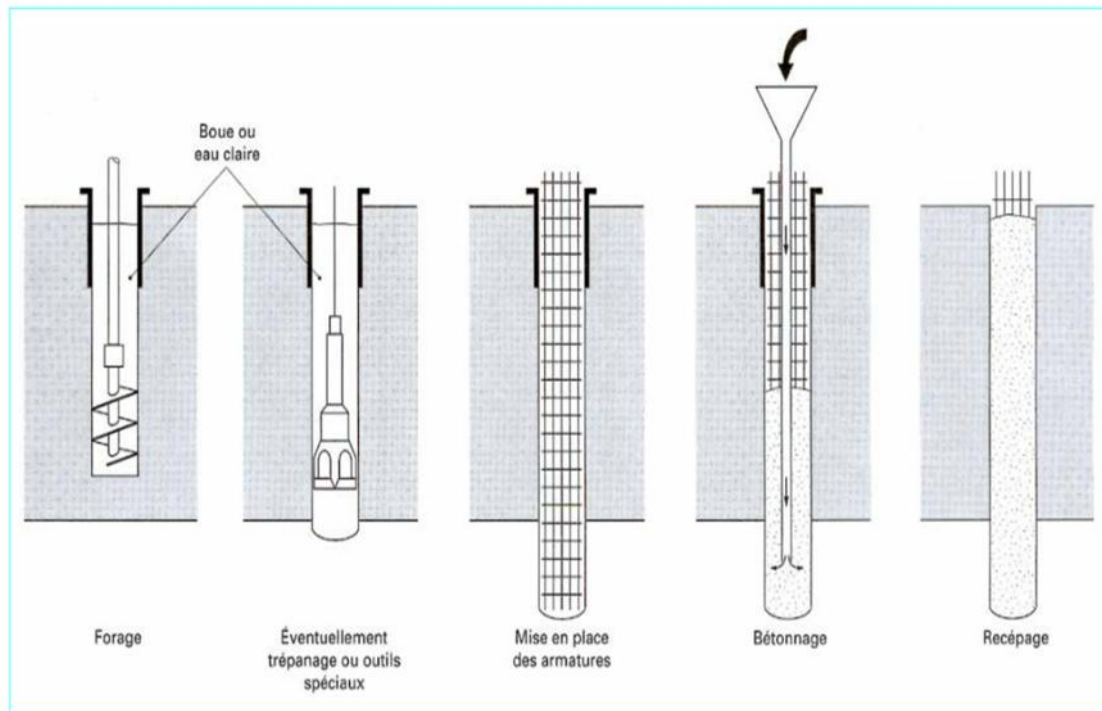


Figure I.6 Schématisation d'un pieu foré tubé (Franck ,1999)

#### ▪ Avantages et inconvénients :

Les avantages des pieux forés sont :

- La reconnaissance sur place des sols par la stratigraphie du terrain, mais aussi au laboratoire grâce à des essais sur des échantillons prélevés sur le terrain.
- La possibilité d'atteindre les grandes profondeurs (30 voire 40m).
- L'absence de risque d'ébranlement du sol ou des constructions avoisinantes.
- La possibilité de reprise en sous-œuvre et de renforcement des fondations.

D'une façon générale, les pieux forés présentent beaucoup d'avantages, mais ils exigent une exécution minutieuse sans laquelle, on risque le délayage du béton, l'éboulement des parois de la fondation, la striction du pieu, ...etc. [7]

#### I.4 Calcul de la capacité portante :

Nous présentons les essais fondamentaux pour la reconnaissance du sol préalable à l'étude des fondations.

### I.4.1 Essai de chargement statique d'un pieu sous compression axiale :

L'essai consiste à mettre le pieu en charge par incréments  $\Delta Q$  égaux à  $0,1Q_{\max}$  jusqu'à  $Q_{\max}$ . Il permet de déterminer la charge limite conventionnelle  $Q_{lc}$  jusqu'à  $Q_{\max}$  et la charge critique de fluage conventionnelle  $Q_{cc}$ . Pendant chaque palier de fluage, maintenu 60 minutes, on enregistre le déplacement de la tête du pieu en maintenant la charge rigoureusement constante. Pour chaque palier  $Q_n$  on calcule la pente  $\alpha_n$  du segment de la courbe de déplacement en fonction du logarithme décimal du temps entre 30 et 60 minutes (Figure I.12). La charge critique de fluage est déterminée par la construction effectuée sur la courbe de  $\alpha_n$  en fonction de la charge au palier  $Q_n$  (Figure I.13). Cette courbe permet de distinguer une première partie pour laquelle le fluage est faible et peut être supporté par la structure portée par la fondation profonde et une seconde partie où le fluage du sol entraînerait des déplacements incompatibles avec le bon fonctionnement de la structure. [1]

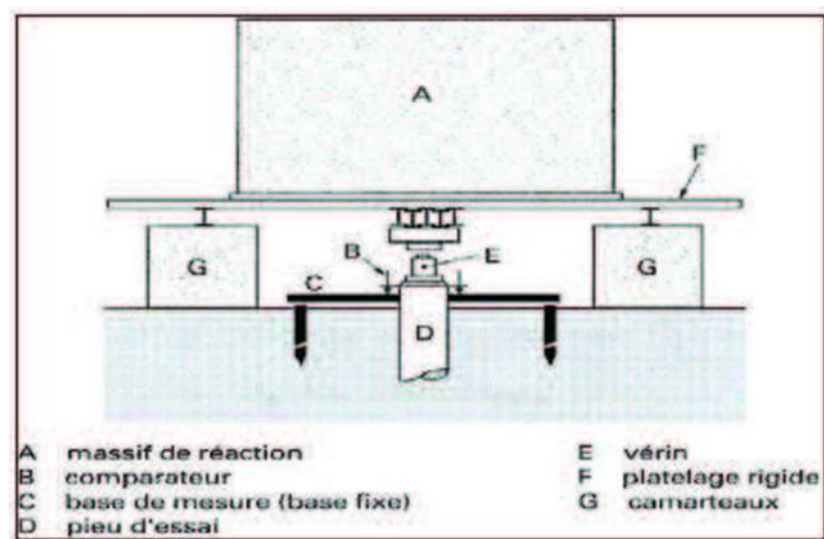


Figure 1.7 Dispositif de chargement et de mesure pour essai de pieu (schéma de principe)

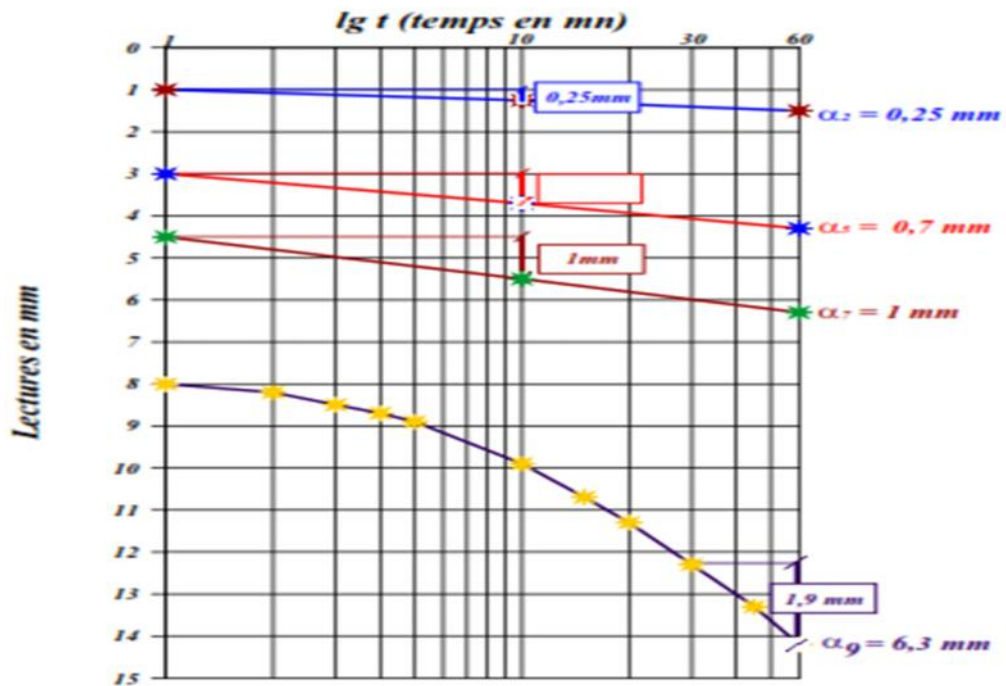


Figure I.8 Droites et courbes de fluage des 2<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> palier

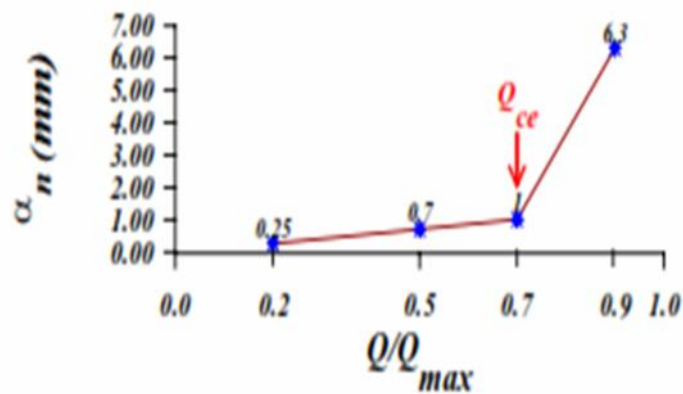


Figure I.19 Détermination de la charge critique de fluage  $Q_{ce}$

Considérons, pour simplifier, un pieu de longueur D, dans un sol homogène mécaniquement, soumis à un chargement vertical de compression axiale. Si on enregistre pendant le chargement du pieu l'effort et le déplacement en tête on obtient la courbe effort-déplacement de la figure I.14.

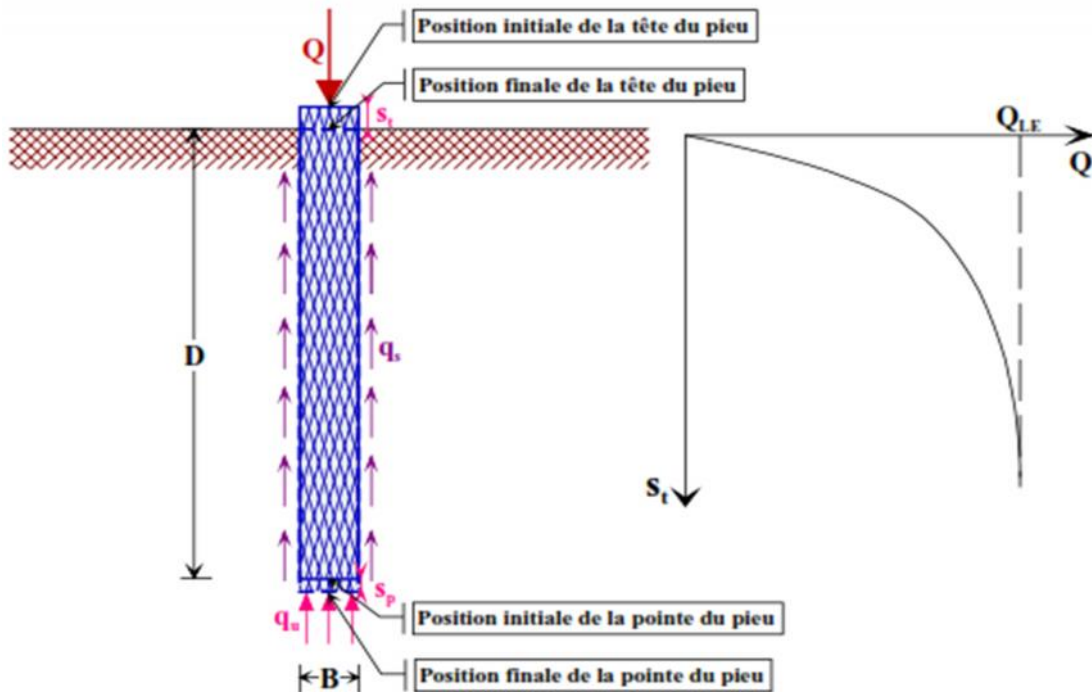


Figure I.10 Essai de chargement de pieu. Courbe effort déplacement en tête

Cette courbe donne la charge limite  $Q_{LE}$  ou  $Q_u$  qui correspond à la rupture du sol pour un grand déplacement. Cette charge limite est équilibrée par deux réactions limites : la résistance de pointe  $q_u$  qui donne la charge limite de pointe  $Q_{pu}=q_u \cdot A$  ( $A$  : section droite de la pointe du pieu) et le frottement latéral  $q_s$  qui s'exerce sur la surface latérale du pieu qui donne la charge limite de frottement latéral  $Q_{su}=q_s \cdot B \cdot L$ .

$$Q_{LE} = Q_{pu} + Q_{su} \quad (I.1)$$

Pour atteindre cette charge limite  $Q_{LE}$ , le pieu s'est déplacé en tête ( $s_t$ ) et en pointe

( $s_p$ ) et ( $s_t > s_p$ )

#### I.4.2 Pressiomètre MENARD :

IL s'agit d'un essai contrainte-déformation mené jusqu'à la rupture. Cet essai mis au point par Ménard, consiste à mesurer l'augmentation de volume d'un cylindre dilatable soumis à une augmentation de pression intérieure, et placé à la profondeur à laquelle on désire tester l'essai. Pour le calcul de portance, le paramètre employé est la pression limite. Comme pour la méthode statique, on détermine séparément le terme de pointe et le frottement latéral.

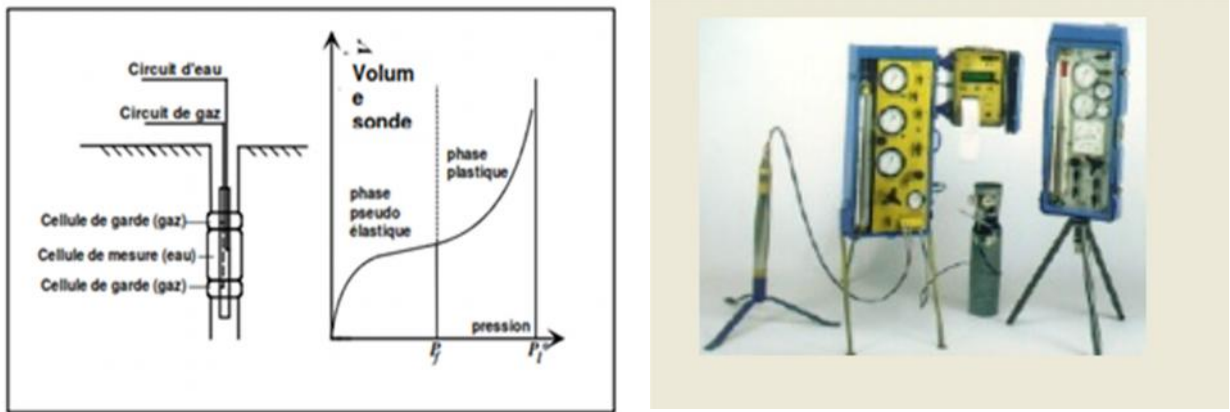


Figure I.11 Schéma de l'essai pressiométrique et courbe d'interprétation

### I.4.2.a Terme de pointe

La formule qui lie la force portante à la rupture sous la pointe  $q_1$  à pression limite  $P_1$  s'écrit :

$$q_1 - q_0 = K \cdot (P_1 - P_0) \tag{I.2}$$

$K$  : Le facteur de portance

$q_0$  : La pression verticale au repos du terrain au niveau de la base de la fondation après construction.

$P_0$  : La pression horizontale du terrain au repos.

Pour le calcul du terme de pointe des pieux, on néglige habituellement  $q_0$ . On considère comme pression limite nette  $(P_1 - P_0) = (P_1)$ .

La contrainte de rupture est donnée par l'expression :

$$q_u = K_p \times P_{le} \tag{I.3}$$

Dans le cas d'un sol hétérogène on introduit la pression limite nette équivalente et le facteur de portance  $K_p$ .

#### A- Calcul de la pression limite nette équivalent :

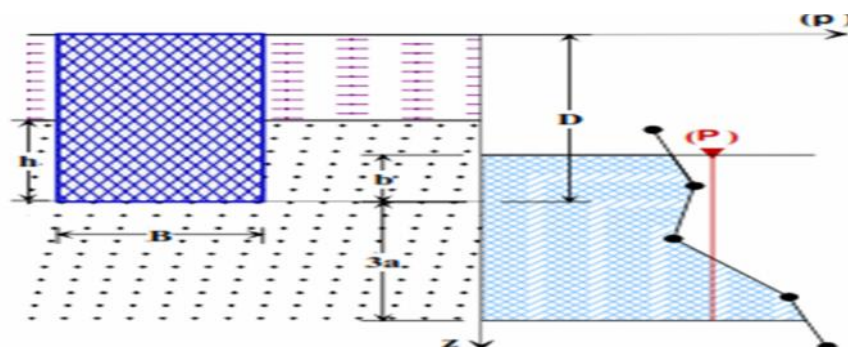


Figure I.12 Schéma de calcul de la pression limite nette équivalente

Dans le cas de sol hétérogène, on introduit la pression limite nette équivalente, elle est calculée par l'expression :

$$P_{le} = \frac{1}{b+3a} \int_{D-b}^{D+3a} P_{le}(z) \cdot dz \quad (I.4)$$

Avec :

$$b = \min(a, h)$$

$a$  = la moitié de la largeur  $B$  de l'élément de fondation si celle-ci est supérieure à 1m et à 0,50m dans le cas contraire.

$h$  = ancrage dans la couche porteuse.

### B- Détermination du facteur de portance $k_p$ :

La valeur de  $k_p$  Le facteur de portance, est fixée par le tableau ci-dessous en fonction de la nature du sol (Tableau I.1) et du mode de mise en œuvre (type de pieu), quelle que soit la géométrie de la section droite de l'élément de fondation (Tableau I.2).

Tableau I.1 Valeurs du coefficient de portance  $k_p$

Nature des terrains		Eléments mis en œuvre sans refoulement du sol	Eléments mis en œuvre avec refoulement du sol
Argiles, Limons	A	1,1	1,4
	B	1,2	1,5
	C	1,3	1,6
Sables, Graves	A	1,0	4,2
	B	1,1	3,7
	C	1,2	3,2
Craies	A	1,1	1,6
	B	1,4	2,2
	C	1,8	2,6
Marnes : marno-calcaires		1,8	2,6

Tableau I.2 classification des sols

Classe de sol		Description	Pressiomètre $P_1$ (MPa)
Argiles, Limons	A	Argile et limons mous	< 0,7
	B	Argiles et limons fermes	1,2 - 2,0
	C	Argiles très fermes à dures	> 2,5
Sables, Graves	A	Lâches	< 0,5
	B	Moyennement compacts	1,0 - 2,0
	C	Compacts	> 2,5
Craies	A	Molles	< 0,7
	B	Altérées	1,0 - 2,5
	C	Compactes	> 3,0
Marnes : marno-calcaires	A	Tendres	1,5 - 4,0
	B	Compacts	< 4,5

### I.4.2.b Détermination du frottement latéral unitaire $q_s$

Les valeurs du frottement latéral unitaire  $q_s$  ont été établies empiriquement à partir d'essais de chargement. La valeur du frottement latéral  $q_s$ , à une profondeur  $z$ , est donnée par les courbes du jeu d'abaques ci-dessous en fonction de la valeur de la pression limite nette ( $z$ ). La courbe à utiliser est fonction de la nature du sol et de l'élément de fondation considéré.

Tableau I.3 Détermination des abaques

	Argiles, limons			Sables, graves			Craies			Marnes	
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B
Foré simple	$Q_1$	$Q_2, Q_2^{(2)}$	$Q_3, Q_3^{(2)}$				$Q_1$	$Q_3$	$Q_6, Q_3^{(2)}$	$Q_3$	$Q_6, Q_3^{(2)}$
Foré boue	$Q_1$	$Q_2, Q_2^{(2)}$		$Q_1$	$Q_2, Q_1^{(2)}$	$Q_3, Q_2^{(2)}$	$Q_1$	$Q_3$	$Q_6, Q_3^{(2)}$	$Q_3$	$Q_6, Q_3^{(2)}$
Foré tubé (tube récupéré)	$Q_1$	$Q_2, Q_2^{(2)}$		$Q_1$	$Q_2, Q_1^{(2)}$	$Q_3, Q_2^{(2)}$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3, Q_4^{(2)}$	$Q_3$	$Q_4$
Foré tubé (tube perdu)	$Q_1$			$Q_1$	$Q_2$		<sup>(4)</sup>			$Q_2$	$Q_3$
Puits <sup>(5)</sup>	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$				$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$
Métal battu fermé	$Q_1$	$Q_2$		$Q_2$	$Q_3$		<sup>(4)</sup>			$Q_3$	$Q_4$
Battu préfabriqué béton	$Q_1$	$Q_2$		$Q_3$			<sup>(4)</sup>			$Q_3$	$Q_4$
Battu moulé	$Q_1$	$Q_2$		$Q_2$	$Q_3$		$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_3$	$Q_4$
Battu enrobé	$Q_1$	$Q_2$		$Q_3$	$Q_4$		<sup>(4)</sup>			$Q_3$	$Q_4$
Injecté basse pression	$Q_1$	$Q_2$		$Q_3$			$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	
Injecté haute pression <sup>(6)</sup>		$Q_4$	$Q_5$	$Q_5$	$Q_6$			$Q_5$	$Q_6$	$Q_6$	

### I.4.3 Le pénétromètre statique :

L'essai de pénétromètre statique consiste enfoncée la pointe dans le sol à vitesse régulière. L'appareil permet la mesure de la résistance de pointe  $q_c$  et du frottement latéral  $f_s$  lors de l'enfoncement à vitesse lente et constante d'une pointe conique. Les résultats permettent de donner une indication sur la nature des sols traversés. La valeur de la résistance de pointe est utilisée pour le dimensionnement des fondation.

#### I.4.3.a Terme de pointe :

On constate expérimentalement que le terme de pointe d'une fondation profonde ne correspond pas directement à la résistance de pointe du pénétromètre.

La contrainte de pointe est donnée par la formule :

$$q_p = K_c \cdot q_{ce} \tag{I.5}$$

$q_{ce}$  : résistance de pointe équivalente au pénétromètre statique. Elle est calculée par l'expression :

$$q_{ce} = \frac{1}{b+3a} \int_{D-b}^{D+3a} q_{cc}(z) \cdot dz \quad (I.6)$$

Avec :  $b = \min(a, h)$

A est égale à moitié de la largeur B de l'élément de fondation si celle-ci est supérieure à 1m et à 0.5m dans le cas contraire.

H : ancrage dans la couche porteuse.

$q_{cc}$  : Pression limite corrigée à la profondeur z, elle est donnée :

- ✓ En calculant la valeur moyenne ( $q_{cm}$ ) de la résistance de pointe lissée sur la hauteur ( $b+3a$ ) :

$$q_{cm} = \frac{1}{3a+b} \int_{D-b}^{D+3a} q_c(z) \cdot dz \quad (I.7)$$

- ✓ En crêtant, s'il y a lieu, le diagramme  $q_c(z)$  à la hauteur de  $1.3 \cdot q_{cm}$

D : hauteur réelle d'encastrement de pieu

Les valeurs du facteur de portance  $K_c$  sont données dans le tableau I.4.

**Tableau I.4 Les valeurs de facture de portance  $K_c$  (d'après fascicule 62, titre V)**

Nature des terrains		Éléments mis en œuvre sans refoulement du sol	Éléments mis en œuvre avec refoulement du sol
<b>Argiles, Limons</b>	A	0,40	0,55
	B		
	C		
<b>Sables, Graves</b>	A	0,15	0,50
	B		
	C		
<b>Craies</b>	A	0,20	0,30
	B	0,30	0,45

#### I.4.3.b Terme de frottement latéral

L'effort total limite mobilisable par frottement latéral sur toute la hauteur  $h$  concernée du fut du pieu (excluant les tronçons avec double chemisage et ceux sur lesquels s'exerce du frottement négatif) est calculé par l'expression suivante :

$$Q_s = P \int_0^D q_s(z) dz \quad (I.8)$$

Où

P : est le périmètre de pieu.

Les valeurs des charges admissibles sont données dans le tableau I.5 de la même façon que pour l'essai pressiométrique.

Les valeurs de  $q_s$  frottement latéral unitaire limite à la cote (z) est donnée par l'expression : [1]

$$q_s(z) = \min \left[ \frac{q_c(z)}{\beta}; q_{smax} \right] \quad (I.9)$$

Le frottement latéral unitaire maximal  $q_{max}$  et le coefficient  $\beta$  sont en fonction de la nature du sol au niveau considéré et du type de pieu (Tableau I.5).

Tableau I.5 Choix  $q_{s max}$  et le coefficient

Tableau 6 - Choix du coefficient $\beta$ et de $q_{s max}$ [6]										
Type de pieu		Nature des terrains								
		Argiles. Limons			Sables. Graves			Craies		
		A	B	C	A	B	C	A	B	
Foré	$\beta$									
	$q_{s max}$ (kPa)	15	40	75 (1) 80 (1)	40	80 (1)	200	200	200 120	125 40
Foré tubé (tube récupéré)	$\beta$									
	$q_{s max}$ (kPa)	15	100 40	100 (2) 60 (2)	40	100 (2) 80 (2)	250	250 40	300 120	125 40
Métal battu fermé	$\beta$			120		150	300	300	300	(3)
	$q_{s max}$ (kPa)	15		40		80			120	
Battu préfabriqué béton	$\beta$			75		80	150	150	150	(3)
	$q_{s max}$ (kPa)	15		80					120	

(1) Réalésage et rainurage en fin de forage.  
 (2) Forage à sec, tube non louvoyé.  
 (3) Dans le cas des craies, le frottement latéral peut être très faible pour certains types de pieux. Il convient d'effectuer une étude spécifique dans chaque cas.

#### I.4.4 Pénétromètre dynamique :

L'essai consiste à enfoncer dans le sol un train de tige.

##### I.4.4.a Méthode des Hollandais :

La pratique a montré que le ratio P/M (poids du pieu /poids du mouton) a un rôle très important dans le battage des pieux. En effet un mouton avec poids très petit que celui du pieu ( $M \ll P$ ) ne provoque aucun déplacement et crée seulement des déformations élastiques, d'où l'amélioration de l'équation de Sanders en multipliant le deuxième terme par  $M / (M+P)$ . Cette méthode est utilisée de préférence pour des refus moyens supérieur à 5 millimètres, et la contrainte limite  $Q_u$  est donnée par l'expression : [7]

$$Q_u = \frac{M^2.H}{e(M+P)} \quad (\text{I.10})$$

P : masse frappée (pieu + casque + accessoires).

H : hauteur de chute du mouton.

e : enfoncement permanent ou refus moyen sous une volée de 10 coups.

Pour le calcul de la capacité portante admissible, un coefficient de sécurité de 6 est recommandé.

#### I.4.4.b Méthode de Crandall :

Cette méthode est utilisée pour des refus inférieurs à 5 millimètres. La contrainte limite  $Q_u$  s'écrit :

$$Q_u = \frac{M^2.H}{\left(e + \frac{e_1}{2}\right)(M+P)} \quad (\text{I.11})$$

$e_1$  : étant le refus élastique du pieu.

Le refus est mesuré sur un enregistrement graphique du mouvement de la tête du pieu. Cette formule n'est autre que celle des hollandais pour laquelle le refus élastique du pieu est pris en compte. La capacité portante admissible est calculée pour un coefficient de sécurité égal à 4. [7]

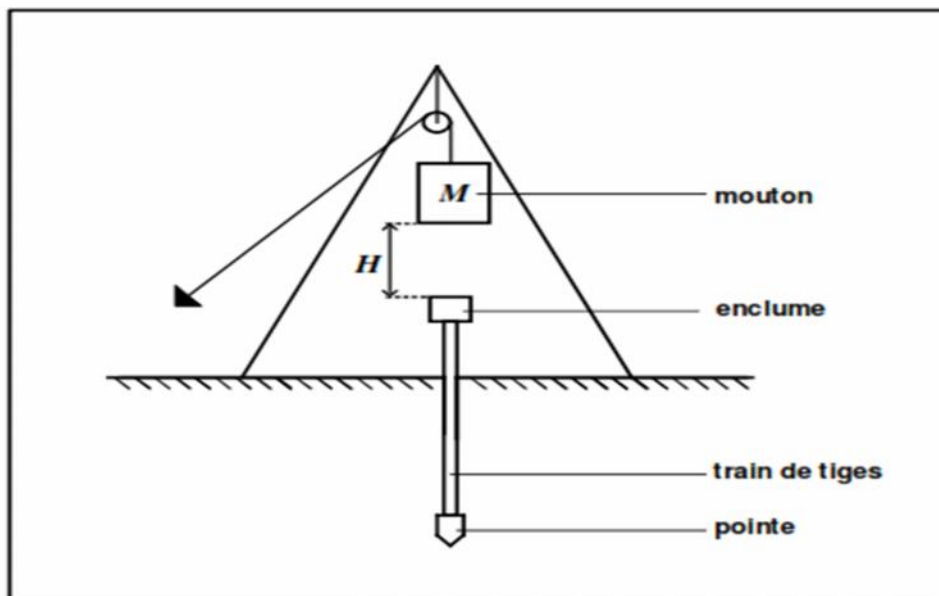


Figure I.13 Schéma du pénétromètre dynamique [8]

## I.5 Etude d'un pieu isolé

### I.5.1 Principe de fonctionnement

Le rôle principal du pieu est de transmettre les charges vers les couches du sol ayant de bonnes caractéristiques physiques et mécaniques. La transmission des charges se fait par :

- L'appui de sa base en contact avec le sol résistant (effort de pointe noté  $Q_p$ ).
- Le frottement latéral entre le sol et le pieu (effort de frottement latéral noté  $Q_s$ ).

On note que l'effort de pointe est conditionné par :

- La section de la base du pieu.
- La résistance du substratum rocheux.

Et pour l'effort de frottement, il est conditionné de son côté par :

- La surface de contact pieu-sol.
- Le coefficient de frottement pieu-sol.

On définit aussi que le frottement latéral n'est mobilisable qu'en cas de déplacement relatif entre le pieu et le sol avoisinant. Et si le pieu a tendance à s'enfoncer dans un sol stable, le frottement sol-pieu crée un effort vertical ascendant et le frottement est alors dit "**frottement positif** «  $f_p$  »". Dans l'autre cas, c'est-à-dire que lorsque le pieu reste figé et le sol a tendance à tasser alors le frottement est appelé "**frottement négatif** «  $f_n$  »". Ceci a pour effet de surcharger le pieu et dans ce cas de figure le pieu est chemisé par un tubage pour diminuer l'effet du frottement négatif (Figure I.17 et I.18). [5]

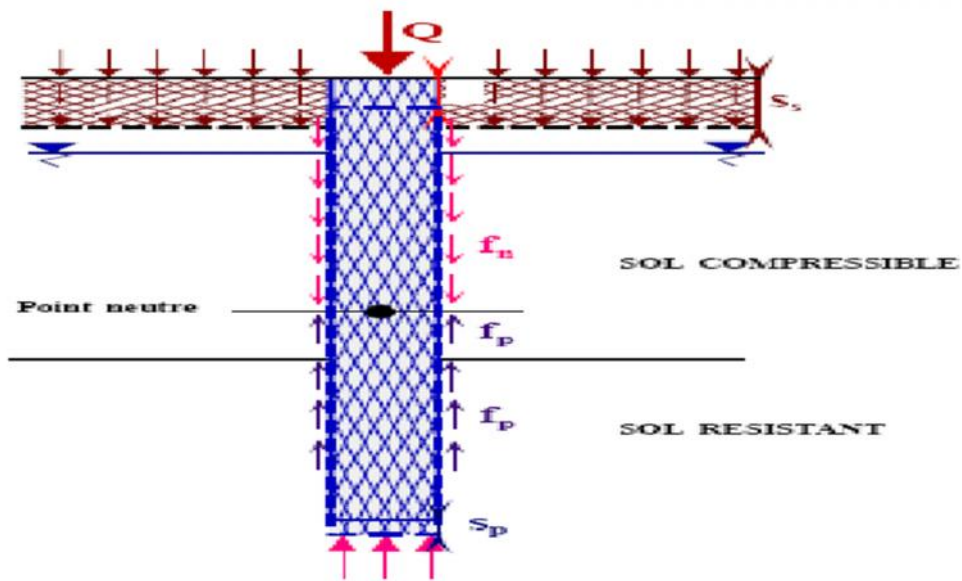


Figure I.14 Mécanisme de frottement latéral positif et négatif

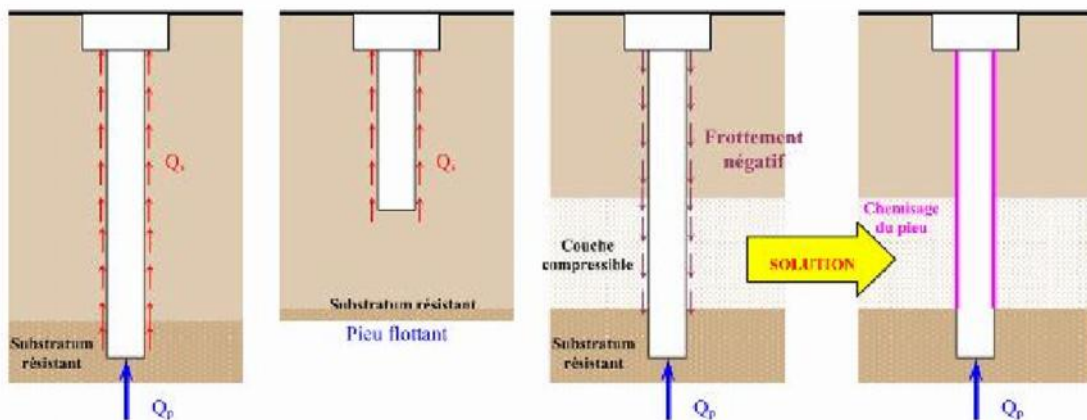


Figure I.15 Définition du pieu isolé selon son mode de fonctionnement [9]

Le frottement négatif se produit généralement dans des sols fins saturés qui se consolident avec le temps. Il augmente donc avec consolidation du sol et devient maximal à long terme (généralement plusieurs années), il dépend :

- De la compressibilité du sol ;
- Des surcharges de longue durée appliquées sur le terre-plein ;
- De l'interface entre le sol et le pieu ;

On utilise un tubage perdu appelé chemise pour réduire l'effet du frottement négatif, et éliminer les problèmes d'eau ou de vides.

### I.5.2 Pieu isolé sous charge axiale :

On développe ici principalement des méthodes de détermination de la capacité portante des pieux basés sur les résultats d'un essai statique de chargement ou sur les résultats d'essais pressiométriques et pénétrométriques.

#### I.5.2.a La charge limite et la charge limite de fluage :

##### ▪ Charge limite :

Considérons un pieu dont la base est située à la profondeur  $D$  dans le sol homogène (Figure I.19). Ce pieu, dont on néglige le poids, est chargé axialement en tête par une charge  $Q$ .

- La résistance unitaire du sol sous la pointe  $q_p$ , conduisant à la charge limite de pointe est : [1]

$$Q_p = q_p A_p \quad (\text{I.12})$$

$A_p$  : la section droite de la pointe.

- La résistance  $q_s$  due au frottement de sol à la surface latérale du pieu : si  $q_s$  est le frottement latéral unitaire limite, la charge limite par le frottement latéral est :

$$Q_s = q_s A_s \quad (\text{I.13})$$

$A_s$  : la surface latérale du pieu.

- Charge limite  $Q_L$  es donnée par la relation suivante :

$$Q_L = Q_p + Q_s \quad (\text{I.14})$$

##### ▪ Charge de fluage :

La courbe représentant la charge appliquée au pieu en fonction de l'enfoncement présente une partie sensiblement linéaire se limitant à une charge  $Q_c$  appelée de fluage (Figure I.19)

Pour les charges supérieures à  $Q_c$  l'enfoncement du pieu ne se stabilise plus dans le temps, à charge constante.

Suivant le mode de mise en place du pieu dans le sol. On peut retenir. [3]

- pour les pieux refoulant le sol :

$$Q_c = \frac{Q_p}{1.5} + \frac{Q_s}{1.5} = \frac{Q_l}{1.5} \quad (\text{I.15})$$

- Pour les pieux ne refoulent pas le sol :

$$Q_c = \frac{Q_p}{2} + \frac{Q_s}{1.5} \quad (\text{I.16})$$

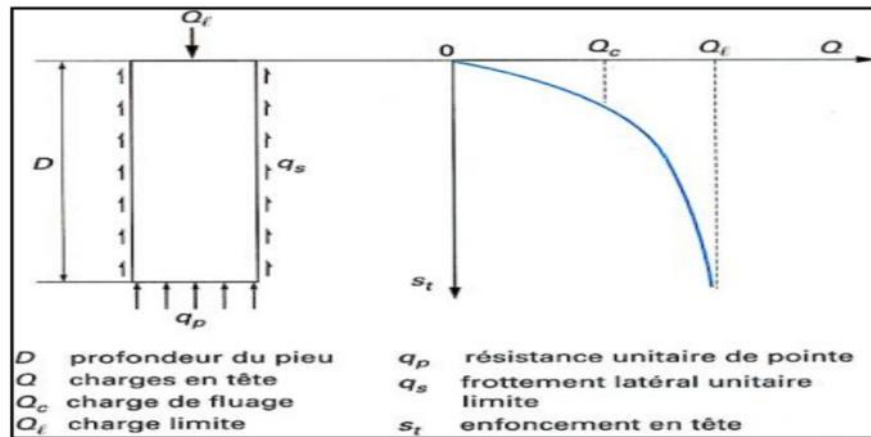


Figure I.16 La courbe de chargement axiale d'un pieu

### I.5.2.b Prédimensionnement d'un pieu isolé

Le pré dimensionnement d'un pieu isolé et le suivant :

- On détermine la section de pieu par le rapport :  $\frac{Q}{\sigma_0}$ , avec  $\sigma_0$  : la contrainte maximale et  $Q$  : la charge appliquée sur le pieu.

Compte tenu de la coupe de sol, on peut choisir l'ancrage de pieu. Sur cette base :

- On calcul ainsi l'effort mobilisable en pointe  $Q_p$ .
- Et en calcul le frottement latéral  $Q_f$ .

Connaissant  $Q_p$  et  $Q_f$ , on détermine ainsi la charge admissible

$$Q = \frac{Q_f}{F_f} + \frac{Q_p}{F_p} \quad (\text{I.17})$$

Avec  $F_f$  et  $F_p$  les coefficients de sécurité correspondants.

## I.6 Etude d'un Groupe de pieux

Lorsque les pieux sont disposés en Groupe plus au moins espacés ; la vérification de la résistance d'un pieu isolé n'est pas suffisante, car il se peut que la charge limite d'un Groupe de pieux  $Q_{gu}$  soit inférieure à la somme des charges limites de chaque pieu  $Q$ .

Le coefficient d'efficacité du Groupe peut être alors défini comme suit : [5]

$$C_e = Q_{gu} / Q \quad (\text{I.18})$$

Ceci est due essentiellement à la diffusion des contraintes en profondeur ; qui est largement supérieure pour le cas du Groupe de pieux par rapport au cas d'un pieu isolé (Figure I.20). Ce phénomène est appelé « **Effet radier** ».



Figure I.17 Représentation de la répartition des contraintes pour le cas d'un pieu isolé et le cas du Groupe de pieux [9]

## I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, est présenté les différents types de pieux, les domaines de leurs utilisations et leurs modes d'exécutions.

Le problème de détermination de la capacité portante d'une fondation profonde constitue une des questions les plus anciennes et fondamentales du génie civil. C'est exactement la question dont la réponse permet le dimensionnement rationnel d'une fondation et atteint le but principal de sa conception qui est le transfert, en sécurité, des charges statiques de la superstructure au sol de fondation.

---

# Modélisation du comportement de l'interface

---

# II

II.1 Introduction : .....	23
II.2 Définition de l'interface :.....	23
II.3 Caractérisation de l'interface : .....	23
II.4 Comportement du matériau de la structure : .....	25
II.5 Comportement de l'interface : .....	25
II.5.1 Modèles élastoplastiques bidimensionnels : .....	25
II.5.2 Modèles élastoplastiques tridimensionnels : .....	26
II.6 Modélisation numérique du contact par la méthode des éléments finis : .....	27
II.6.1 Élément de l'interface : .....	27
II.6.2 Le contact sol – structure : .....	29
II.6.3 Modélisation des interfaces : .....	31
II.6.3.1 Approche de type contact : .....	31
II.6.3.2 Approche de type couche mince : .....	34
II.8 Conclusion : .....	35

## II.1 Introduction

Le comportement des fondations profondes est essentiellement un problème d'interaction sol-structure, l'interface sol-pieu joue un rôle majeur dans la définition des conditions de stabilité d'un ouvrage en fondations profondes. Une attention particulière est consacrée, dans ce chapitre, à la modélisation de l'interaction des pieux avec le sol de fondation et à la définition d'éléments capable de reproduire le comportement d'interface.

## II.2 Définition de l'interface

L'interface sol-pieu peut être définie comme étant une fine zone de sol qui se forme entre la surface de la structure et le volume de sol l'entourant. Ainsi, la couche d'interface permet le transfert du chargement de la structure vers le sol. Elle est donc le lieu de transmission des contraintes et des déformations.

Plytas (1985) appelle interface, la fine zone de sol siège, de grands changements de structure, et de rupture de grains dus au cisaillement localisé intervenant au contact d'une inclusion dans le sol, sollicitée axialement.

Hassan (1995) définit l'interface comme une frontière commune à deux systèmes différents, à travers laquelle des échanges ont lieu. [10]

## II.3 Caractérisation de l'interface

Pour caractériser la couche d'interface, des essais de laboratoire doivent être effectués tel que les essais de cisaillement direct qui sont présentés comme des dispositifs simples, si l'on impose au sol de glisser par rapport à l'interface. Ils permettront de déterminer les rigidités normales  $K_n$ , et tangentielle  $K_t$ .

L'interface est principalement caractérisée par les trois éléments suivants :

### a- Le coefficient de frottement

Nous distinguerons le coefficient de frottement apparent du coefficient de frottement réel. [3]

Le coefficient de frottement apparent  $\mu^*$  est défini par :

$$\mu^* = \frac{\tau_{max}}{\sigma_0} \quad (II.1)$$

Tandis que le coefficient de frottement réel  $\mu$  est défini par :

$$\mu = \frac{\tau_{max}}{\sigma_0 + \Delta\sigma(\tau_{max})} \quad (\text{II.2})$$

Où  $\Delta\sigma(\tau_{max})$  est la contrainte de cisaillement ou de frottement latéral unitaire maximal et  $\sigma_0$  la contrainte normal initial ;

### **b-L 'angle de frottement sol-pieu**

L'angle de frottement sol-pieu est influencé par :

- La rugosité du pieu.
- L'angle de frottement interne du sol  $\varphi'$ .
- Le tassement relatif entre le sol et le pieu.
- L'angle de frottement  $\delta'$  est déterminé à partir du coefficient de frottement réel sol-pieu  $\mu$  par la relation suivante :  $\delta' = \tan^{-1}(\mu)$

L'angle de frottement varie entre 0 et  $\varphi'$ . Mais, il est souvent pris égal à  $\frac{2}{3}\varphi'$  ou  $\varphi'$  pour l'interface sol-béton. [3]

### **c- L'épaisseur de l'interface :**

L'épaisseur de la couche de l'interface influe considérablement sur le comportement de l'élément, Cette épaisseur de la couche d'interface, qui se forme dans un milieu granulaire (le sol) avec un élément de structure (le pieu), dépend essentiellement des dimensions des grains de sol, de la densité du matériau, de la rugosité de l'interface et des conditions aux limites . [3]

Il convient donc de définir un terme utilisant l'épaisseur de la couche de l'interface , et qui revêt une importance particulière dans la résolution par éléments finis des problèmes de contact sol-structure. Le rapport de forme est par définition le rapport de plus grande dimension de l'élément (L) sur la plus petite dimension (l). La définition du rapport de forme est un aspect essentiel de la méthode de l'interaction sol-structure à l'aide de la méthode des éléments finis.

Pour les éléments standards, il souvent prit entre 3 et 10.

Cependant, pour les éléments type « couche mince », les valeurs du rapport de forme composées entre 10 et 100 permettent d'avoir une estimation correcte des déplacements relatifs (De Gennaro V, Frank R. 2005).

## II.4 Comportement du matériau de la structure

La structure est constituée de matériaux (béton, acier, bois,.....etc.) dont la rigidité est beaucoup plus importante que celle de sol environnant. Le comportement de ces matériaux peut être décrit par des modèles simples, élastique ou élastoplastique.

## II.5 Comportement de l'interface

Pour l'interface, plusieurs types de modèle ont été proposés. Mais, nous retiendrons essentiellement deux grandes familles de modèle : les modèles élastoplastiques bidimensionnels et les modèles élastoplastiques tridimensionnels.

### II.5.1 Modèles élastoplastiques bidimensionnels

L'interface sépare en général la surface du pieu et la surface du sol. Ces surfaces sont représentées généralement par des plans parallèles. La couche d'interface d'épaisseur  $t$  est identifiable expérimentalement par observation directe, la définition de son épaisseur est très variable en fonction des caractéristiques du sol et de l'inclusion, ce qui modifie de manière importante les caractéristiques du comportement observé.

De ce fait, les chercheurs évitent de formuler les lois d'interfaces en fonction des déformations car elles dépendent de l'épaisseur de l'interface, alors que les grandeurs cinématiques mesurables sont le déplacement normal relatif,  $u_n$  ou tangentiel relatif,  $u_t$  de l'interface. La modélisation bidimensionnelle impose donc l'utilisation des quatre variables suivantes:  $\tau, \sigma_n, u_t, u_n$ . [11]

En général, les modèles utilisés prévoient une partie élastique caractérisée par une relation incrémentale entre les déplacements relatifs et les contraintes de la forme :

$$\begin{pmatrix} d\sigma_n \\ d\tau \end{pmatrix} = [k] \begin{pmatrix} du_n^e \\ du_t^e \end{pmatrix} \quad \text{avec } [K] = \begin{bmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_t \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$K_n$  et  $K_t$  sont respectivement la rigidité normale et tangentielle qui peut être déterminée à partir d'essais en laboratoire (Karabataki et Hatrigos 2001) suivant les équations :

$$K_n = \frac{d\sigma_n}{du_n} \quad (\text{II.4})$$

$$K_t = \frac{d\tau}{du_t} \quad (\text{II.5})$$

## II.5.2 Modèles élastoplastiques tridimensionnels

Le modèle dit "tridimension" d'interface est celui développé par Fakharian et Evgin (2000) en s'appuyant sur Desai et Fishman (1991). Alors que la modélisation bidimensionnelle impose utilisation des variable  $\tau, \sigma_n, u_t, u_n$ , le modèle tridimensionnel de Fakharian et Evgin considère les variable  $\tau_x, \tau_y, \sigma_n, u_x, u_y, u_n$  (Figure II.1)

Le comportement élastique est décrit par la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} d\sigma_n \\ d\tau_x \\ d\tau_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_{tx} & 0 \\ 0 & 0 & K_{ty} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} dv^e \\ du_x^e \\ du_y^e \end{pmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$v$  : Déplacement vertical

$K_n, K_{tx}, K_{ty}$ , sont respectivement la rigidité élastique normale dans la direction  $z$ , la rigidité élastique de cisaillement dans la direction  $x$  et la rigidité élastique de cisaillement dans la direction  $y$ , les auteurs admettent par hypothèse que les comportements élastiques normal et tangentiel ne sont pas couplés que  $K_{tx} = K_{ty}$ . [11]

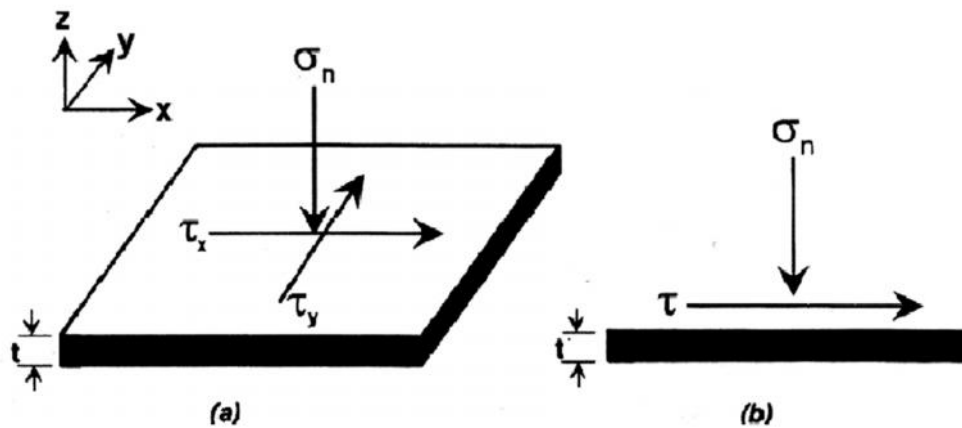


Figure II.1 Contraintes agissant sur l'interface : (a) cas tridimensionnel, (b) cas bidimensionnel  
(Fakharian et Evgin. 2000)

## II.6 Modélisation numérique du contact par la méthode des éléments finis

### II.6.1 Élément de l'interface

La première étape de la modélisation de l'interface consiste en la représentation de l'élément d'interface sous forme d'éléments spéciaux par éléments finis. L'utilisation de ces éléments nous permet de pouvoir appliquer à l'élément d'interface une loi de compatibilité des déplacements relatifs entre le sol et le pieu. Parmi ces éléments, nous pouvons citer : les éléments sans épaisseur, les éléments de type couche mince.

#### a- Approche de type contact (les éléments sans épaisseur)

Dans ce cas, l'interface n'a pas d'épaisseur, elle est assimilée à un matériau fictif auquel on associe une loi de comportement reliant les contraintes et les déplacements relatifs à l'interaction. [3]

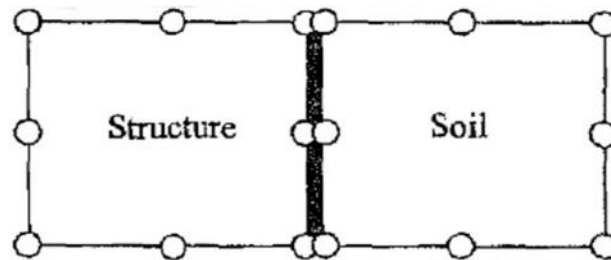


Figure II.2 Élément de l'interface sans épaisseur (Discrétisation numérique du problème de contact sol-structure [12])

#### Approche de type couche mince

Le concept de couche mince a été abordé par Desai et al. (1984), qui ont considéré que la réponse de l'interface devrait être traitée par un modèle constitutif approprié. La formulation de l'élément de type couche mince est basé sur l'hypothèse que l'interface peut être remplacée par un élément massif équivalent, avec une petite épaisseur, et une loi constitutive adéquate. Dans cette approche, l'interface est constituée d'une zone de faible épaisseur. Ainsi, on adopte des lois de comportement rhéologique propre à ces zones.

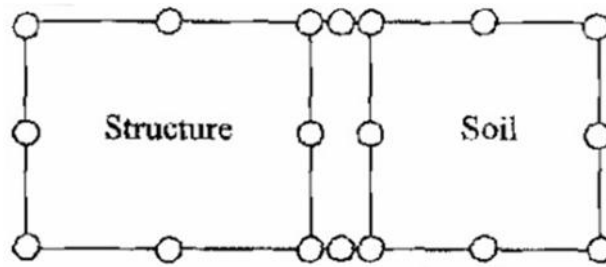


Figure II.3 Elément d'interface couche mince (Discrétisation numérique du problème de contact sol-structure [12])

Plusieurs exemples et situations d'interfaces tel que (béton-acier), (Substratum rocheux –sol), (faille entre deux blocs rocheux), palplanche ancrage, pieu, interface sol-acier, sont représentés sur la figure II.4.

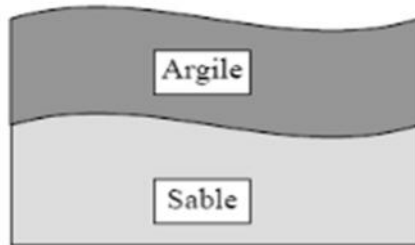


Fig. a. Deux types de sol différents

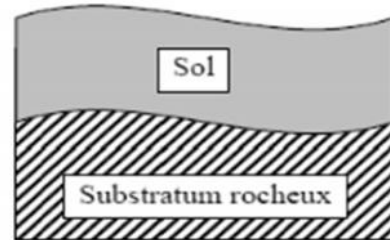
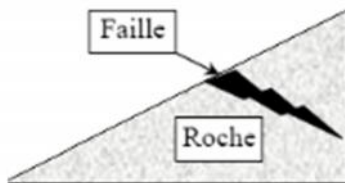
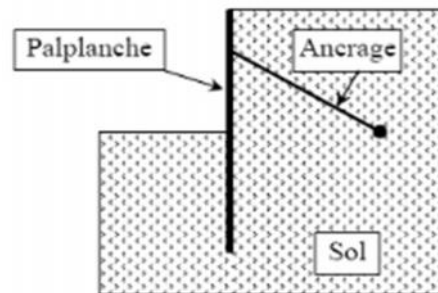


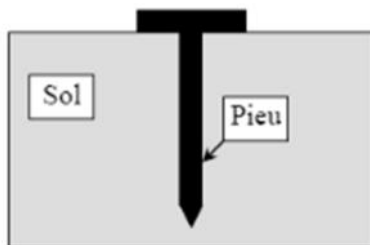
Fig. b. sol-substratum rocheux



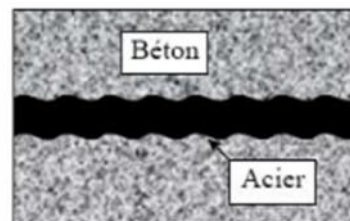
C. Faille entre deux blocs rocheux



D. Palplanche-ancrage



e. Pieu



f. Interaction béton-acier

Figure II.4 Exemples des situations d'interface [3]

## II.6.2 Le contact sol – structure

Le contact sol-structure peut être modélisé à l'aide du modèle de contact entre deux corps. Afin de proposer une modélisation du contact, nous allons effectuer une discrétisation de la surface de contact. En  $M$ , on considère les deux points 1 et 2 appartenant respectivement à A et B, dans le repère local  $(\vec{i}, \vec{j})$  (Figure II.5), les déplacements et les contraintes de liaison sont donnés par :

$$\vec{u}_1 = \begin{Bmatrix} U_t^1 \\ U_n^1 \end{Bmatrix}, \quad \vec{u}_2 = \begin{Bmatrix} U_t^2 \\ U_n^2 \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{\sigma} = \begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma_n \end{Bmatrix}$$

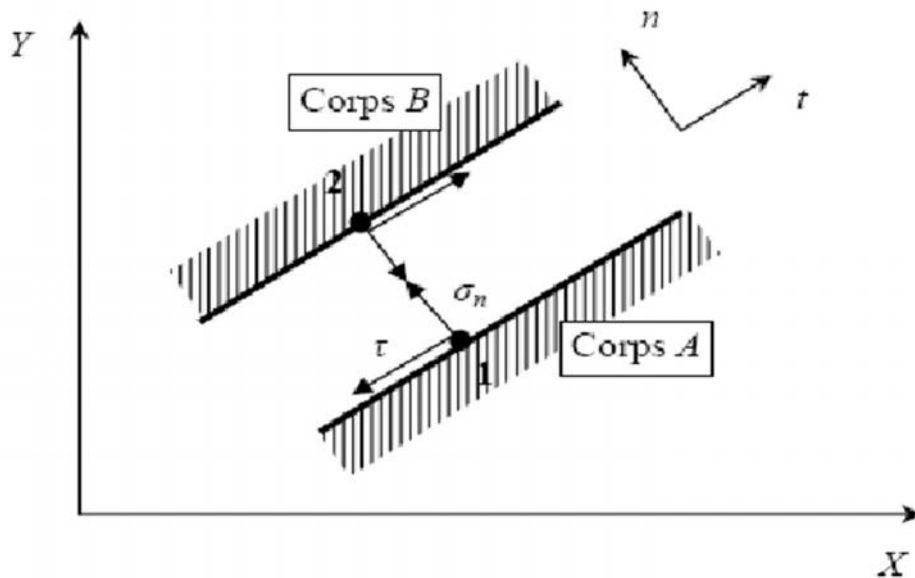


Figure II.5 Modélisation du contact

La modélisation du contact se caractérise par la vérification de certaines conditions sur la contrainte normale  $\sigma_n$ , et la contrainte tangentielle  $\tau$ , s'exerçant sur l'élément de contact. De cet état de contrainte  $(\sigma_n, \tau)$  résulte un état de déplacements relatifs tangentiels et normaux  $(\Delta u_t, \Delta u_n)$  caractérisant la cinématique de l'élément de l'interface. [3]

$$\Delta u = \begin{cases} u_t = u_t^2 - u_t^1 \\ u_n = u_n^2 - u_n^1 \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

### a- Mode adhésion

Dans ce mode (Figure II.6) il n'y a pas de déplacement relatif entre les nœuds 1 et 2, On a alors les équations suivantes :  $\begin{cases} u_t = 0 \\ u_n = 0 \end{cases}$

Les contraintes sont alors régies par les conditions :  $\begin{cases} \sigma_n > 0 \\ \tau < 0 \end{cases}$

**b- Mode de glissement**

Quand la contrainte normale de compression et la contrainte tangentielle atteint le seuil  $\bar{\tau}$ , il y a un glissement relatif entre les nœuds 1 et 2 (figure II.6) :

Les contraintes et les déplacements sont alors régis par les conditions suivantes ;

$$\begin{cases} u_n = 0 \\ u_t \neq 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \sigma_n > 0 \\ \tau = \bar{\tau} \end{cases}$$

**c- Mode décollement**

Dans le cas où la composante  $\sigma_n$  devient négative, le décollement et la séparation des corps A et B se produiront (Figure II.6) :

Les contraintes et les déplacements sont alors régis par les conditions suivantes ;

$$u_n > 0 \quad ; \quad \sigma_n < 0 \quad \tau = 0$$

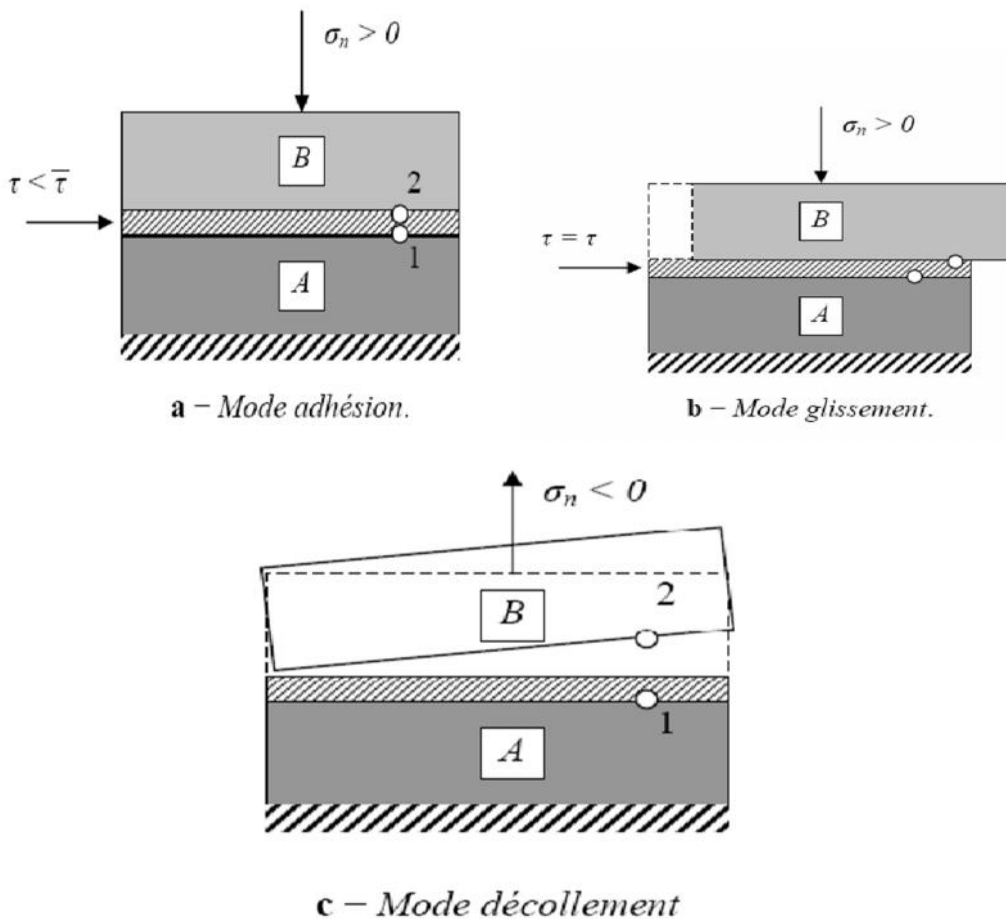


Figure II.6 Mode de déformation de l'interface [3]

### II.6.3 Modélisation des interfaces

Le traitement analytique des problèmes d'interface sol-structure, pose beaucoup de difficultés théoriques et mathématiques.

Des méthodes numériques ont été développées pour apporter des solutions approchées à ce type de problème, tel que les méthodes des éléments finis.

#### II.6.3.1 Approche de type contact

Cette approche a fait l'objet de nombreux travaux qui sont essentiellement basés sur l'élément joint proposé par Goodman et al en 1968. Selon le type de loi de comportement et le type d'approche numérique utilisé, les études proposées dans ce cadre appartiennent à l'une des catégories suivantes :

##### a- Adaptation à la rigidité

##### ▪ Élément joint de type Goodman

R.E Goodman et al ont proposé pour la simulation des fissures dans les roches, un élément spécial de longueur  $L$  et d'épaisseur  $e$  nulle (Figure II.7).

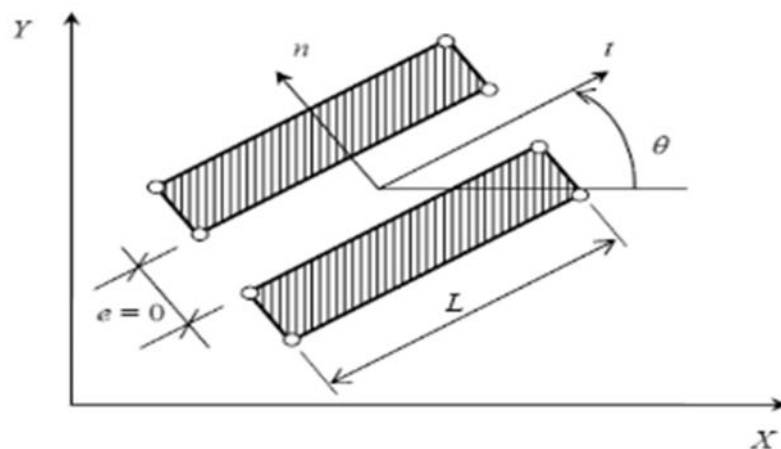


Figure II.7 Élément de joint Goodman [3]

Dans ce cas, l'élément joint est constitué de deux doubles nœuds, sa matrice de rigidité formulée à partir de la minimisation de l'énergie potentielle, en substituant les déformations à l'intérieur de l'élément par les déplacements relatifs à l'interface. Le vecteur de force liaison  $\{f\}$  par unité  $e$  longueur de l'élément est donné par une loi de type :  $\{f\} = \{k\}\{\Delta u\}$ .

Avec :

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} f_t \\ f_n \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad \{\Delta u\} = \begin{Bmatrix} \Delta u_t \\ \Delta u_n \end{Bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$[k]$  : est la matrice de rigidité donnée par  $[k] = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix}$

La matrice de rigidité globale du système est obtenue par l'assemblage des termes correspondant aux éléments rocheux et d'interface. Après la résolution du système d'équations régissant le problème, les contraintes de liaison et la méthode d'adaptation de la rigidité est appliqué

➤ **Élément de joint de type ressort**

L.R. Herrmann a proposé des éléments de type ressort pour la modélisation du comportement de l'interface acier-béton. Il a dédoublé les points de contact entre les deux milieux, et a muni chaque doublet de nœuds de deux ressort fictifs, un tangentiel et normal à la surface de contact (Figure II.8). Ces ressorts des rigidités appropriées contrôlent le glissement et décollement entre les corps de contact. Le glissement est défini à l'aide de critère de Mohr-Coulomb et la méthode d'adaptation de la rigidité est employée pour décrire le comportement de cet élément. [3]

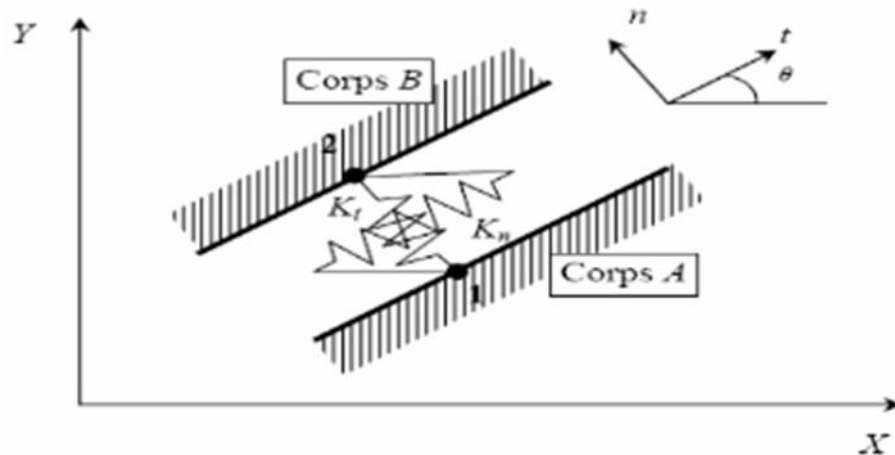


Figure II.8 Élément de joint de type ressort [3]

Les force de liaison  $F_t$  et  $F_n$  s'expriment par :  $F_n = K_n \Delta U_n$  et  $F_t = K_t \Delta U_t$

**b- Lois élastoplastiques**

Y. Meinon et al ont utilisé, pour le calcul des fondations des plateformes pétrolières, des éléments joints à 6 nœuds. Le comportement à l'interface, dans le sens tangentiel, est décrit par une loi élastoplastique non associée du type Mohr-Coulomb. Le glissement ou la plastification dans l'élément joint est donc gouverné par une fonction de charge  $F$  et un potentiel plastique  $g$  :

$$f(\sigma_n, \tau) = |\tau| - \sigma_n \tan \varphi - c \quad (\text{II.9})$$

$$g(\sigma_n, \tau) = |\tau| - \sigma_n \tan \psi \quad (\text{II.10})$$

Où  $\varphi, c, \psi$ , sont respectivement l'angle de frottement, la cohésion et l'angle de dilataance.

Ce modèle peut être représenté par une courbe de rupture, un cisaillement élastique – parfaitement plastique, une courbe de compression-traction et une courbe de dilataance, comme le montre les figures ci-dessous [11] :

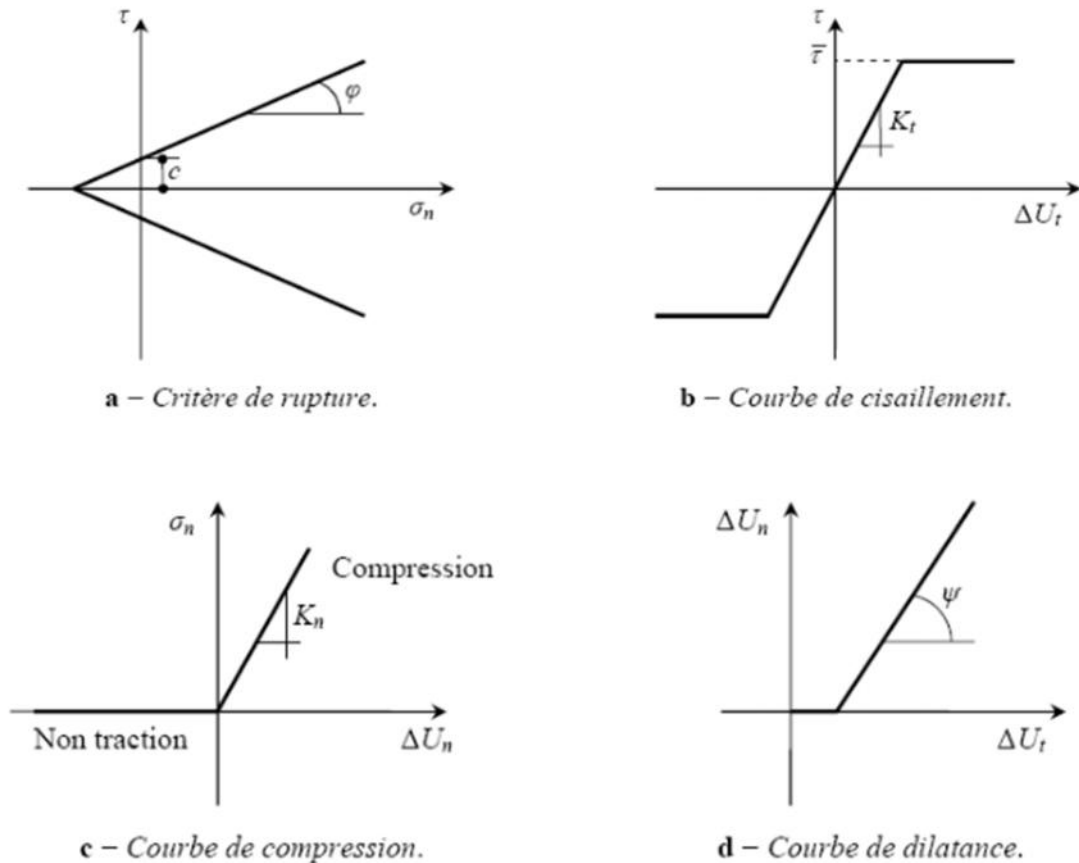


Figure II.9 Modèle de Mohr Coulomb [11]

### c- Lois incrémentales

Les principaux travaux développés dans le cadre de cette approche sont ceux de l'équipe MASTEC de l'Institut de mécanique de Grenoble. Les auteurs ont développé une loi vectorielle bidimensionnelle à dépendance directionnelle pour le comportement de l'interface. Leur modèle a été identifié sur des essais de cisaillement direct sol-structures, selon les trois chemins de sollicitations : à contrainte normale constante, à déformation normale constante et rigidité normale imposée. [11]

**d- Contact avec des conditions supplémentaires**

Ce type d'approche est fondé sur l'interaction des différentes conditions à la formulation des éléments de joints.

**e- Approche par la méthode de sous – structures**

J.M.Reynouard a mis au point un modèle de calcul pour les structures composés d'un ensemble de solides, et dont les surfaces de contact sont évolutives, le modèle proposé consiste à utiliser, d'une part, une technique de sous structuration en chaîne traduisant les conditions cinématiques, et d'autre part, un processus itératif qui traduit les conditions statiques aux interfaces.

**f- Approche à l'aide du multiplicateur de Lagrange**

M.G Katona a suivi la même démarche qu'Hermann et Frank en dédoublant les nœuds sur la surface de contact. Mais dans son modèle, des conditions supplémentaires sont introduites dans la formulation du système régissant problème. Ces conditions sont intégrées dans l'énergie potentielle à minimiser, à l'aide de la technique du multiplicateur de Lagrange.

**II.6.3.2 Approche de type couche mince**

Certains acteurs (Ghaboussi, Pandé, Desai), ont proposé l'introduction de la notion de déformations aux éléments joints; ceci en assignant une certaine épaisseur à l'interface. L'utilisateur de ce type d'éléments est justifié par le fait que la zone d'interface représente un domaine de faible épaisseur, (cas des joints ou défauts remplis dans les masses rocheuses et des zones d'interface sol-structures), qui est généralement soumis à des fortes sollicitations de cisaillement. Ils ont alors adapté des lois de comportement rhéologiques propres à des zones.

J.Ghaboussi et al ont développé un élément joint avec une faible épaisseur (comparée aux dimensions des éléments massifs adjacents), et ont présenté la construction explicite de la matrice de rigidité de l'élément d'interface pour les problèmes plans et axisymétriques.

Pour l'élément couche mince, une loi de comportement dans laquelle l'écroutissement et le pic de contrainte ont été introduits. Les paramètres de ce modèle sont déterminés à partir de l'essai de cisaillement direct entre le sol et une plaque rugueuse en béton.

Le modèle a été appliqué à la prédiction du comportement d'un pieu dans une argile, soumis à une charge de compression. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux de l'expérience.

## **II.8 Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la description de l'interface sol-pieu du point de vue de la modélisation rhéologique.

La définition des mécanismes caractéristiques de l'interface a fourni des éléments indispensables pour une modélisation correcte de son comportement et le calcul par le code PLAXIS 3D nécessite la prise en compte de l'interface, la formulation d'un modèle de comportement d'interface approprié et la définition d'éléments de contact spéciaux.

---

# Modélisation numérique

# III

---

III.1 Présentation de l'ouvrage :.....	36
III.2 Calcul de la portance ultime du pieu (couche de portance) :.....	36
III.3 Présentation du logiciel : .....	38
III.4 Les modèles de comportement intégrés dans Plaxis 3D Fondation : .....	38
III.4.1 Modèle élastique linéaire : .....	38
III.4.2 Le modèle de Mohr-coulomb : .....	39
III.4.2.a Les paramètres du modèle : .....	39
III.5 Calcul du déplacement et de la déformation sous charge verticale : .....	41
III.5.1 Simulation numérique du Pieu : .....	41
III.5.2 Modélisation du Sol : .....	42
III.5.3 Modélisation de l'interface sol-pieu : .....	44
III.5.4 Le maillage en 2D : .....	44
III.5.5 Le maillage en 3D :.....	44
III.5.6 Les étapes de calcul :.....	45
III.5.7 Affichage des résultats : .....	47
III.6 Conclusion : .....	55

### III.1 Présentation de l'ouvrage

Dans le cadre du projet « d'aménagement des accès routiers à la ville de Bouinane », dont l'objectif est de concevoir un réseau routier permettant aux flux de trafic d'entrée et de sortie une facilité d'accès, un programme de reconnaissance géotechnique a été réalisé au droit des ouvrages d'art projetés. Les terrains qui s'y développent appartiennent aux formations de la Mitidja et des piémonts (produit d'altération de l'Atlas Blidéen).

Les différents ouvrages d'art projetés franchiront des Oueds, reposant sur deux culées aux extrémités et une pile intermédiaire. Ils sont répartis comme suit :

*Tableau III.1 Différents ouvrages d'art*

N°OA	Franchissement	Localisation
OA1	CW114	Carrefour R.N61- CW114
OA2	CW114	Carrefour CW111- CW114
OA3	CW114	Entrée habitation
OA4	Autoroute	Entrée échangeur Baba Ali

Dans notre étude, nous avons choisi l'ouvrage d'art OA4 pour la détermination des déplacements des pieux et de l'interface sol- pieu, car nous disposons de données suffisantes pour réaliser ce calcul numérique.

### III.2 Calcul de la portance ultime du pieu (couche de portance)

Les sondages montrent la présence de sables fins à grossiers, d'argiles limoneuses et plastiques. La lithologie au droit de l'ouvrage est comme suit ;

- 0 à 0.4m : terre végétale argileuse noirâtre.
- 0.4 à 6.4 m: argile peu plastique à ferme.
- 6.4 à 9: sable de taille variable.
- 9 à 35m : sable et galets de grandes tailles

La capacité portante du pieu  $Q_u$  est calculée par l'expression suivante:

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (\text{III.1})$$

Avec :

- $Q_p$  : résistance de pointe

$$Q_p = q_d \cdot A_p \quad (\text{III.2})$$

$q_d$ : résistance ultime de la section par unité (t/m<sup>2</sup>)

$A$  : section de la pointe du pieu (m<sup>2</sup>)

- $Q_s$  : frottement latéral

$$Q_s = U \sum L_i f_i \quad (\text{III.3})$$

$f_i$ : frottement latéral maximal (t/m<sup>2</sup>)

$U$  : périmètre (m).

$L_i$  : épaisseur de la couche.

Les caractéristiques du pieu étudié sont représentées sur le tableau III.2

**Tableau III.2 Caractéristiques du pieu**

Pieu en béton coulé en place	Diamètre « m »	Section de la pointe « m <sup>2</sup> »	Périmètre « m »	Longueur « m »
	1.20	1.131	3.77	10.00

- La résistance de pointe  $Q_p$ , le frottement latéral maximal du pieu  $Q_s$  et la portance ultime  $Q_u$  sont :

$$Q_p = 3053.62 \text{ kN}$$

$$Q_s = 5278.00 \text{ KN}$$

$$Q_u = Q_p + Q_s = 3053.62 + 5278.00 = 8332 \text{ KN / pieu}$$

- La portance admissible du pieu :

$$Q_a = Q_u / F_s = 83,31.62 / 3 = 2777 \text{ KN /pieu}$$

Le pieu est soumis à un chargement axial  $Q = 2663 \text{ KN}$

On remarque que la portance admissible du pieu est supérieure à la charge transmise au pieu, donc le pieu est stable

### III.3 Présentation du logiciel

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 résolution numérique des équations, c'est aussi une représentation géométrique de l'espace qui délimite les couches ou volumes occupés par chaque matériau (sol, roche, eau, béton, métal, etc.) et précise la place des conditions aux limites et des interfaces, avec leurs conditions de contact.

Le calcul des déplacements et des déformations du pieu, du sol d'assise et de l'interface sol-pieu sous charge vertical est réalisé par le code Plaxis 3D FOUNDATION, est un programme d'élément fini tridimensionnel développé pour l'analyse des fondations des structures, il combine les procédures d'entrée graphiques simples, qui permettent à l'utilisateur de générer automatiquement des modèles complexes d'éléments finis. .

Ce logiciel porte sur un certain nombre de conceptions pour lesquelles des différentes caractéristiques sont introduites progressivement. [13]

### III.4 Les modèles de comportement intégrés dans Plaxis 3D Fondation

Les modèles de comportement de sols sont très nombreux ; depuis le modèle élastique plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées, permettant de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-visco-plastique des sols.

Un des objectifs de Plaxis 3D Fondation est de fournir à l'utilisateur un code d'éléments finis, qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechnique réels dans un délais raisonnable, en utilisant des modèles de comportement de sol dont les paramètres peuvent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale. Les modèles utilisés pour notre étude sont les suivants :

#### III.4.1 Modèle élastique linéaire

Le modèle élastique utilisé dans Plaxis 3D Fondation est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module de Young  $E$ , le coefficient de poisson  $\nu$  et le poids volumique  $\gamma$ .

Le modèle élastique de Plaxis 3D Fondation 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.

### III.4.2 Le modèle de Mohr-coulomb

Le modèle de Mohr-coulomb est un modèle élastique parfaitement plastique (sans écrouissage). Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (\text{II.4})$$

Où  $\sigma_n$  et  $\tau$  sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement,  $c$  et  $\varphi$  sont respectivement la cohésion et l'angle de frottement interne du matériau.

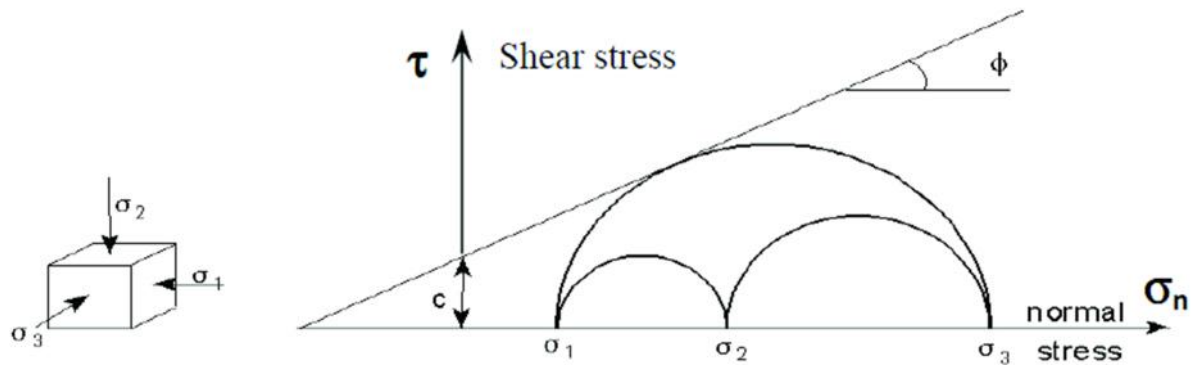


Figure III.1 Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb *ref*

Le modèle de Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres. Les deux premiers sont  $E$  et  $\nu$  (paramètre d'élasticité), les trois autres sont  $c$ ,  $\varphi$  et  $\psi$ , respectivement la cohésion, l'angle de frottement et l'angle de dilatance. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation.

#### III.4.2.a Les paramètres du modèle

Il est à noter que tous les paramètres utilisés pour le calcul sont les résultats du rapport géotechnique donnée précédemment.

- **Le module de Young**

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique.

Le module de Young varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle Mohr-Coulomb, le module de déformation est constant. Ce module nécessite des essais spéciaux. Le module d'élasticité  $E$  du sol est relié, selon Ménard, au module pressiométrique par le biais du coefficient  $\alpha$  (voir Tableau III.3).

**Tableau III.3 Valeur du coefficient rhéologique pour des différents sols**

Rocher	
TYPE	
Très peu fracturé	2/3
Normal	1/2
Très fracturé	1/3
Très altéré	2/3

- **L'angle de frottement**

L'angle de frottement à introduire est l'angle de frottement évalué soit à partir des essais de cisaillement rectiligne ou bien des essais triaxiaux.

- **La cohésion**

Les cohésions à introduire sont les cohésions obtenues lors de la réalisation des essais de cisaillement et les essais triaxiaux.

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottant, une très faible cohésion (0,2 à 1 kPa) pour des questions numériques.

- **Le coefficient de poisson**

On conseille une valeur de 0.2 à 0.4 pour le coefficient de poisson. Pour des sols incompressibles, le coefficient de poisson s'approche de 0.5 sans que cette valeur soit utilisable. Pour les besoins de calcul, les valeurs du coefficient de poisson sont fixées à des valeurs habituelles.

- **L'angle de dilatance**

C'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

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

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

La valeur  $\nu = 0$  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 faible ou moyenne sous contraintes assez fortes.

▪ **Le coefficient  $K_0$**

Ce coefficient est nécessaire à l'initialisation des contraintes effectives ou totales. Il est calculé la formule de Jaky (1944) ( $K_0 = 1 - \sin \varphi$ ).

### III.5 Calcul du déplacement et de la déformation sous charge verticale

#### III.5.1 Simulation numérique du Pieu

Les pieux sont modélisés par une loi de comportement élastique linéaire avec module de Young  $E_p = 29 \cdot 10^6 \text{ KN/m}^2$  et coefficient de poisson  $\nu = 0.2$ .

Tableau III.4 Caractéristiques mécaniques du pieu

Paramètre	Modèle de Matériau	Type de comportement	Volumique du pieu $\gamma_p (\text{KN/m}^3)$	Module de young $E_p (\text{MN/m}^2)$	Coefficient de poisson $\nu_p$
Pieu (D= 1.2m)	Linéaire – élastique	Non – porous	24	29000	0.2

Pour effectuer une modélisation par le Plaxis 3D Fondation d'un pieu, il est nécessaire de :

- Créer le maillage d'élément fini et le plan de travail.
- Placer ensuite le pieu type circulaire massif avec un diamètre de (1.20 m) au centre d'une petite excavation (voir la Figure III.2)

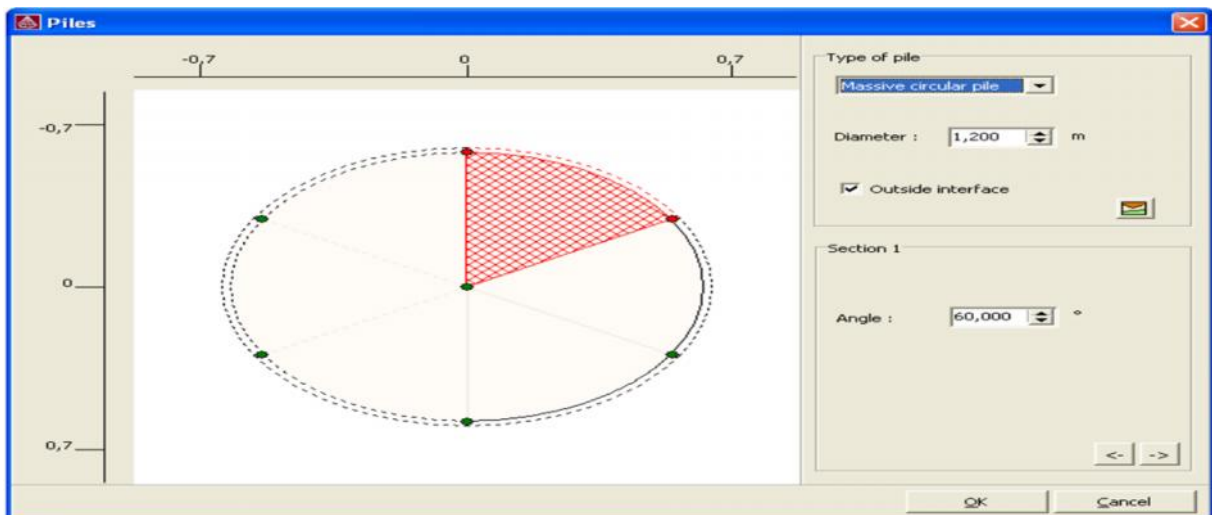


Figure III.2 Propriété du pieu

- Mettre sur le dessus du pieu, une charge ponctuelle « chargement axial » ; figure III.3

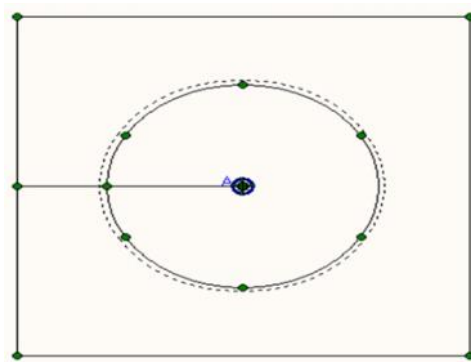


Figure III.3 définition de la charge axiale

### III.5.2 Modélisation du Sol

Le sol du massif est modélisé par des éléments solides avec une loi de comportement élastique-parfaitement plastique du type Mohr-coulomb, les paramètres sont associés à cette loi et sont au nombre de cinq, deux pour la partie élastique (module de Young et coefficient de poisson ), et trois pour la partie plastique (la cohésion, l'angle de frottement interne et l'angle de dilatance); Les caractéristiques des couches sont représentées sur le tableau III.5.

Tableau III.5 Caractéristiques mécaniques des couches de sol

Paramètre	Nom	Argile	Sable	Sable profond	Unité
Modèle de Matériau	<b>Model</b>	<b>Mohr-coulomb</b>	<b>Mohr-coulomb</b>	<b>Mohr-coulomb</b>	-

Type de comportement	Type	Drainé	Drainé	Drainé	-
Poids volumique saturé	$\gamma_{sat}$	11.3	10.6	12.1	$\text{kN/m}^3$
Poids volumique non saturé	$\gamma_{unsat}$	11.3	10.6	12.1	$\text{kN/m}^3$
Module de Young	E	9100	13000	13500	$\text{kN/m}^2$
Coefficient de poisson	$\nu$	0.3	0.2	0.2	-
Cohésion non drainé	c	26.9	0	13.4	$\text{kN/m}^2$
Angle de frottement interne	$\phi$	0.0	40	36.9	- ( $^\circ$ )
Angle dilataance	$\psi$	0.0	0	0.0	- ( $^\circ$ )
Facteur de réduction de résistance	$R_{int}$	1	1	1	-
Coefficient	$k_0$	0.56	0.6	0.6	-

On introduit les propriétés des matériaux affectés; Le sol est composé de 3 couches distincte, on sélectionne la limite de la couche supérieur ( $y=0$ ), puis on introduit les trois limites des couches supplémentaires (Figure III.4).

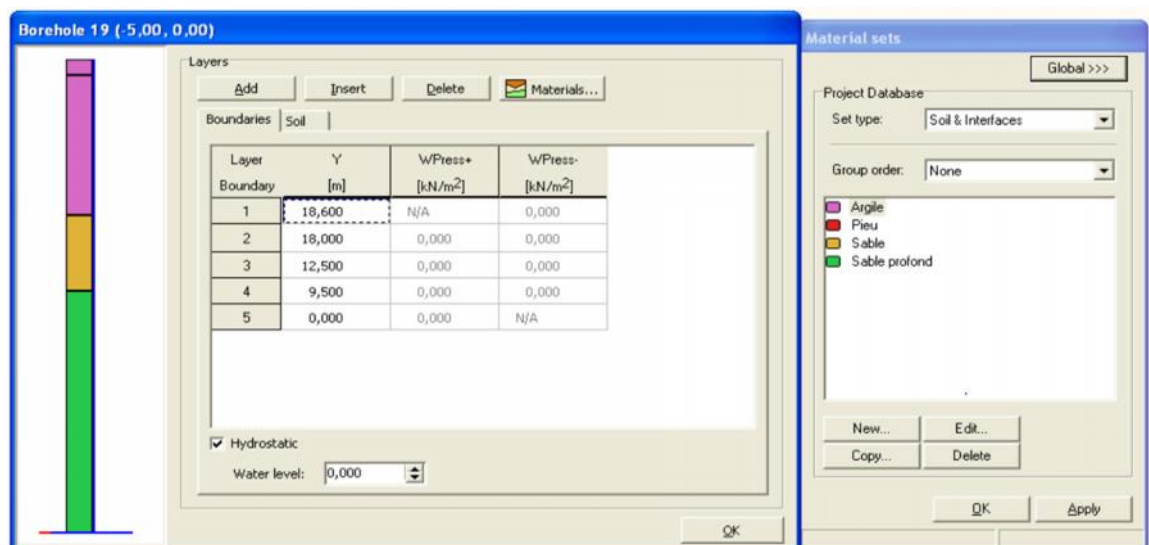


Figure III.4 Propriétés du sol et les limites de ses couche

### III.5.3 Modélisation de l'interface sol-pieu

L'élément interface utilisé dans PLAXIS de type "sans épaisseur", et le choix de coefficient de réduction de résistance dans l'interface sol-pieu ( $R_{int}$ ) sont très intéressants pour obtenir la vraie modélisation des pieux dans l'argile raide et molle.

L'effet de présence d'éléments d'interface apparus clairement, surtout dans le cas des pieux tubulaires.

L'approche numérique présentée au chapitre II (absence de l'élément d'interface) donne un comportement charge-tassement plus rigide par rapport au calcul tridimensionnel (présence de l'élément d'interface).

### III.5.4 Le maillage en 2D

Cette étape consiste à discrétiser le milieu en le découpant en un certain nombre d'élément de petites dimensions.

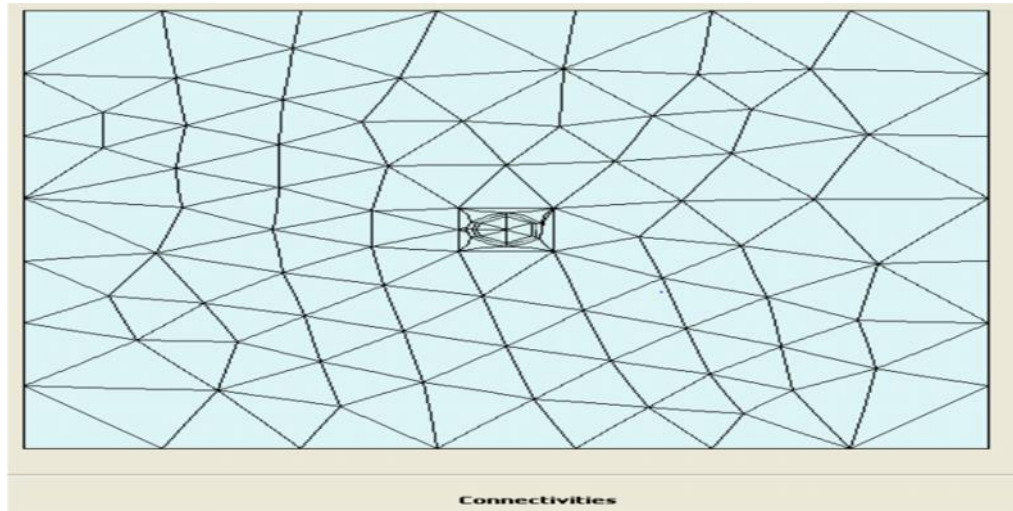


Figure III.5 Maillage en 2D du PVI

### III.5.5 Le maillage en 3D

Le programme présentera une vue en trois dimensions du maillage (figure III.6)

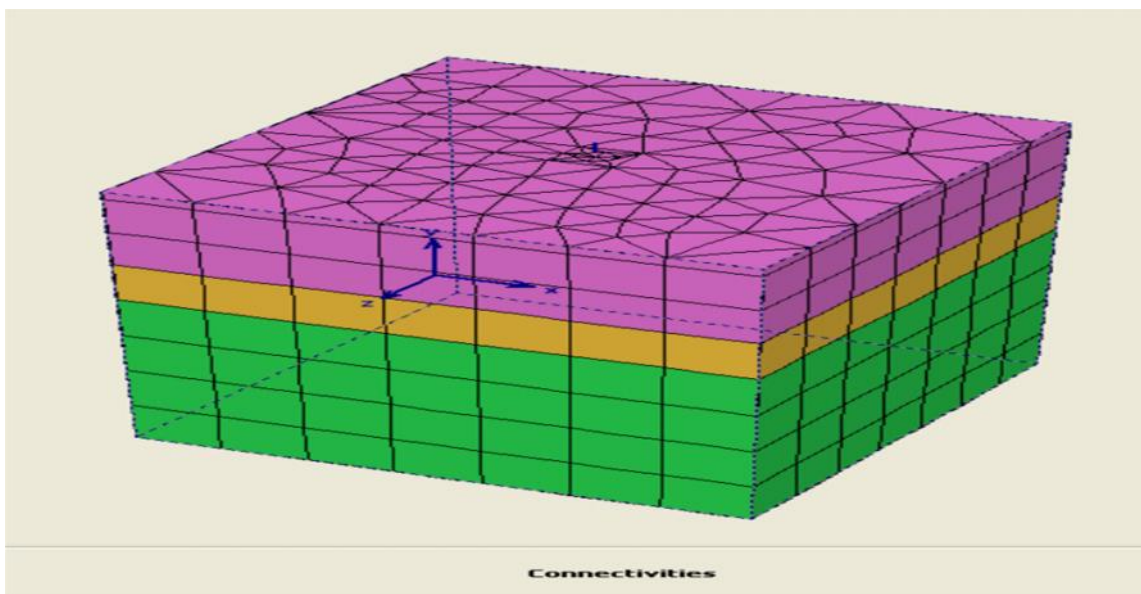


Figure III.6 Maillage en 3D

### III.5.6 Les étapes de calcul

#### ➤ Phase initiale

La phase initiale représente la phase de chargement par gravité, dans le calcul par des éléments finis, dans lesquels le poids du sol est appliqué par des moyens de chargement par gravité. Ceci afin de produire les contraintes initiales correctes dans le modèle. Cependant, les déformations calculées dans la phase initiale ne sont pas considérées comme pertinentes pour d'autres calculs. Par conséquent, ces déplacements sont, par défaut, remis à zéro au début de la phase de calcul suivante.

#### ➤ Phase d'installation du pieu et chargement

Dans cette phase, on sélectionne la zone du bouchon et on remplace le sol par l'acier pour activer le bouchon, par la suite on active le tube circulaire, où les effets d'installation du pieu ne sont pas modélisés (Figure III.7).

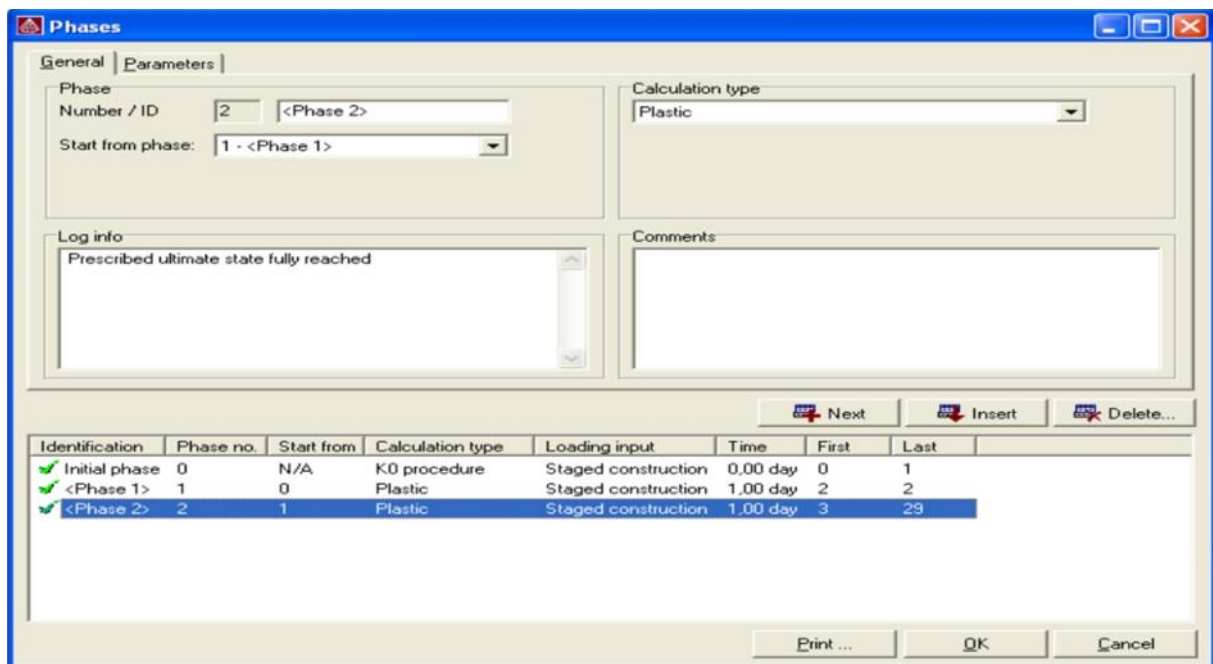


Figure III.7 Paramètre de la deuxième phase

#### ➤ Phase de calcul

Avant de commencer le calcul, on sélectionne deux nœuds de manière à pouvoir tracer le déplacement de la charge et la courbe par la suite.

- L'une situé en haut du pieu à (0,0), permet de tracer le déplacement de pieu (point A).
- L'autre situé sur l'interface, permet de tracer le déplacement de l'interface (point B)

Les points sélectionnés sont indiqués (Figure III.8).

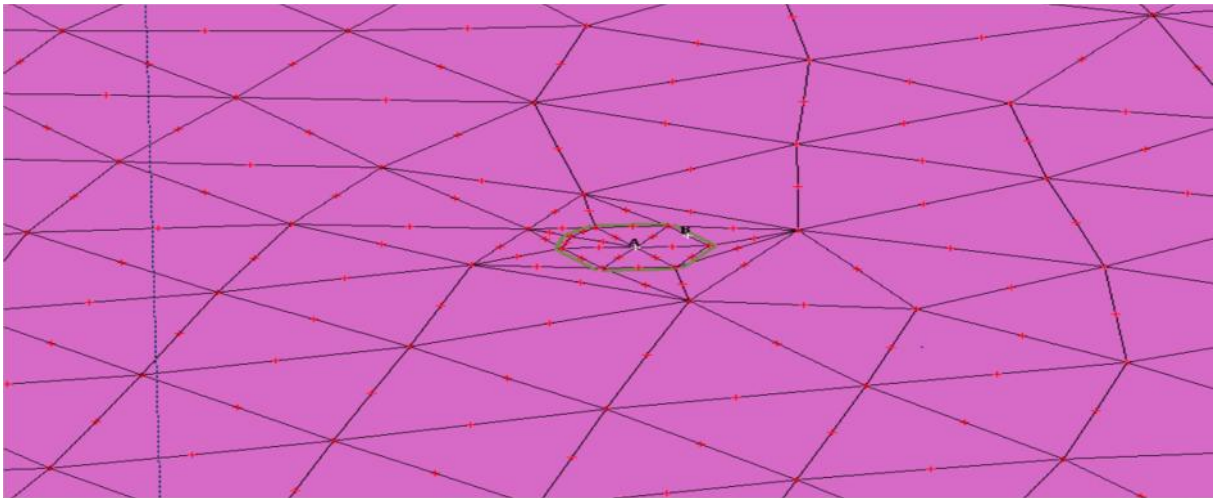


Figure III.8 Le point sélectionné

### III.5.7 Affichage des résultats

Après les calculs, les résultats du test de charge peuvent être consultés. Le programme de sortie va ouvrir et affiche le maillage déformé, les contraintes, les déformations et les déplacements dans les plans de travail à la fin du test de charge. Par exemple on sélectionne le plan du travail  $y = 0$  pour enquêter sur les contraintes autour de la pointe du pieu (Figure III.9).

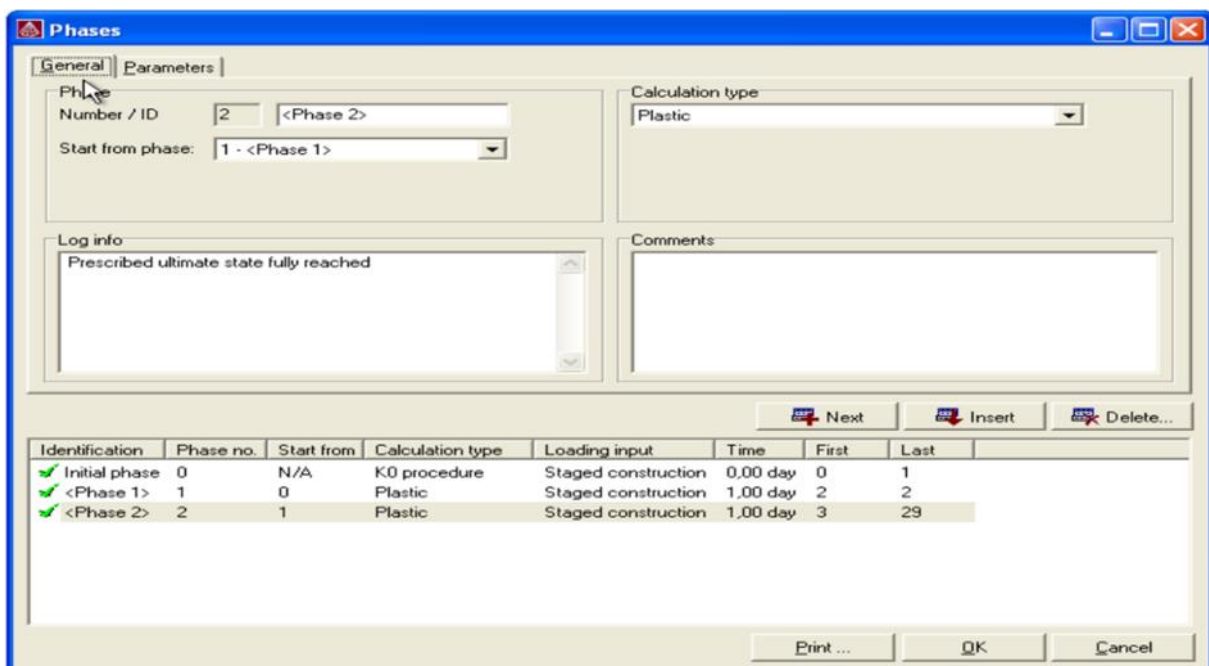


Figure III.9 Affichage et interprétation des résultats

Les principaux résultats auxquels on va s'intéresser sont :

- Les déplacements et les contraintes du sol. Figures (III.10, III.11, III.12)

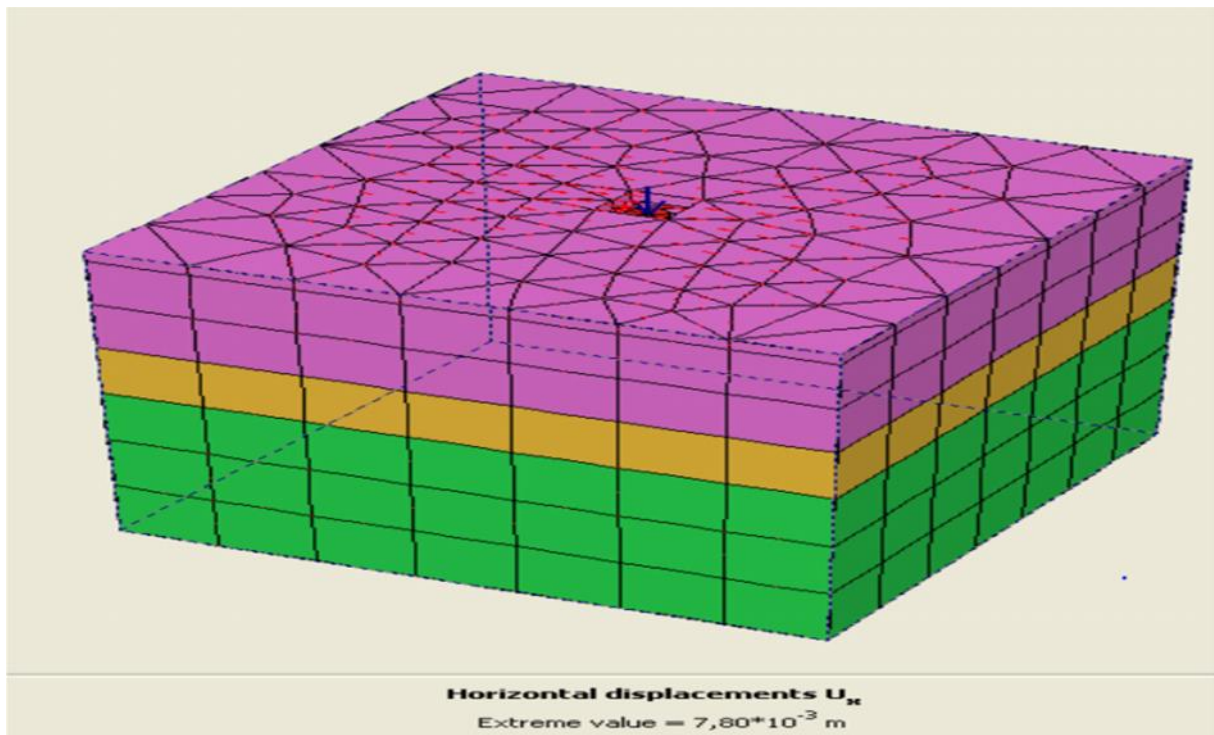


Figure III.10 Présentation de déplacement horizontal du sol

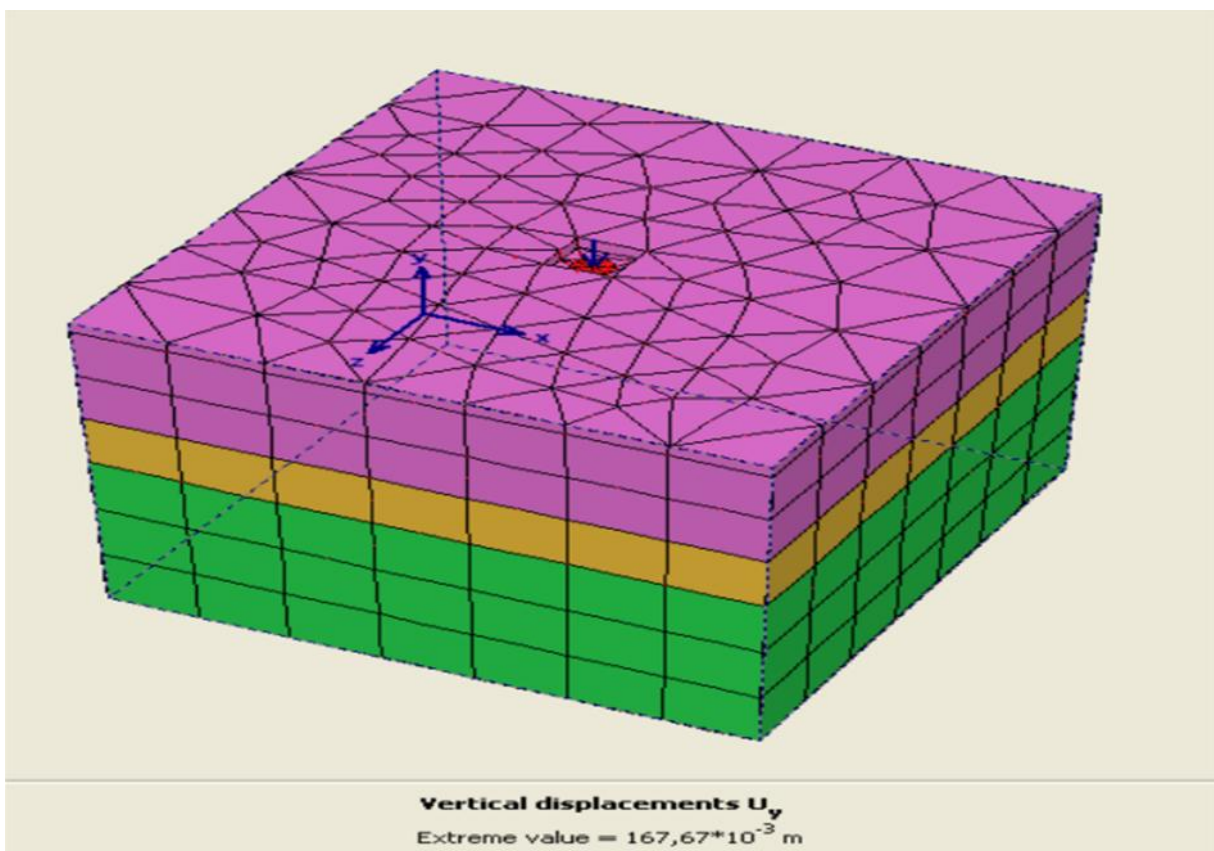


Figure III.11 Présentation de déplacement vertical du sol

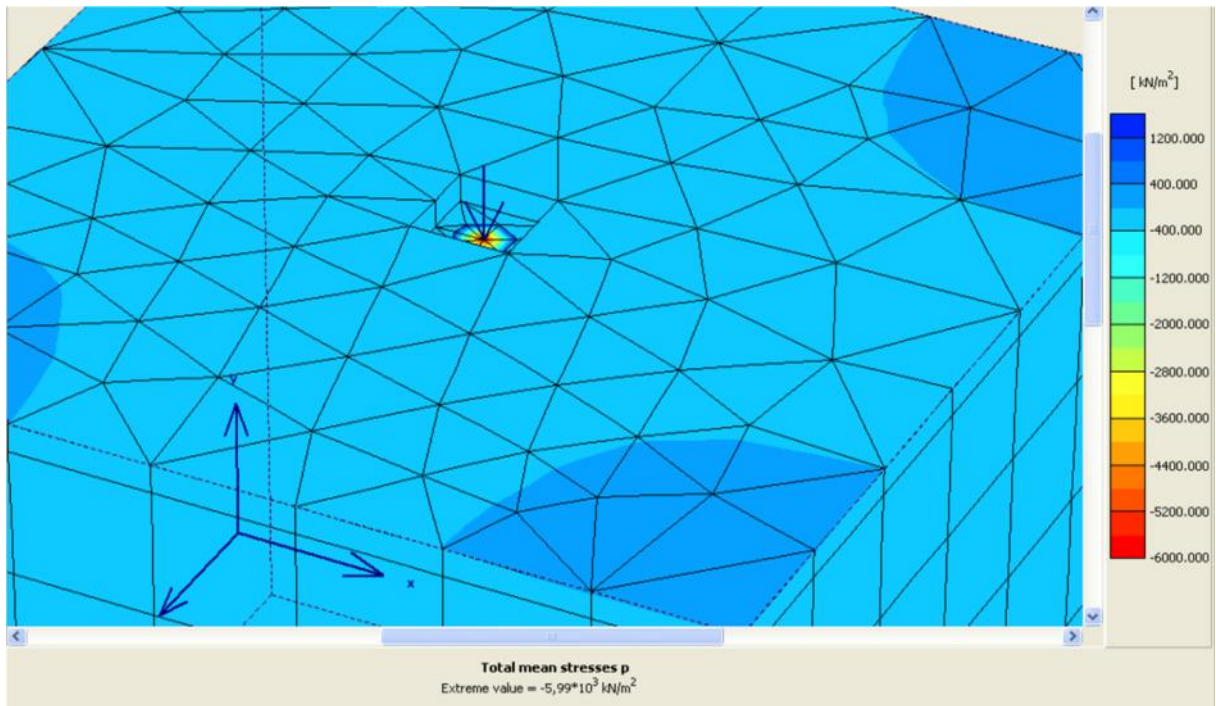


Figure III.12 Contrainte totale du sol

- Les déplacements et les contraintes à l'interface sol-pieu au niveau de l'interaction. Figures (III.13, III.14, III.1 III.15)

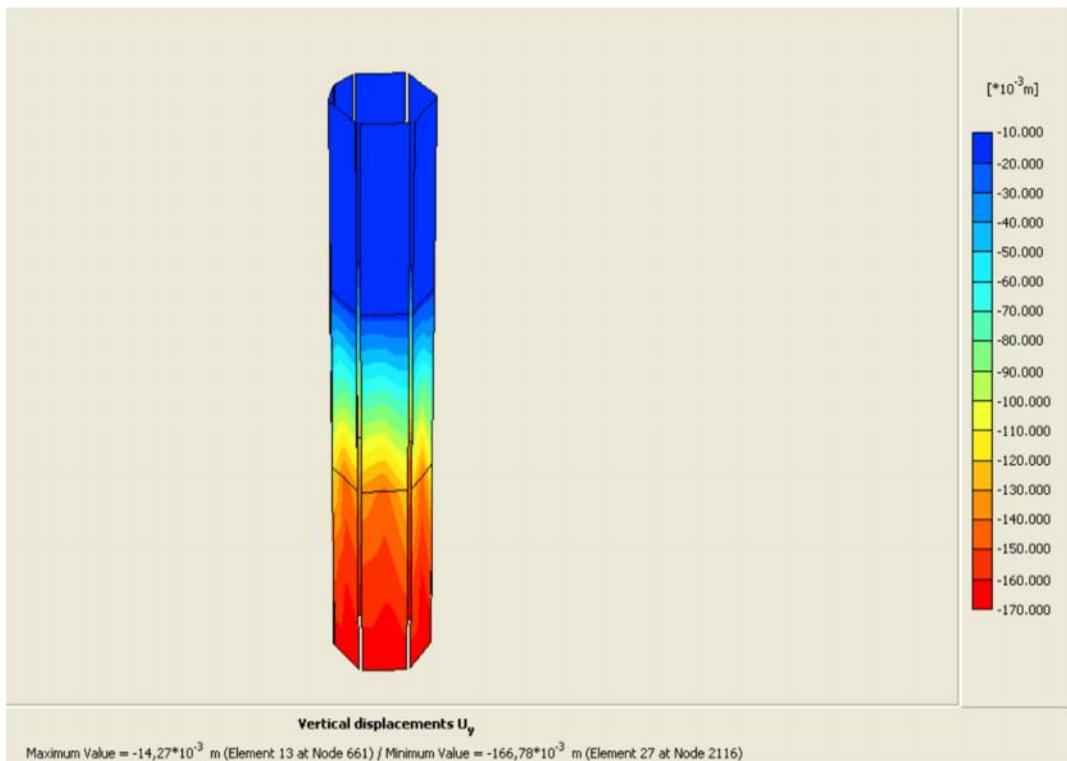


Figure III.13 Déplacement vertical à l' interface sol-pieu

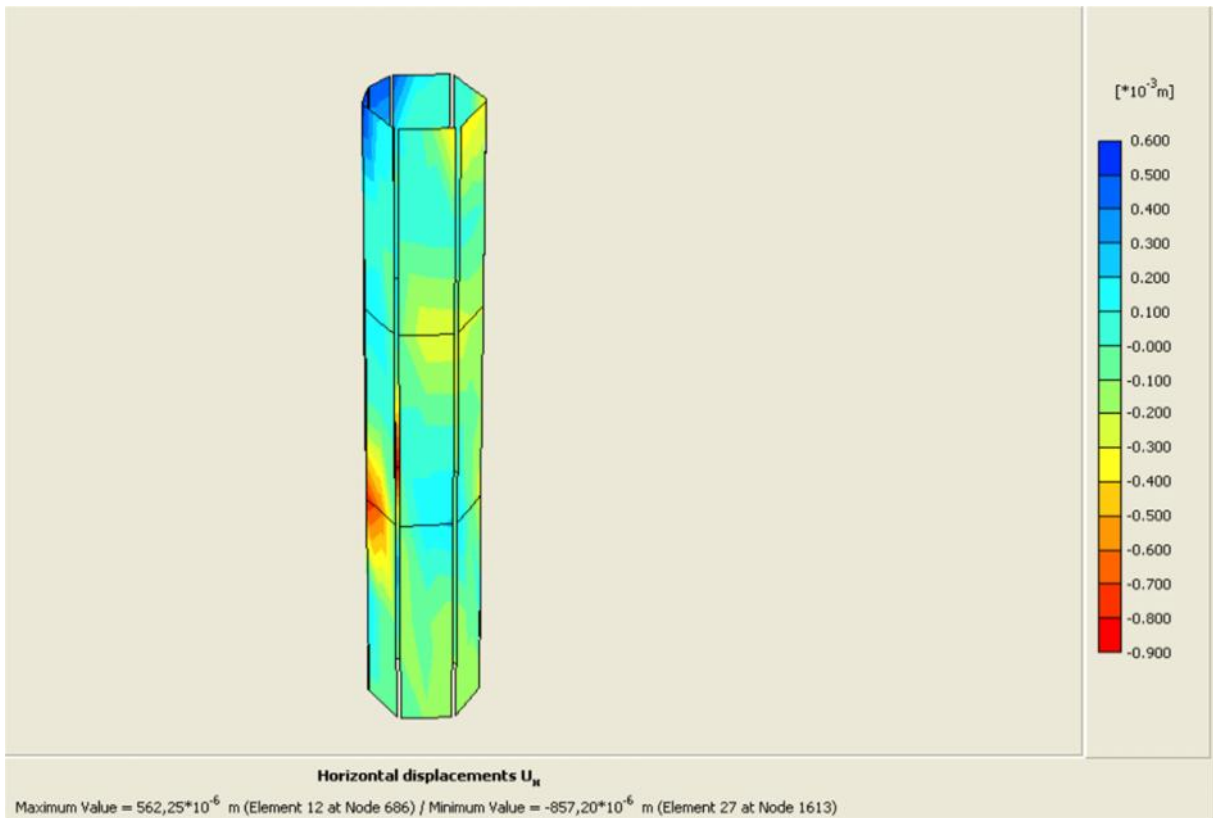


Figure III.14 Déplacement horizontal à l'interface sol-pieu

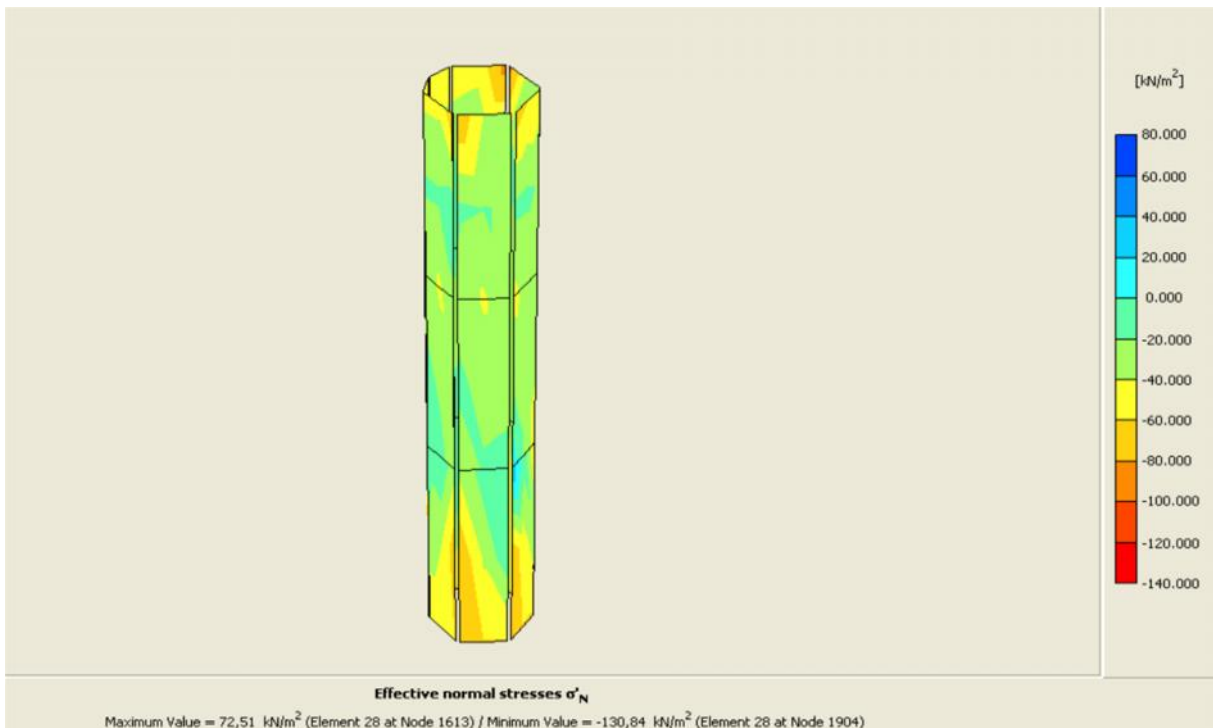


Figure III.15 La contrainte effective à l'interface sol-pieu

- Les déplacements et le moment du pieu. Figures (III.16, III.17, III.18)



Figure III.16 Déplacement vertical du pieu

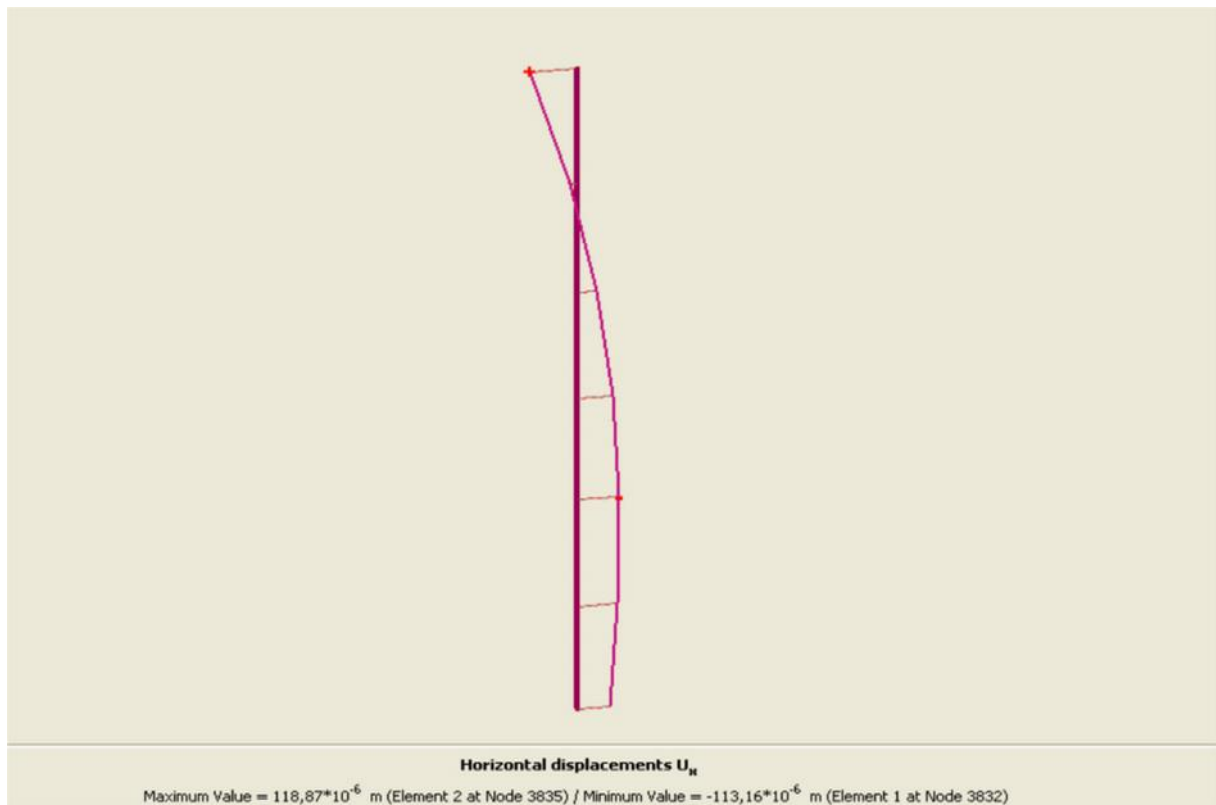


Figure III.17 Déplacement horizontal du pieu

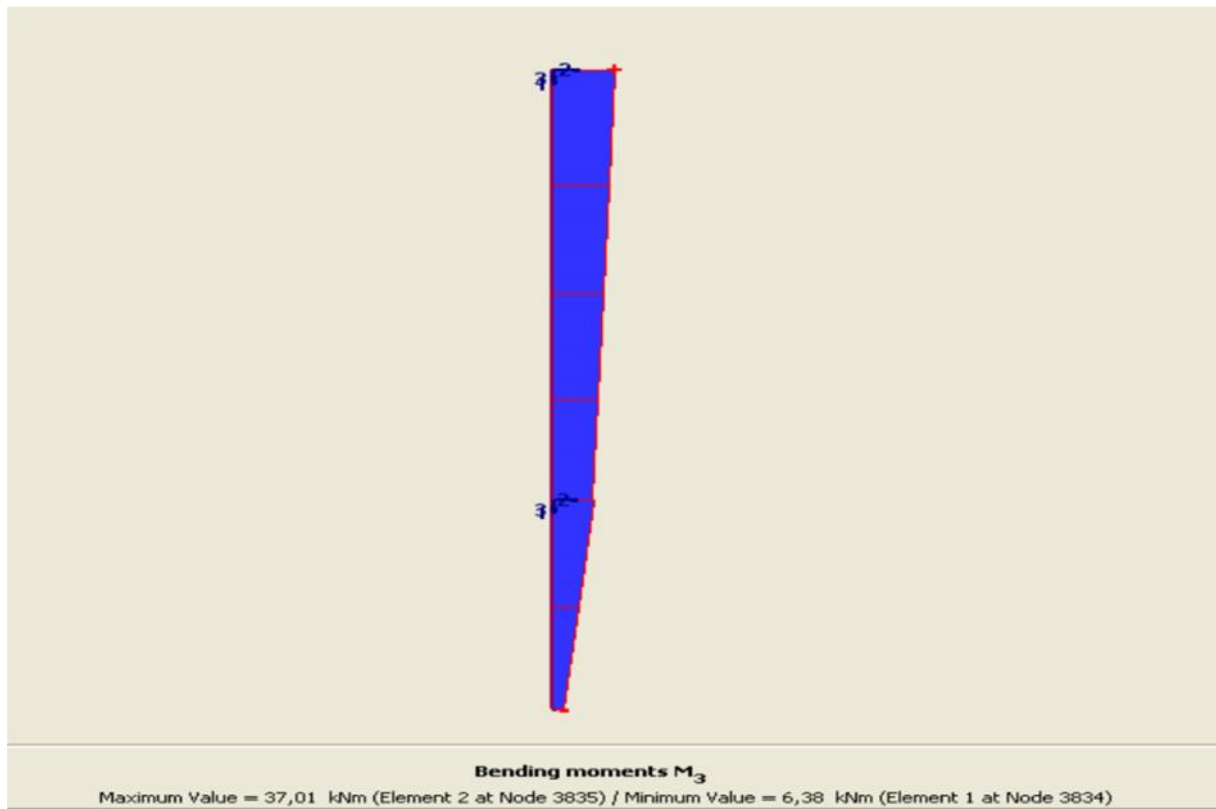


Figure III.18 Moment de pieu

Les courbes de charges-déplacements du pieu et à l'interface sol-pieu sont représentés sur les Figures III.19, III.20, III.21, III.22, III.23.

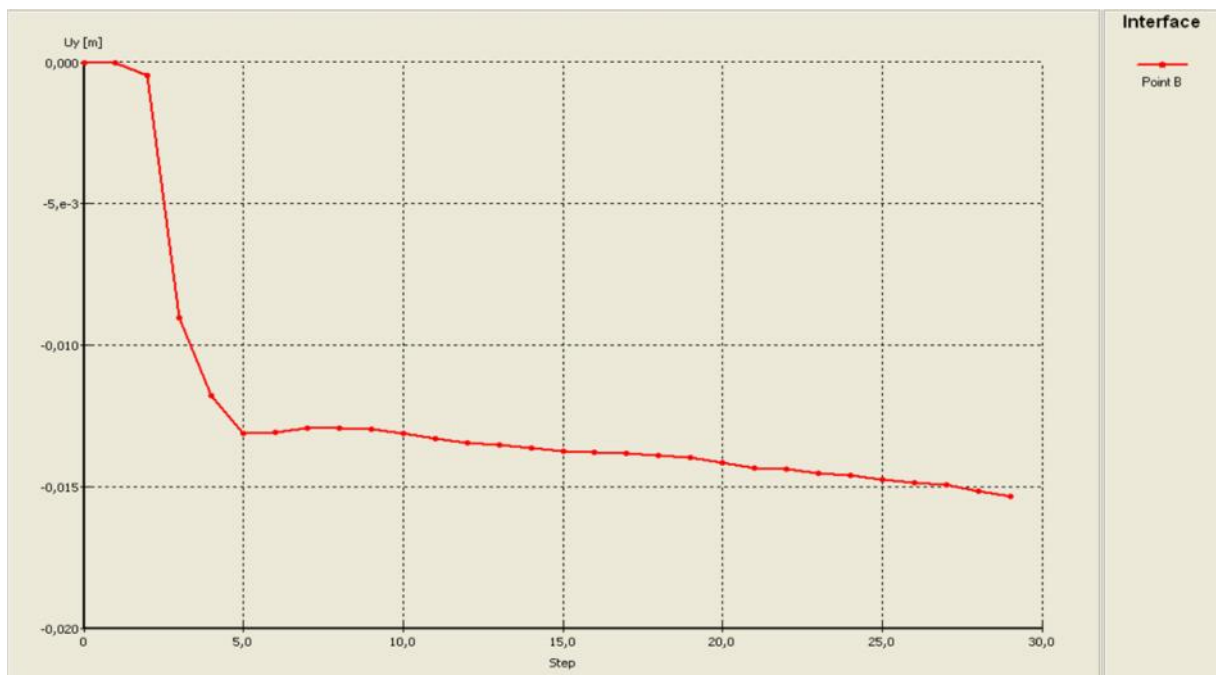
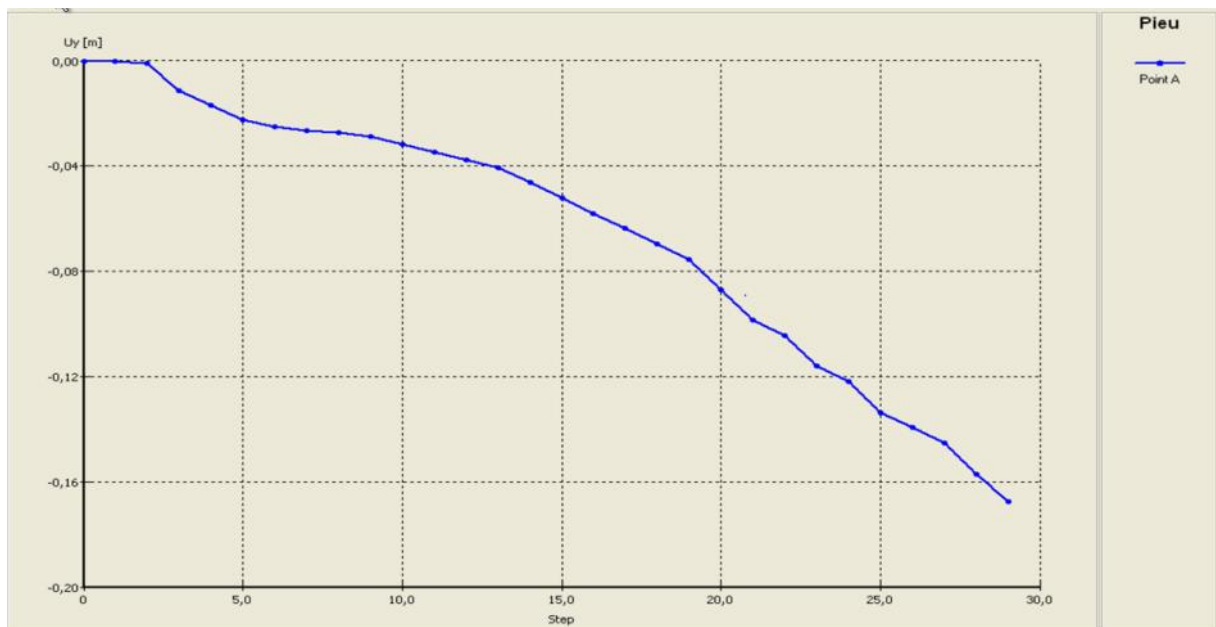


Figure III.19 Courbe charge-déplacement vertical à l'interface sol-pieu



*Figure III.20 Courbe charge-déplacement horizontal à l'interface sol-pieu*

L'analyse des graphes effectués à l'interface sol-pieu, montre que le déplacement vertical s'accroît en fonction des étapes de calcul, puis il présente un palier qui correspond à la stabilité.



*Figure III.21 Courbe charge-déplacement vertical du pieu*

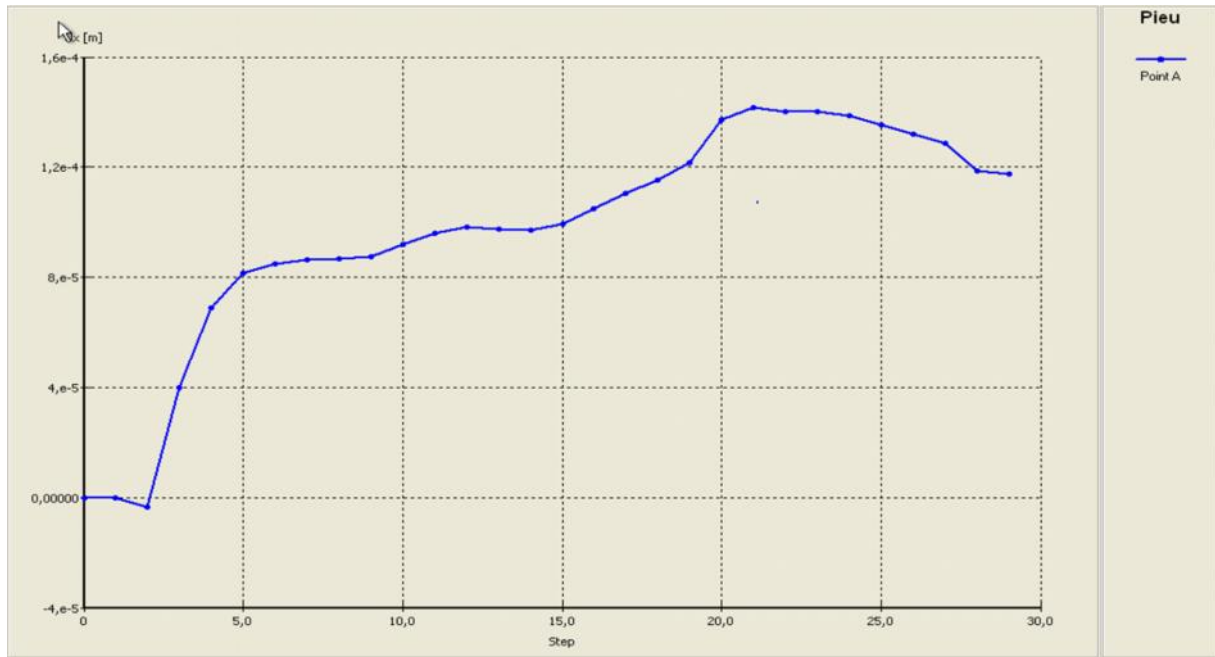


Figure III.22 Courbe charge-déplacement horizontal du pieu

L'analyse des graphes effectués en profondeur du pieu, montre que les déplacements s'accroissent en profondeur jusqu'à la profondeur d'ancrage du pieu, puis ils commençant à diminué.

Les résultats obtenus son récapitulés sur les tableaux suivants ;

Tableau III.6 Résultats concernant le sol d'assise

Déformations	sol
Déplacement horizontal $10^{-3}$ (m)	7.80
Déplacement vertical $10^{-3}$ (m)	167.67
Contrainte total $10^3$ (kN/m <sup>2</sup> )	5.99

Tableau III.7 Résultats concernant l'interface sol-pieu

Déformations	à l'interface sol-pieu
Déplacement horizontal $10^{-3}$ (m)	0.857
Déplacement vertical $10^{-3}$ (m)	166.78
Contrainte effective total (kN/m <sup>2</sup> )	130.84

Tableau III.8 Résultats concernant le pieu

Déformations	pieu
Déplacement horizontal $10^{-3}$ (m)	0.119
Déplacement vertical $10^{-3}$ (m)	167.66
Moment ( KN/m)	37.01

### III.6 Conclusion

Le comportement ‘un pieu soumis à un chargement axial est influencé par les caractéristiques physiques du pieu et la nature du sol qui l’entoure et le type de chargement.

Les résultats obtenus par le code plaxis foundation sont comme suit :

- Le déplacement horizontal et la contrainte à l’interface sol-pieu sont faibles.
- Le déplacement horizontale et le moment du pieu sont faible dans la partie ancrée dans le sol ( ce qui justifiée par la rigidité du pieu).
- Le déplacement vertical du pieu est supérieur au déplacement horizontal, donc le pieu travaille en enfoncement.
- Le déplacement vertical à l’interface sol-pieu est presque égale à celui du pieu ; donc le sol et le pieu ont la même vitesse de déplacement et l’effet du frottement négatif est presque négligeable.

IV.1 Introduction : .....	55
IV.2 Influence des paramètres d'interface sol-pieu : .....	55
IV.2.1 Influence de la cohésion de l'interface : .....	55
IV.2.1.1 Les résultats : .....	56
IV.2.1.2 Interprétation des résultats : .....	61
IV.2.2. Influence de l'angle de frottement d'interface : .....	61
IV.2.2.1 Les résultats : .....	62
VI.2.2.2 Interprétation des résultats : .....	67
IV.2.3 Influence de la rigidité de l'interface : .....	67
IV.2.3.1 Les résultats : .....	68
IV.2.3.2 Interprétation des résultats : .....	72
IV. Conclusion : .....	73

## **IV.1 Introduction**

Après l'établissement du modèle de référence, on fait varier les propriétés d'interface sol-pieu tel que la rigidité d'interface  $K$ , la cohésion d'interface  $C$  et l'angle de frottement d'interface  $\varphi$  et on visualise les résultats afin de déterminer l'influence de ces paramètres dans le comportement des pieux et du sol de fondation.

## **IV.2 Influence des paramètres d'interface sol-pieu**

### **IV.2.1 Influence de la cohésion de l'interface**

La cohésion d'interface  $C$  est prise égale à la cohésion de la couche du sol (couche d'argile), d'interface avec le pieu, donc lorsqu'on fait varier cette cohésion qui revient à varier la cohésion la couche de l'argile, pour l'étude paramétrique on effectue :

- ✓ **C+10% ; C+30% ; C+50%**
- ✓ **C-10% ; C-30% ; C-50%**

## IV.2.1 Les résultats

## a- Augmentation de la cohésion de l'interface

Tableau IV.1 Résultats obtenues pour l'augmentation de la cohésion d'interface

Déformations	Résultats de référence	Augmentation de la cohésion d'interface : 10%	Augmentation de la cohésion d'interface : 30%	Augmentation de la cohésion d'interface : 50%
Déplacement horizontal du sol $10^{-3}$ (m)	7.80	7.38	6.63	5.89
Déplacement vertical du sol $10^{-3}$ (m)	167.67	159.33	143.33	126.32
Contrainte total du sol $10^3$ (kN/m)	5.99	5.99	6.00	6.01
Déplacement horizontal du pieu $10^{-6}$ (m)	0.1188	0.1306	0.1669	0.1687
Déplacement vertical du pieu $10^{-3}$ (m)	166.69	158.38	143.32	126.30
Moment de pieu (KN.m)	37.01	37.02	36.92	36.93
Déplacement horizontal d'interface $10^{-6}$ (m)	0.857	0.915	0.895	0.835
Déplacement vertical d'interface $10^{-3}$ (m)	166.78	157.51	142.46	125.46
Contaraite effective d'interface (KN/m <sup>2</sup> )	130.84	130.98	132.16	124.65

- **L'augmentation de la cohésion d'interface du sol de 10% de la cohésion initial conduit à une :**
  - Diminution du déplacement horizontal du sol de 5.38%
  - Diminution du déplacement vertical du sol de 4.97%
  - Même contrainte total dans le sol .
  - Augmentation du déplacement horizontal du pieu de 9.93%
  - Diminution du déplacement vertical du pieu de 4.99%
  - Augmentation valeur du moment max du pieu 0.22%
  - Augmentation du déplacement horizontal à l'interface de 6.77%
  - Diminution du déplacement vertical à l'interface de 5.56%
  - Diminution de la contrainte effective à l'interface de 0.11%
  
- **L'augmentation de la cohésion d'interface du sol de 30% de la cohésion initial conduit à une :**
  - Diminution du déplacement horizontal du sol de 15.38%
  - Diminution du déplacement vertical du sol de 14.52%
  - Augmentation contrainte total dans le sol 0.17%
  - Augmentation du déplacement horizontal du pieu de 40.49%
  - Diminution du déplacement vertical du pieu de 14.02%
  - Augmentation valeur du moment max du pieu 0.24
  - Augmentation du déplacement horizontal à l'interface de 6.77%
  - Diminution du déplacement vertical à l'interface de 5.56%
  - Diminution de la contrainte effective à l'interface de 1.01%
  
- **L'augmentation de la cohésion d'interface du sol de 50% de la cohésion initial conduit à une :**
  - Diminution du déplacement horizontal du sol de 24.49%
  - Diminution du déplacement vertical du sol de 24.66%
  - Augmentation contrainte total dans le sol 0.33
  - Augmentation du déplacement horizontal du pieu de 42.00%
  - Diminution du déplacement vertical du pieu de 24.23%
  - Augmentation valeur du moment max du pieu 0.22
  - Augmentation du déplacement horizontal à l'interface de 2.57%
  - Diminution du déplacement vertical à l'interface de 24.78%
  - Diminution de la contrainte effective à l'interface de 4.73%

## b- Diminution de la cohésion de l'interface

Tableau IV.2 Résultats obtenues pour l'augmentation de la cohésion d'interface (PLAXIS 3D)

Déformations	Résultats de référence	Diminution de la cohésion d'interface : 10%	Diminution de la cohésion d'interface : 30%	Diminution de la cohésion d'interface : 50%
Déplacement horizontal du sol $10^{-3}$ (m)	7.80	8.23	9.27	10.52
Déplacement vertical du sol $10^{-3}$ (m)	167.67	176.15	192.73	208.10
Contrainte total du sol $.10^3$ (KN/m)	5.99	5.98	5.98	5.97
Déplacement horizontal du pieu $10^{-6}$ (m)	0.1188	0.1255	0.1378	0.1491
Déplacement vertical du pieu $10^{-3}$ (m)	166.69	176.14	192.72	208.09
Moment de pieu (KN.m)	37.01	37.07	37.09	37.04
Déplacement horizontal d'interface $10^{-3}$ ( $m^2$ )	0.857	0.786	0.667	0.601
Déplacement vertical d'interface $10^{-3}$ ( $m^2$ )	166.78	0.175.58	191.81	207.16
Contrainte effective d'interface (KN/ $m^2$ )	130.84	130.94	139.91	142.63

- **La diminution de la cohésion d'interface du sol de 10% de la cohésion initial conduit à une :**
  - Augmentation du déplacement horizontal du sol de 24.49%
  - Augmentation du déplacement vertical du sol de 24.66%
  - Diminution contrainte total dans le sol 0.17%
  - Diminution du déplacement horizontal du pieu de 5.64%
  - Augmentation du déplacement vertical du pieu de 5.67%
  - Diminution valeur du moment max du pieu 0.16
  - Diminution du déplacement horizontal à l'interface de 8.28%
  - Augmentation du déplacement vertical à l'interface de 5.28%
  - Augmentation de la contrainte effective à l'interface de 0.08%
  
- **La diminution de la cohésion d'interface du sol de 30% de la cohésion initial conduit à une :**
  - Augmentation du déplacement horizontal du sol de 18.85%
  - Augmentation du déplacement vertical du sol de 14.95%
  - Diminution contrainte total dans le sol 0.17%
  - Diminution du déplacement horizontal du pieu de 15.99%
  - Augmentation du déplacement vertical du pieu de 15.62%
  - Diminution valeur du moment max du pieu 0.22%
  - Diminution du déplacement horizontal à l'interface de 22.17%
  - Augmentation du déplacement vertical à l'interface de 15.01%
  - Augmentation de la contrainte effective à l'interface de 6.93%
  
- **La diminution de la cohésion d'interface du sol de 50% de la cohésion initial conduit à une :**
  - Augmentation du déplacement horizontal du sol de 34.87%
  - Augmentation du déplacement vertical du sol de 24.11%
  - Diminution même contrainte total dans le sol 0.33%
  - Diminution du déplacement horizontal du pieu de 25.51%
  - Augmentation du déplacement vertical du pieu de 24.83%
  - Diminution valeur du moment max du pieu 0.16
  - Diminution du déplacement horizontal à l'interface de 29.87%
  - Augmentation du déplacement vertical à l'interface de 24.21%
  - Augmentation de la contrainte effective à l'interface de 9.01%

Les résultats obtenus pour l'influence de la variation de la cohésion d'interface du sol sont représentés sur le tableau IV.3 :

*Tableau IV.3 L'influence de la variation de la cohésion d'interface*

		C-10%	C+10%	C-30%	C+30%	C-50%	C+50%
<b>Déplacement horizontal du sol d'assise <math>10^{-3}</math> (m)</b>	Diminution		<b>5.38</b>		<b>15.38</b>		<b>24.49</b>
	Augmentation	<b>5.51</b>		<b>18.85</b>		<b>34.87</b>	
<b>Déplacement vertical du sol d'assise <math>10^{-3}</math> (m)</b>	Diminution		<b>4.97</b>		<b>14.52</b>		<b>24.66</b>
	Augmentation	<b>5.06</b>		<b>14.95</b>		<b>24.11</b>	
<b>Contrainte total du sol d'assise <math>10^3</math>(kN/m)</b>	Diminution	<b>0.17</b>		<b>0.17</b>		<b>0.33</b>	
	Augmentation		<b>0</b>		<b>0.17</b>		<b>0.33</b>
<b>Déplacement horizontal du pieu <math>10^{-3}</math> (m)</b>	Diminution	<b>5.64</b>		<b>15.99</b>		<b>25.51</b>	
	Augmentation		<b>9.93</b>		<b>40.49</b>		<b>42.00</b>
<b>Déplacement vertical du pieu <math>10^{-3}</math> (m)</b>	Diminution		<b>4.99</b>		<b>14.02</b>		<b>24.23</b>
	Augmentation	<b>5.67</b>		<b>15.62</b>		<b>24.83</b>	
<b>Moment de pieu (KN.m)</b>	Diminution	<b>0.16</b>		<b>0.22</b>		<b>0.08</b>	
	Augmentation		<b>0.03</b>		<b>0.24</b>		<b>0.22</b>
<b>Déplacement horizontal à l'interface <math>10^{-3}</math> (m)</b>	Diminution	<b>8.28</b>		<b>22.17</b>		<b>29.87</b>	
	Augmentation		<b>6.77</b>		<b>4.43</b>		<b>2.57</b>
<b>Déplacement vertical à l'interface <math>10^{-3}</math> (m)</b>	Diminution		<b>5.56</b>		<b>14.58</b>		<b>24.78</b>
	Augmentation	<b>5.28</b>		<b>15.01</b>		<b>24.21</b>	
<b>Contrainte effective à l'interface (KN/m<sup>2</sup>)</b>	Diminution		<b>0.11</b>		<b>1.01</b>		<b>4.73</b>
	Augmentation	<b>0.08</b>		<b>6.93</b>		<b>9.01</b>	

### IV.2.1.2 Interprétation des résultats

- On remarque que, l'augmentation de la cohésion d'interface induit l'augmentation du déplacement horizontal et du moment du pieu, et la diminution du déplacement vertical du pieu; Dans le cas contraire, la diminution de la cohésion d'interface induit la diminution du déplacement horizontal et du moment du pieu, et l'augmentation du déplacement vertical ;

- L'augmentation de la cohésion d'interface induit la diminution du déplacement horizontal et vertical du sol d'assise, mais elle n'influe pas sur la contrainte totale du sol.

Par contre, la diminution de la cohésion d'interface induit l'augmentation du déplacement horizontal et vertical du sol d'assise

- L'augmentation de la cohésion d'interface induit la diminution du déplacement vertical et de la contrainte effective à l'interface sol-pieu, et l'augmentation du déplacement horizontal ;

- La diminution de la cohésion d'interface induit l'augmentation du déplacement vertical et la diminution du déplacement horizontal à l'interface sol-pieu

### IV.2.2. Influence de l'angle de frottement d'interface

L'angle de frottement d'interface  $\varphi$  est prise égale à l'angle de frottement de la couche de sol (couche du sable) d'interface avec le pieu. Donc lorsqu'on fait varier cet angle de frottement d'interface revient à varier l'angle de frottement de la couche du sable. Pour l'étude paramétrique, on effectue les calculs suivants :

✓  $\varphi+5\%$  ;  $\varphi+10\%$  ;  $\varphi+20\%$  ;

✓  $\varphi-5\%$  ;  $\varphi-10\%$  ;  $\varphi-20\%$  ;

### II.2.2.1 Les résultats

#### a- Augmentation de l'angle de frottement de l'interface

Tableau IV.4 Résultats obtenues l'augmentation l'angle de frottement d'interface (PLAXIS 3D)

Déformations	Résultats de référence	Augmentation de l'angle de frottement d'interface : 5%	Augmentation de l'angle de frottement d'interface : 10%	Augmentation de l'angle de frottement d'interface : 20%
Déplacement horizontal du sol $10^{-3}$ (m)	7.80	7.74	7.70	7.55
Déplacement vertical du sol $10^{-3}$ (m)	167.67	166.18	165.26	161.14
Contrainte total du sol $.10^{-3}$ (KN/m)	5.99	5.99	5.99	5.99
Déplacement horizontal du pieu $10^{-3}$ (m)	0.1188	0.1267	0.1193	0.1638
Déplacement vertical du pieu $10^{-3}$ (m)	166.69	166.17	165.25	161.13
Moment de pieu (KN.m)	37.01	37.12	37.20	37.43
Déplacement horizontal d'interface $10^{-3}$ (m2)	0.857	0.874	0.918	0.675
Déplacement vertical d'interface $10^{-3}$ (m2)	166.78	165.29	164.37	159.32
Contrainte effective d'interface (KN/m2)	130.84	122.18	116.01	117.54

- L'augmentation de l'angle de frottement d'interface du sol de 5% de l'angle de frottement conduit à une :
  - Diminution du déplacement horizontal du sol de 0.77%
  - Diminution du déplacement vertical du sol de 0.89%
  - même contrainte total dans le sol
  - Augmentation du déplacement horizontal du pieu de 0.31%
  - Diminution du déplacement vertical du pieu de 6.65%
  - Augmentation valeur du moment max du pieu 0.30
  - Augmentation du déplacement horizontal à l'interface de 1.98%
  - Diminution du déplacement vertical à l'interface de 0.89%
  - Diminution de la contrainte effective à l'interface de 6.62%

- **L'augmentation de l'angle de frottement d'interface du sol de 10% de l'angle de frottement conduit à une :**
  - Diminution du déplacement horizontal du sol de 1.28%
  - Diminution du déplacement vertical du sol de 1.34%
  - D même contrainte total dans le sol
  - Augmentation du déplacement horizontal du pieu de 0.51%
  - Diminution du déplacement vertical du pieu de 0.42%
  - Augmentation valeur du moment max du pieu 0.51%
  - Augmentation du déplacement horizontal à l'interface de 7.12%
  - Diminution du déplacement vertical à l'interface de 1.45%
  - Diminution de la contrainte effective à l'interface de 11.33%
  
- **L'augmentation de l'angle de frottement d'interface du sol de 20% de l'angle de frottement conduit à une :**
  - Diminution du déplacement horizontal du sol de 3.02%
  - Diminution du déplacement vertical du sol de 3.89%
  - même contrainte total dans le sol
  - Augmentation du déplacement horizontal du pieu de 1.13%
  - Diminution du déplacement vertical du pieu de 37.88%
  - Augmentation valeur du moment max du pieu 1.13%
  - Augmentation du déplacement horizontal à l'interface de 21.24%
  - Diminution du déplacement vertical à l'interface de 4.47%
  - Diminution de la contrainte effective à l'interface de 10.17%

**b- Diminution de l'angle de frottement d'interface**

Tableau IV.5 Résultats obtenues pour la diminution de l'angle de frottement d'interface (PLAXIS 3D)

Déformations	Résultats de référence	Diminution l'angle de frottement d'interface : 5%	Diminution de l'angle de frottement d'interface : 10%	Diminution de l'angle de frottement d'interface : 20%
Déplacement horizontal du sol $10^{-3}$ (m)	7.80	7.86	7.93	8.09
Déplacement vertical du sol $10^{-3}$ (m)	167.67	168.68	169.50	171.00
Contrainte total du sol $10^3$ (KN/m)	5.99	5.99	5.99	5.99
Déplacement horizontal du pieu $10^{-3}$ (m)	0.1188	0.1113	0.0986	0.0880
Déplacement horizontal du pieu $10^{-3}$ (m)	166.69	168.67	169.49	170.99
Moment de pieu (KN.m)	37.01	36.93	36.98	36.86
Déplacement horizontal d'interface $10^{-3}$ (m <sup>2</sup> )	0.857	0.838	0.853	0.889
Déplacement vertical d'interface $10^{-3}$ (m <sup>2</sup> )	166.78	167.78	167.67	170.01
Contrainte effective d'interface (KN/m <sup>2</sup> )	130.84	137.42	144.60	159.44

- La diminution de l'angle de frottement d'interface du sol de 5% de l'angle de frottement initial conduit à une :
  - Augmentation du déplacement horizontal du sol de 0.77%
  - Augmentation du déplacement vertical du sol de 0.60%
  - Même contrainte total dans le sol
  - Diminution du déplacement horizontal du pieu de 6.31%
  - Augmentation du déplacement vertical du pieu de 1.19%
  - Diminution valeur du moment max du pieu 0.22%
  - Diminution du déplacement horizontal à l'interface de 2.22%
  - Augmentation du déplacement vertical à l'interface de 0.6%
  - Augmentation du déplacement effective à l'interface à 5.03%

- **La diminution de l'angle de frottement d'interface du sol de 10% de l'angle de frottement initial conduit à une :**
  - Augmentation du déplacement horizontal du sol de 1.67%
  - Augmentation du déplacement vertical du sol de 1.09%
  - Même contrainte total dans le sol 0
  - Diminution du déplacement horizontal du pieu de 17.00%
  - Augmentation du déplacement vertical du pieu de 1.68%
  - Diminution valeur du moment max du pieu 0.
  - Diminution du déplacement horizontal à l'interface de 0.47%
  - Augmentation du déplacement vertical à l'interface de 0.53%
  - Augmentation de la contrainte effective à l'interface de 10.52%
  
- **La diminution de l'angle de frottement d'interface du sol de 20% de l'angle de frottement initial conduit à une :**
  - Augmentation du déplacement horizontal du sol de 1.99%
  - Augmentation du déplacement vertical du sol de 1.99%
  - même contrainte total dans le sol
  - Diminution du déplacement horizontal du pieu de 25.93%
  - Augmentation du déplacement vertical du pieu de 2.58%
  - Diminution valeur du moment max du pieu 0.41
  - Diminution du déplacement horizontal à l'interface de 3.73%
  - Augmentation du déplacement vertical à l'interface de 1.94%
  - Augmentation de la contrainte effective à l'interface de 21.86%

Les résultats obtenus pour l'influence de la variation de l'angle de frottement du sol sont représentés sur le tableau IV.6.

*Tableau IV.6 L'influence de la variation de l'angle de frottement*

		$\frac{10\%}{\varphi-5}$	$\frac{5\%}{\varphi+}$	$\frac{10\%}{\varphi-}$	$\frac{10\%}{\varphi+}$	20%	20%
Déplacement horizontal du sol d'assise $10^{-3}$ (m)	Diminution		<b>0.77</b>		<b>1.28</b>		<b>3.02</b>
	Augmentation	<b>0.77</b>		<b>1.67</b>		<b>1.99</b>	
Déplacement vertical du sol d'assise $10^{-3}$ (m)	Diminution		<b>0.89</b>		<b>1.34</b>		<b>3.89</b>
	Augmentation	<b>0.60</b>		<b>1.09</b>		<b>1.99</b>	
Contrainte total du sol d'assise $10^3$ (kN/m)	Diminution	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	Augmentation						
Déplacement horizontal du pieu $10^{-3}$ (m)	Diminution	<b>6.31</b>		<b>17.00</b>		<b>25.93</b>	
	Augmentation		<b>0.31</b>		<b>0.51</b>		<b>1.13</b>
Déplacement vertical du pieu $10^{-3}$ (m)	Diminution		<b>6.65</b>		<b>0.42</b>		<b>37.88</b>
	Augmentation	<b>1.19</b>		<b>1.68</b>		<b>2.58</b>	
Moment de pieu (KN.m)	Diminution	<b>0.22</b>		<b>0.08</b>		<b>0.41</b>	
	Augmentation		<b>0.30</b>		<b>0.51</b>		<b>1.13</b>
Déplacement horizontal à l'interface $10^{-3}$ (m)	Diminution	<b>2.22</b>		<b>0.47</b>			
	Augmentation		<b>1.98</b>		<b>7.12</b>	<b>3.73</b>	<b>21.24</b>
Déplacement vertical à l'interface $10^{-3}$ (m)	Diminution		<b>0.89</b>		<b>1.45</b>		<b>4.47</b>
	Augmentation	<b>0.60</b>		<b>0.53</b>		<b>1.94</b>	
Contrainte effective à l'interface (KN/m <sup>2</sup> )	Diminution		<b>6.62</b>		<b>11.33</b>		<b>10.17</b>
	Augmentation	<b>5.03</b>		<b>10.52</b>		<b>21.86</b>	

### VI.2.2.2 Interprétation des résultats

- On remarque que l'augmentation de l'angle de frottement de l'interface induit l'augmentation du déplacement horizontal et du moment du pieu, et la diminution du déplacement vertical, la diminution de  $\varphi$  de 20% fait augmenter le déplacement vertical de 2.58%, et diminuer le déplacement horizontal et le moment du pieu.
- L'augmentation de l'angle de frottement induit la diminution de déplacement horizontal et vertical du sol d'assise, mais elle n'a aucun effet sur la contrainte totale du sol, par contre, la diminution de l'angle de frottement  $\varphi$  de l'interface induit l'augmentation du déplacement vertical et horizontal du sol d'assise.
- L'augmentation de l'angle de frottement de l'interface induit l'augmentation du déplacement horizontal à l'interface sol-pieu, et la diminution du déplacement vertical et la contrainte effective à l'interface sol-pieu, la diminution de  $\varphi$  de l'interface induit l'augmentation du déplacement verticale et la diminution du déplacement horizontale à l'interface sol-pieu

### IV.2.3 Influence de la rigidité de l'interface

La rigidité d'interface  $k$  est prise égale à la rigidité des deux couches du sol 1 et du sol 2 (couche d'argile et couche du sable), d'interface avec le pieu, donc lorsqu'on fait varier ces rigidités qui reviennent à varier la rigidité des deux couches (argile et sable), pour l'étude paramétrique on effectue les calculs suivants :

- ✓ **K+50% ; K+75% ; K+90% ;**
- ✓ **K-50% ; K-75% ; K-90% ;**

### IV.2.3.1 Les résultats

#### a- Augmentation de la rigidité de l'interface

Tableau IV.7 Résultats obtenues pour la diminution de l'angle de frottement d'interface (PLAXIS 3D)

Déformations	Résultats de référence	Augmentation de la rigidité d'interface : 50%	Augmentation de la rigidité d'interface : 75%	Augmentation de la rigidité d'interface : 90%
Déplacement horizontal du sol $10^{-3}$ (m)	7.80	7.92	7.96	7.95
Déplacement vertical du sol $10^{-3}$ (m)	167.67	172.77	174.13	174.52
Contrainte total du sol $.10^3$ (KN/m)	5.99	5.98	5.98	5.98
Déplacement horizontal du pieu $10^{-6}$ (m)	0.1188	0.2324	0.2583	0.2741
Déplacement vertical du pieu $10^{-3}$ (m)	166.69	172.76	174.12	174.51
Moment de pieu (KN.m)	37.01	36.59	36.39	36.29
Déplacement horizontal à l'interface $10^{-3}$ (m <sup>2</sup> )	0.857	0.400	0.357	0.366
Déplacement vertical à l'interface $10^{-3}$ (m <sup>2</sup> )	166.78	171.863	173.22	172.99
Contrainte effective à l'interface (KN/m <sup>2</sup> )	130.84	147.99	153.87	157.26

➤ **L'augmentation de la rigidité d'interface du sol de 50% de la rigidité initial conduit à une :**

- Diminution du déplacement horizontal du sol de 1.54%
- Diminution du déplacement vertical du sol de 3.04%
- Diminution de la contrainte total dans le sol 0.17%
- Diminution du déplacement horizontal du pieu de 95.62%
- Diminution du déplacement vertical du pieu de 3.64%
- Diminution valeur du moment max du pieu 1.13%
- Diminution du déplacement horizontal de l'interface de 53.3%
- Diminution du déplacement vertical de l'interface de 3.05%
- Augmentation de la contrainte effective de l'interface de 13.11%

➤ **L'augmentation de la rigidité d'interface du sol de 75% de la rigidité initial conduit à une :**

- Diminution du déplacement horizontal du sol de .05%
- Diminution du déplacement vertical du sol de 3.85%
- Diminution contrainte total dans le sol 0.17%
- Diminution du déplacement horizontal du pieu de 117.42%
- Diminution du déplacement vertical du pieu de 4.46%
- Diminution valeur du moment max du pieu 1.86%
- Diminution du déplacement horizontal de l'interface de 1.68%
- Diminution du déplacement vertical de l'interface de 3.86%
- Augmentation de la contrainte effective de l'interface de 17.00%

➤ **L'augmentation de la rigidité d'interface du sol de 90% de la rigidité initial conduit à une :**

- Diminution du déplacement horizontal du sol de 1.99%
- Diminution du déplacement vertical du sol de 1.99%
- Diminution contrainte total dans le sol 0.17%
- Diminution du déplacement horizontal du pieu de 25.93%
- Diminution du déplacement vertical du pieu de 2.58%
- Diminution valeur du moment max du pieu 0.41%
- Diminution du déplacement horizontal de l'interface de 3.73%
- Diminution du déplacement vertical de l'interface de 1.94%
- Augmentation de la contrainte effective de l'interface de 21.86%

Tableau IV.8 L'influence de la variation de l'angle de frottement

Déformations	Résultats de référence	Diminution de la rigidité d'interface : 50%	Diminution de la rigidité d'interface : 75%	Diminution de la rigidité d'interface : 90%
Déplacement horizontal du sol $10^{-3}$ (m)	7.80	7.86	7.93	8.09
Déplacement vertical du sol $10^{-3}$ (m)	167.67	168.68	169.50	171.00
Contrainte total du sol $10^3$ (KN/m)	5.99	6.00	6.01	6.03
Déplacement horizontal du pieu $10^{-3}$ (m)	0.1188	0.1113	0.0986	0.0880
Déplacement vertical du pieu $10^{-3}$ (m)	166.69	168.67	169.49	170.99
Moment de pieu (KN.m)	37.01	36.93	39.98	36.86
Déplacement horizontal d'interface $10^{-3}$ (m <sup>2</sup> )	0.857	0.660	1.091	3.92
Déplacement vertical d'interface $10^{-3}$ (m <sup>2</sup> )	166.78	154.01	137.29	128.14
Contrainte effective d'interface (KN/m <sup>2</sup> )	130.84	95.02	104.93	68.17

➤ **La diminution de la rigidité d'interface du sol de 50% de la rigidité initial conduit à une :**

- Augmentation du déplacement horizontal du sol de 0.77%
- Augmentation du déplacement vertical du sol de 0.60%
- Augmentation contrainte total dans le sol 0.17%
- Augmentation du déplacement horizontal du pieu de 6.31%
- Augmentation du déplacement vertical du pieu de 1.19%
- Augmentation valeur du moment max du pieu 0.22%
- Augmentation du déplacement horizontal de l'interface de 22.989%
- Augmentation du déplacement vertical de l'interface de 7.66%
- Diminution de la contrainte effective de l'interface de 27.68%

- **La diminution de la rigidité d'interface du sol de 75% de la rigidité initial conduit à une :**
  - Augmentation du déplacement horizontal du sol de 1.67%
  - Augmentation du déplacement vertical du sol de 1.09%
  - Diminution contrainte total dans le sol 0.33
  - Augmentation du déplacement horizontal du pieu de 17.00%
  - Augmentation du déplacement vertical du pieu de 1.68%
  - Augmentation valeur du moment max du pieu 8.02%
  - Augmentation du déplacement horizontal de l'interface de 27.30%
  - Augmentation du déplacement vertical de l'interface de 17.68%
  - Diminution de la contrainte effective de l'interface de 19.80%
  
- **La diminution de la rigidité d'interface du sol de 90% de la cohésion initial conduit à une :**
  - Diminution du déplacement horizontal du sol de 3.72%
  - Diminution du déplacement vertical du sol de 1.99%
  - Augmentation contrainte total dans le sol 0.67%
  - Diminution du déplacement horizontal du pieu de 25.93%
  - Diminution du déplacement vertical du pieu de 2.58%
  - Diminution valeur du moment max du pieu 0.41%
  - Diminution du déplacement horizontal de l'interface de 357.41%
  - Diminution du déplacement vertical de l'interface de 23.17%
  - Augmentation de la contrainte effective de l'interface de 47.90%

Tableau IV.9 L'influence de la variation de la rigidité interface

		Influen K-50%	de la var% K+50%	de la ríó K-75%	é interfa% K+75%	de pe K-90%	é trique K+90%
Déplacement horizontal du sol d'assise 10 <sup>-3</sup> (m)	Diminution		1.54		2.05		1.92
	Augmentation	0.77		1.67		3.72	
Déplacement vertical du sol d'assise 10 <sup>-3</sup> (m)	Diminution		3.04		3.85		4.09
	Augmentation	0.60		1.09		1.99	
Contrainte total du sol d'assise 10 <sup>3</sup> (kN/m)	Diminution		0.17		0.17		0.17
	Augmentation	0.17		0.33		0.67	
Déplacement horizontal du pieu10 <sup>-3</sup> (m)	Diminution		95.62		117.42		130.72
	Augmentation	6.31		17.00		25.93	
Déplacement vertical du pieu 10 <sup>-3</sup> (m)	Diminution		3.64		4.46		4.69
	Augmentation	1.19		1.68		2.58	
Moment de pieu (KN.m)	Diminution		1.13		1.68		1.95
	Augmentation	0.22		8.02		0.41	
Déplacement horizontal à l'interface 10 <sup>-3</sup> (m)	Diminution		53.33		58.34		57.29
	Augmentation	22.99		27.30		357.41	
Déplacement vertical à l'interface 10 <sup>-3</sup> (m)	Diminution		3.05		3.86		3.72
	Augmentation	7.66		17.68		23.17	
Contrainte effective à l'interface (KN/m <sup>2</sup> )	Diminution	27.38		19.80		47.90	
	Augmentation		13.11		17.00		20.19

#### IV.2.3.2 Interprétation des résultats

- L'augmentation de la rigidité d'interface conduit à la diminution du déplacement horizontal et vertical ainsi que le moment du pieu.
- Par contre, la diminution de la rigidité provoque l'augmentation des déplacements et des moments du pieu.
- La variation de la rigidité d'interface conduit à une très faible variation des déplacements et des contraintes totales du sol d'assise.
- L'augmentation de la rigidité d'interface conduit à une diminution du déplacement vertical et horizontal l'interface sol-pieu

## **IV. Conclusion**

L'étude paramétrique permet de mettre en évidence l'influence des paramètres d'interface sol-pieu sur le pieu.

- L'angle de frottement et la cohésion agissant de la même manière sur le pieu, le sol d'assise et à l'interface sol-pieu.
- Par contre la rigidité d'interface agit de la manière contraire.

## **Conclusion générale**

Nous avons présenté dans ce mémoire un travail de recherche théorique et numérique sur le comportement des interfaces et celui d'un pieu isolé sous chargement statique axial. Il s'agit d'un problème aux limites de l'interaction sol-pieu où l'interface joue un rôle essentiel.

Actuellement, l'analyse numérique des projets géotechniques est possible grâce de nombreux codes de calcul lesquels on peut citer PLAXIS 3D FONDATION, qui nous a permis d'effectuer une modélisation de l'interaction sol-pieu afin de simuler le comportement de pieu et du sol dans leur interaction.

Les résultats obtenues sont comme suit

Le comportement d'un pieu soumis à un chargement statique est influencé par les caractéristiques mécaniques de l'interface (la cohésion, angle de frottement, la rigidité).

- Le déplacement vertical de pieu est supérieur au déplacement horizontal, le pieu travaille donc en enfoncement.
- Le déplacement vertical du sol est presque égal à celui du pieu c.-à-d. que le sol et le pieu ont la même vitesse de déplacement, l'effet de frottement négatif et négligeable.
- Apparition d'un moment sur toute la longueur du pieu avec moment nul au niveau d'ancrage ; ce qui justifier par la rigidité du pieu.

L'étude paramétrique a mis en évidence l'influence importante des paramètres de modélisation (la cohésion, l'angle de frottement d'interface et la rigidité d'interface) à montrer que l'angle de frottement d'interface et la cohésion d'interface agit de la même manière sur le pieu, par contre la rigidité d'interface agit contrairement.

## ***Références bibliographiques :***

[1] **Plumelle. (2003)**, «Fondations profondes, Chapitre18», Cnam-Paris-Géotechnique.

[2] **FASCICULE N°62-Titre V. 1993**. Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de Génie Civil. Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux, Ministère de l'Equipement, du Logement et des Transports.

[3] **HERMIME Tassidit, 2012**, Etude d'interaction des sols de fondation avec les ouvrages portuaires utilisant les pieux, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

[4] **EPF Lausanne. (2000)**, « Classification des pieux », Travaux de Fondation, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne.

[5]**CHEKROUN Lokmane, 2012**, Contribution à l'étude d'interaction sol-structure, exemple pieux, université Aboubakar Belkaid.

[6] **Franck. R. (1999)**, « Calcul des fondations superficielles et profondes, techniques de L'ingénieur». Presse de l'école nationale des ponts et chaussée.

[7]**AYEB Nafaa, 2015**, Etude d'un pieu sous le chargement vertical en 3D, Enstp- Alger.

[8]**Génard Degoutre & Royet.P, 2005**, Aide-mémoire de mécanique des sol, le publication de L'ENGEREF.

[9] **TSTP. (2008)**, « Techniciens Supérieurs Travaux Publics ».

[11]**SAID Imen. 2006**. Comportement des interfaces et modélisation des pieux sous charge axiale, thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Des ponts et Chaussées.

[12]**RADOUANE Mohamed Lakhder, 2012**, Etude numérique d'interaction sol-pieu, université Mohamed khider-Bisikra

[13]**PLAXIS 3D FOUNDATION**. Manuel d'utilisation.

## Annexes

### Annexe A : Présentation du code de calcul Plaxis 3D



#### 1. Introduction


PLAXIS 3D Foundation est un code de calcul tridimensionnel, dédié à l'analyse en trois dimensions des déformations de projets de fondation. Le développement de PLAXIS a commencé en 1987 à l'université de Delft de la technologie comme initiative du ministère hollandais de Travaux publics et gestion de l'eau (Rijkswaterstaat). L'objectif était de développer un code de calcul 2D facile à utiliser et initié pour analyser les digues en sols mous (argileux), a vu son champ d'application se développer largement afin de pouvoir traiter différents types de problèmes géotechniques.



Le code de calcul Plaxis 3D permet d'analyser des problèmes élastiques, élastoplastiques, élasto-viscoplastiques en 3D par la méthode lagrangienne actualisée. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire).


#### 2. L'input Des Données




Un résumé des fonctions essentielles est donné ci-dessous (Brinkgreve,R.B.J,2004).

-  **Définition graphique de la géométrie du modèle :** Celle-ci se fait à partir de la vue en plan du projet. La définition des couches de sol, des ouvrages, des phases de construction, des chargements et des conditions aux limites s'appuie sur des procédures graphiques conviviales, ce qui permet une modélisation détaillée et précise de la géométrie .Le maillage d'éléments finis 3D est généré à partir de ce modèle géométrique.
-  **Sondages :** Les couches de sol sont définies par l'intermédiaire de sondages. Plusieurs sondages peuvent être implantés pour un projet, permettant ainsi de décrire des couches non horizontales (stratigraphie complexes),ou un terrain naturel en pente. Plaxis interpole automatiquement la position de chaque couche et du terrain naturel entre les différents sondages définis.

- 
**Plans de travail** : Les éléments de structure sont définis dans les plans de travail horizontaux. En définissant plusieurs plans de travail, il est possible de modéliser des fondations complexes, des sous-sol à plusieurs niveaux, ou encore des parties significatives de la superstructure.

- 

**Génération automatique du maillage** : Plaxis offre une génération automatique du maillage non structurés d'éléments finis 2D à partir de la vue en plan du modèle .Ce mailleur automatique est une version particulière du « Triangle Generator ».Plusieurs options permettent d'affiner le maillage, globalement ou localement. Le maillage 3D est généré à partir du maillage 2D, en tenant compte de la stratigraphie (sondages) et des éléments de structure (plan de travail)

- 
**Planchers « Floor »** : Des éléments « Plaques » peuvent être utilisées pour représenter des fondations superficielles, radiers, parois et planchers, ou d'autres éléments de structure. Le comportement de ces éléments est défini par des propriétés élastiques de raideur ou des courbes de déformation non-linéaires.

- 


**Chargement** : Plaxis 3D permet de définir plusieurs types de chargements : Charges ponctuelles, linéaires réparties. Chaque charge peut être activée/désactivée individuellement dans les différentes phases de calcul.

### 3. Lois de comportement du sol



**Base de données des matériaux** : Les propriétés des matériaux sont regroupées dans une base de données du projet. Toutes les données figurant dans les bases de données de différents projets peuvent être partagées via une base de données globale.

L'utilisateur peut définir le comportement du sol selon les modèles existants dans le code de calcul Plaxis : Elasticité linéaire ; Mohr-Couloumb ; le Hardening Soil Model (modèle hyperbolique en élasto-plasticité) pour les sols rigides, comme les argiles surconsolidées et les sables ; le Soft Soil Creep Model (modèle de type Cam-Clay) pour l'analyse du comportement des sols compressibles normalement consolidés. En plus, Plaxis inclut un modèle pour l'analyse des roches en comportement anisotrope : le Jointed Rock model.

L'utilisateur a la possibilité de définir ses propres lois de comportement. Cette option, particulièrement utile en premier lieu pour les chercheurs, peut également se prouver intéressante dans les milieux professionnels.

#### 4. Fonctions de calcul



Le programme de calcul permet de conduire des analyses en déformation menées par un calcul plastique, un calcul de consolidation ou un calcul en grandes déformations. Pour chaque projet, plusieurs phases de calcul peuvent être définies avant de lancer le calcul.

- **Incrémentation automatique du pas de charge** : Plaxis 3D Foundation peut être lancé en mode de sélection automatique du pas de chargement. Ceci évite à l'utilisateur d'avoir à choisir par lui-même les pas de chargement adaptés au calcul plastique incrémental, tout en garantissant une procédure de calcul fiable et efficace.
- **Construction par étapes** : Il est possible de simuler les phases de construction ou d'excavation, par activation/désactivation de Groupes d'éléments, application de chargements ou changement des conditions hydrauliques. Cette procédure permet une estimation réaliste des contraintes et déplacements provoqués par exemple par la construction et le chargement d'une fondation.
- **Contrôle de la longueur des arcs** : Cette fonction permet un calcul correct des charges et mécanismes de rupture. En effet, dans les calculs traditionnels où le chargement est imposé, la procédure itérative échoue dès que la charge imposée dépasse la valeur de pic. Avec le contrôle de longueur des arcs, il n'en est rien et la charge appliquée est automatiquement réduite pour pouvoir examiner le phénomène de pic ainsi que toute évolution éventuelle après ce pic.
- **Gestionnaire de calculs** : Dans Gestionnaire de calculs, plusieurs projets peuvent être sélectionnés pour un calcul retardé. Cette option permet une utilisation optimale de l'ordinateur en arrière-plan, et est utile dans le cas d'études paramétriques.



- **Aperçu** : cette option permet de visualiser le modèle 3D et de vérifier le phasage défini. Les calculs 3D étant parfois très longs, il est important de bien vérifier les hypothèses définies avant le lancement des calculs.



- **Choix des points pour la représentation graphique** : Cette option permet à l'utilisateur de choisir les points de déformation ou de contrainte, ce choix doit être fait avant le début de l'exécution du modèle afin de visualiser l'évolution des déformations et des contraintes des points choisis. L'utilisateur peut choisir jusqu'à 10 points différents.

## 5. Analyse de résultats

Le post-processeur Plaxis a des fonctions graphiques 3D avancées pour restituer les résultats du calcul. Les valeurs précises des déplacements, forces et contraintes sont accessibles dans les tableaux de résultats. Les graphiques en couleurs et les tableaux peuvent être envoyés directement sur n'importe quel périphérique, imprimante ou traceur, reconnu par Windows ou copiés dans le presse-papier de Windows.

- **Déformations** : La visualisation des déformations peut se faire sous la forme de maillage déformé, de déplacements ou déformations totaux ou incrémentaux. Tous les graphiques de déplacement ou de déformation peuvent être présentés avec flèches, lignes isovaleurs ou domaine isovaleurs.
- **Contraintes** : La restitution des contraintes peut se faire en contraintes effectives ou totales, en pressions ou surpression interstitielles. Ces contraintes peuvent être présentées en lignes isovaleur comme en domaine isovaleur.
- **Géométrie partielle** : Pour améliorer la visualisation interne du modèle 3D, des éléments peuvent être rendus transparents.
- **Visualisation** : Par défaut, le modèle 3D dans le module Output est représenté en perspective, et peut être orienté grâce aux flèches du clavier. Dans les plans de travail, le plan x-y peut être affiché, on note aussi qu'il est possible de définir des coupes.



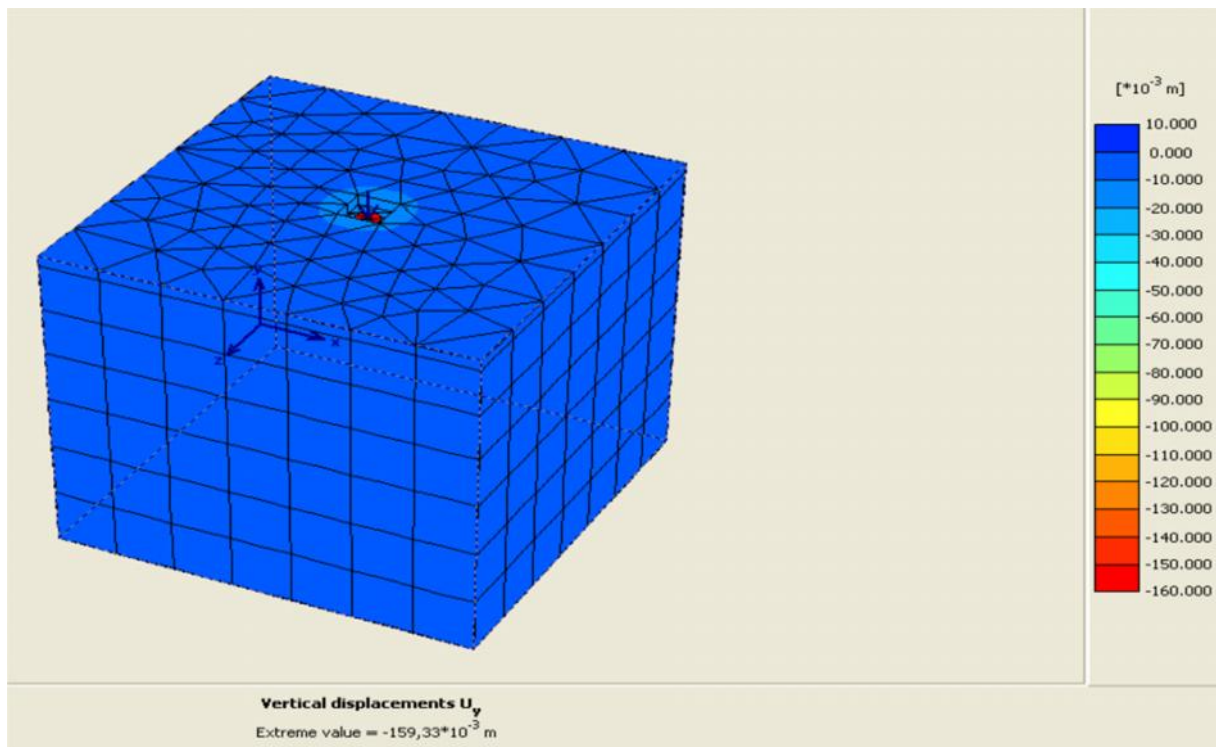
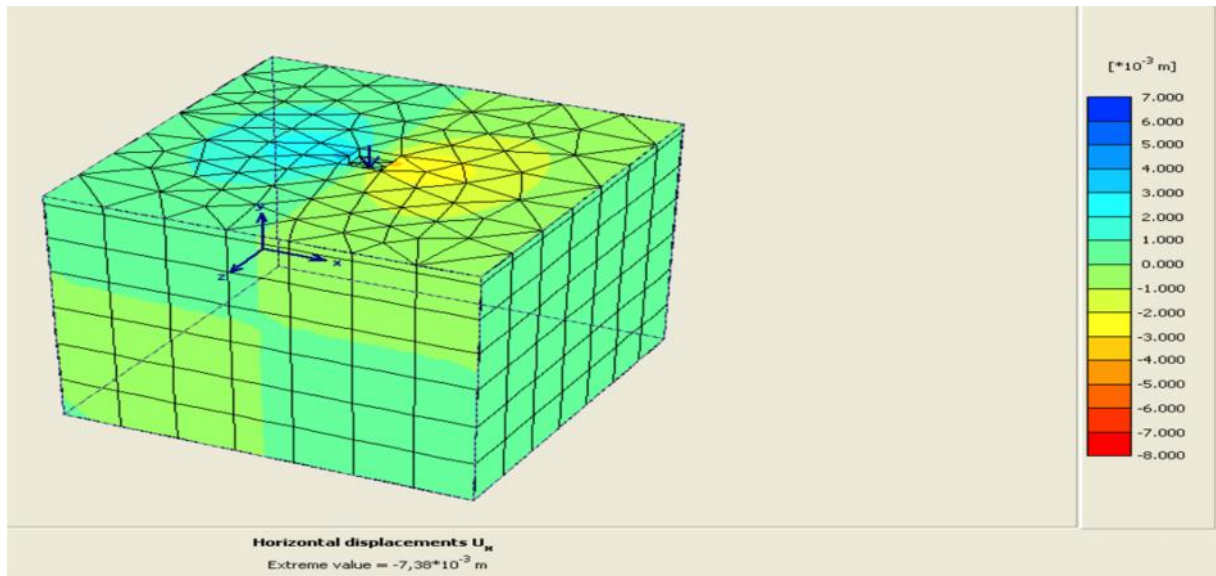
- **Courbes « Curve »** : Cette option permet la représentation des courbes charge-déplacement, les chemins de contrainte, les courbes effort-déformation, ou encore l'évolution de tassement avec le temps.

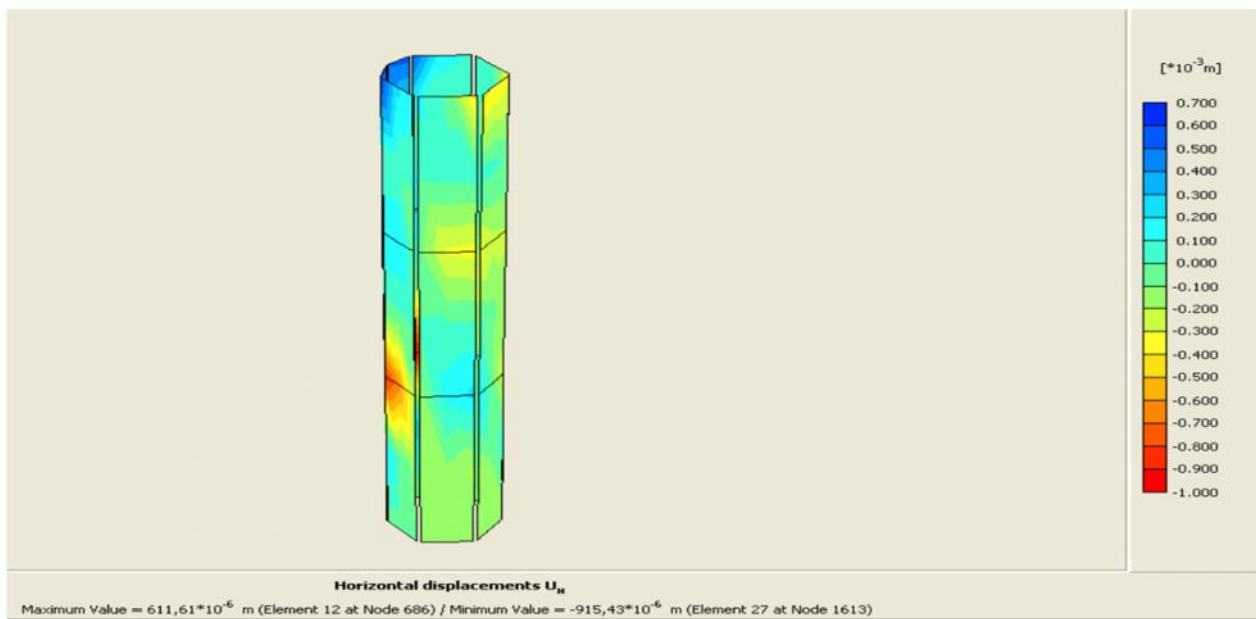
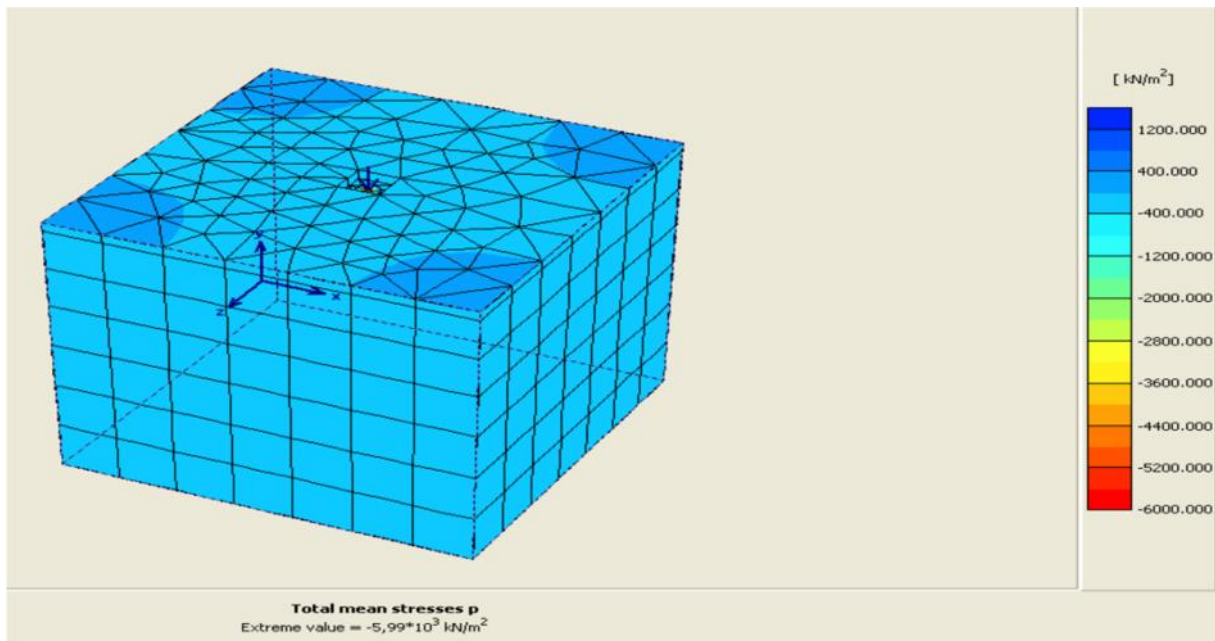


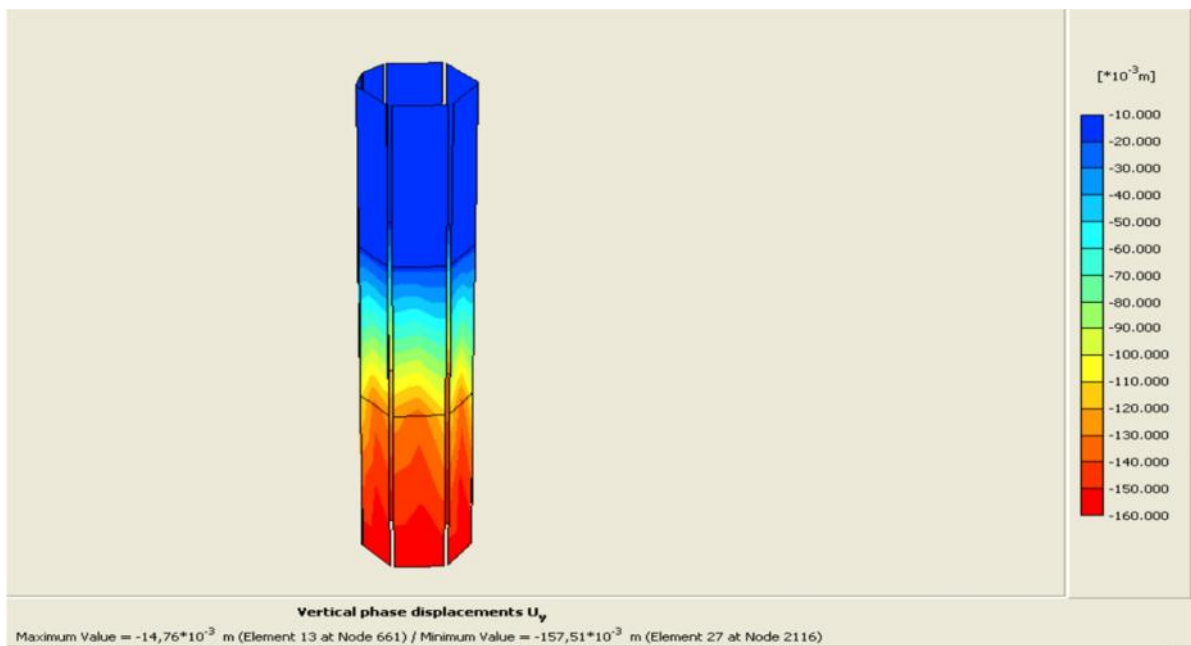
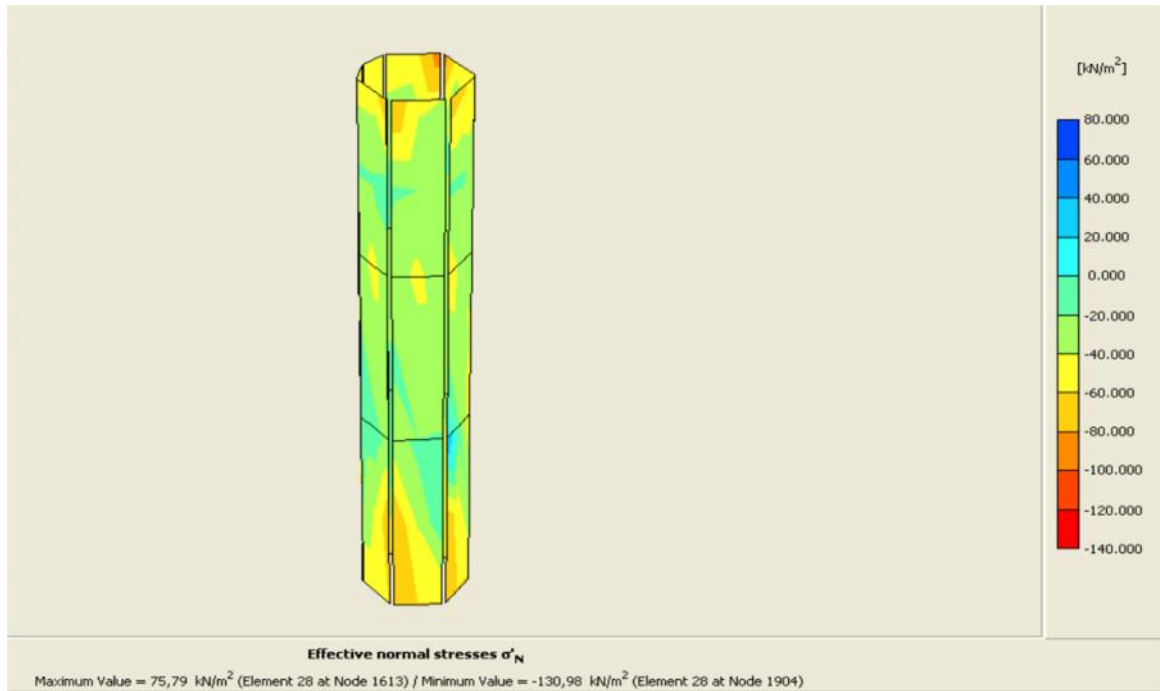
- **Coupe « Cross Section »** : Cette option très pratique est offerte par Plaxis pour créer des graphiques des sollicitations ou des déplacements selon des coupes sélectionnées dans le modèle.

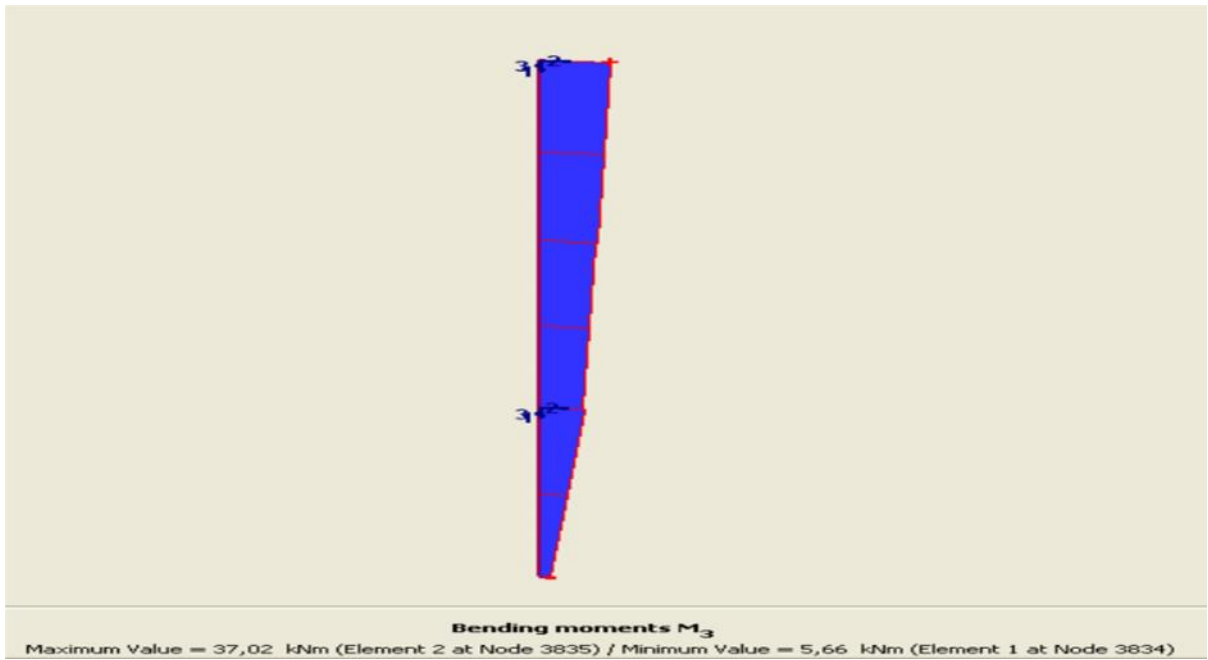
## Annexe B : Présentation quelques du code de calcul Plaxis 3D

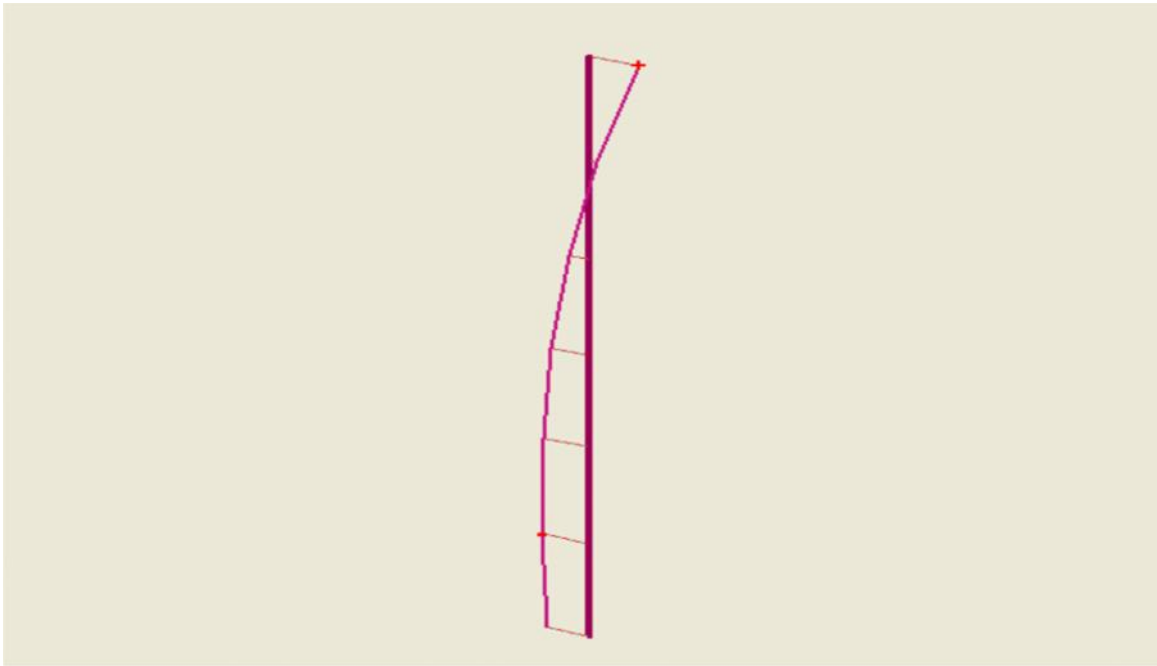
### Résultats augmentation cohésion interface 10%





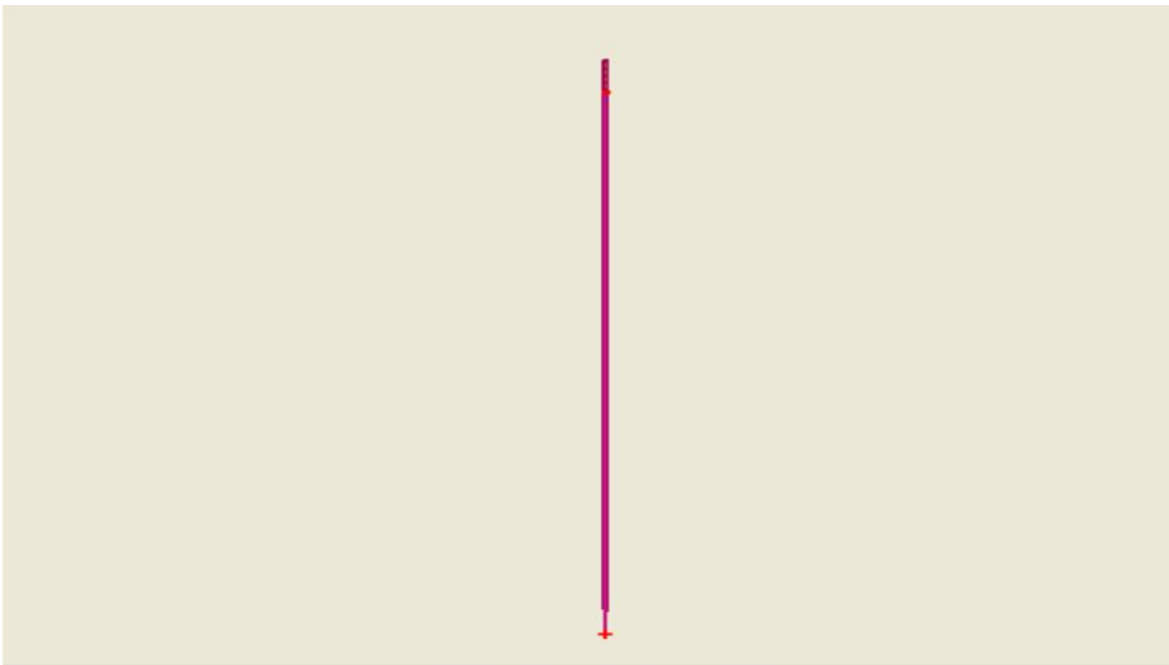






**Horizontal phase displacements  $U_x$**

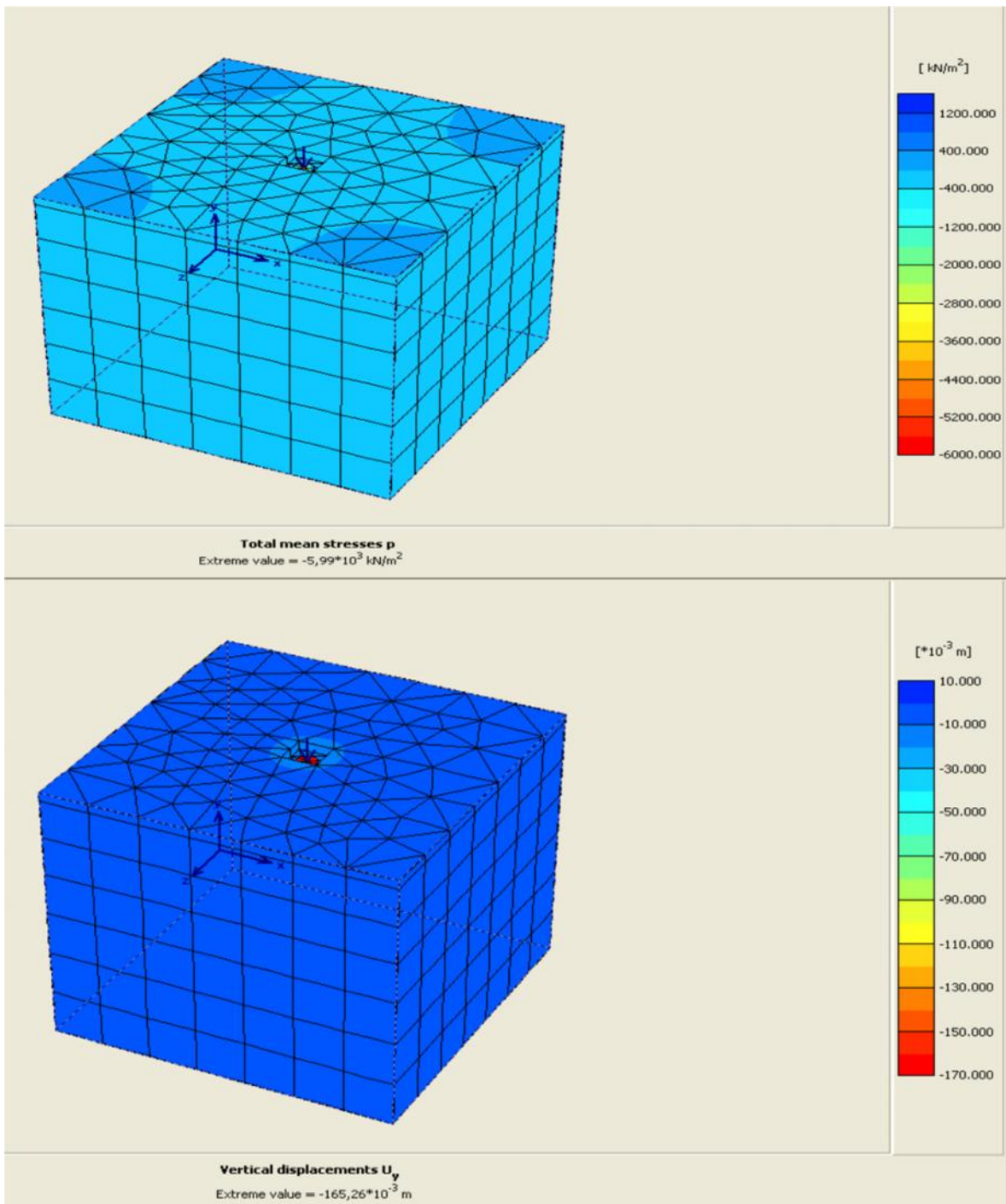
Maximum Value =  $125,28 \cdot 10^{-6}$  m (Element 2 at Node 3835) / Minimum Value =  $-131,57 \cdot 10^{-6}$  m (Element 1 at Node 3833)

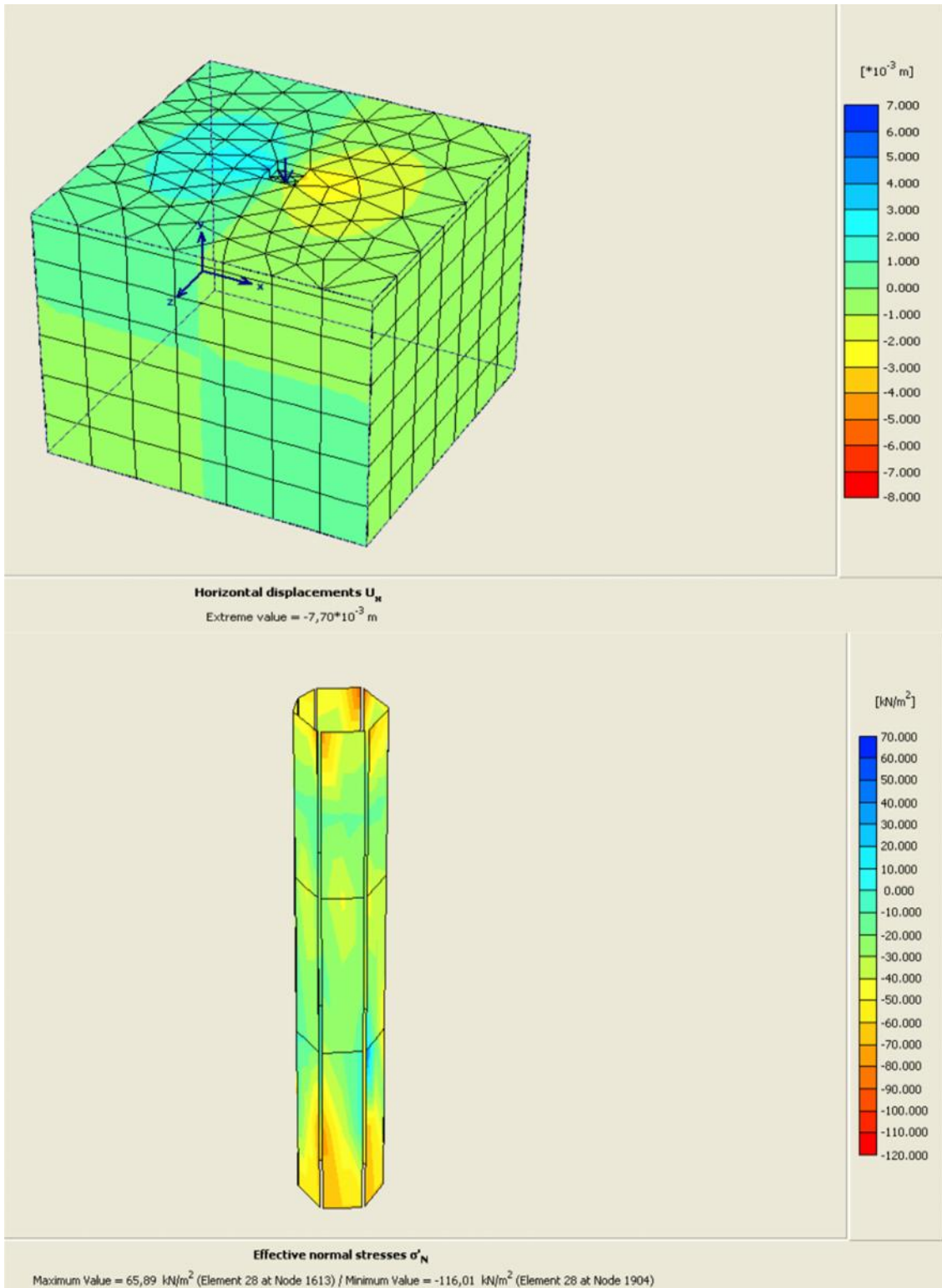


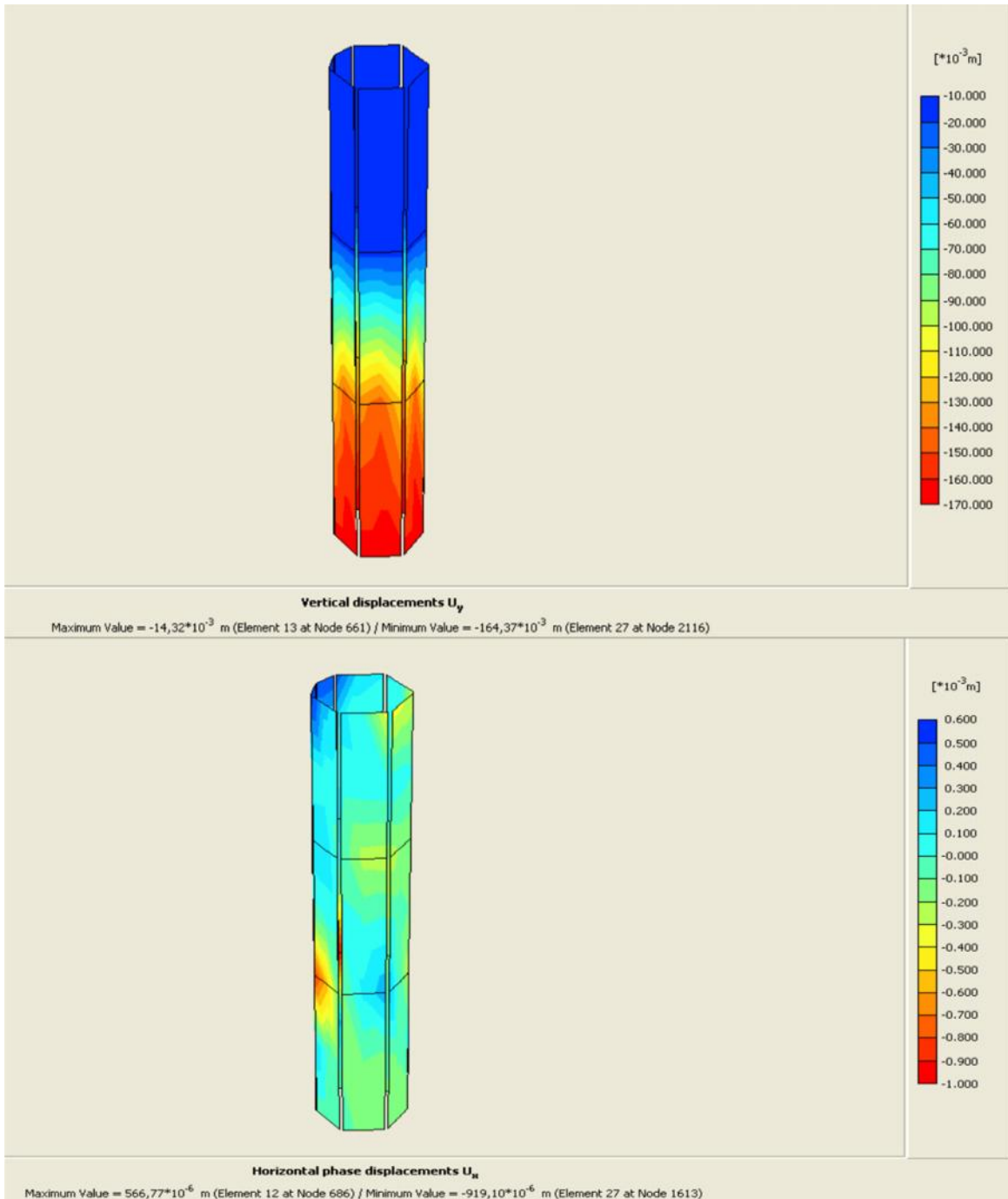
**Vertical phase displacements  $U_y$**

Maximum Value =  $-157,42 \cdot 10^{-3}$  m (Element 1 at Node 3834) / Minimum Value =  $-158,38 \cdot 10^{-3}$  m (Element 2 at Node 3835)

## Résultats augmentation de l'angle de frottement 10%





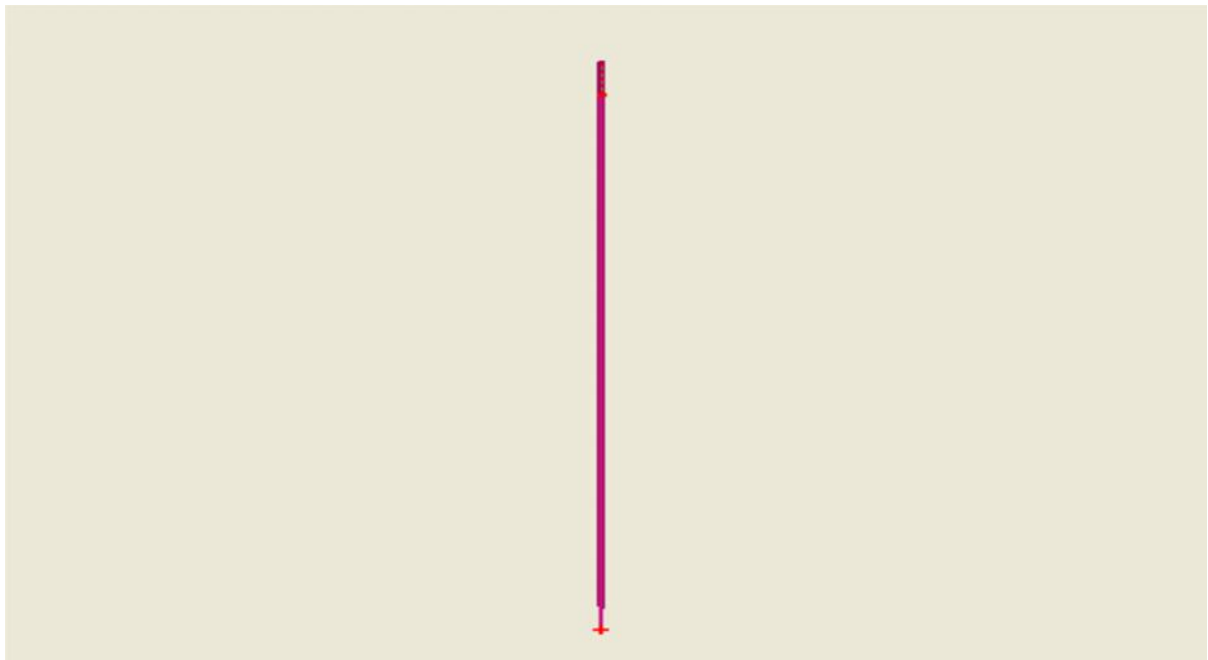


**Horizontal displacements  $U_x$** 

Maximum Value =  $133,99 \cdot 10^{-6}$  m (Element 2 at Node 3835) / Minimum Value =  $-119,34 \cdot 10^{-6}$  m (Element 1 at Node 3833)

**Bending moments  $M_3$** 

Maximum Value = 37,20 kNm (Element 2 at Node 3835) / Minimum Value = 5,33 kNm (Element 1 at Node 3834)



**Vertical displacements  $U_y$**

Maximum Value =  $-164,28 \cdot 10^{-3}$  m (Element 1 at Node 3834) / Minimum Value =  $-165,25 \cdot 10^{-3}$  m (Element 2 at Node 3835)