

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil



MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Géotechnique

**ANALYSE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT D'UN PIEU
ISOLE SOUS UN CHARGEMENT COMBINE AINSI QUE DE L'EFFET DE
L'ENCASTREMENT**

Présenté par :

Mlle. Chamma Fatma Zohra

Mlle. Kadouri Ilhem

Encadré par :

M. Arezki Salem

Pr. Bouafia Ali

2020/2021

TABLE DE MATIERS

ملخص

RESUME

ABSTRACT

REMERCIEMENTS

Dédicace

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRPHIQUE D'UN PIEU CHARGE LATERALEMENT

.

1. Généralités sur les pieux.....	2
1.1.Définitions et justification des fondations profondes.....	2
1.2.Historique sur les pieux	3
1.3.Le mode de fonctionnement des pieux.....	4
1.3.1.Pieu isolé.....	4
1.4. Les modes d'installations des pieux.....	5
1.5.Classification des pieux	9
1.6. Choix de fondation sur pieux.....	10
2. Les Méthodes de calcul d'un pieu chargé horizontalement	12
2.1. Introduction	12
2.2. Les Méthodes théoriques.....	12
2.2.1. Méthode de Blum (1932).....	12
2.2.2. Méthode de Brinch-Hansen (1961)	13

2.3. Méthodes Semi-Empiriques.....	15
2.3.1. Méthode de Broms.....	15
2.3.1.1. Équations pour le calcul de <i>Hult</i> par la méthode de Broms	15
2.3.1.1.1. Les sols cohérents.....	15
2.3.1.1.2. Les sols pulvérulents.....	17
2.3.2 Méthode de Prasad et Chari (1999).....	19
2.4. Les Méthodes Empiriques.....	20
2.4.1 Méthode de Ménard (1962).....	20
3. Méthodes de modules de réaction.....	23
3.1.Introduction.....	23
3.2.Développement des courbes de réaction (P-y).....	24
3. Conclusion.....	26

CHAPITRE 2 : DEVELOPPEMENT D'UN PROGRAMME DE CALCUL D'UN PIEU ISOLE SOUS CHARGEMENT LATERAL.

1. Introduction.....	28
2. Hypothèses de calculs.....	29
2.1. Propriétés de la fonction parabole-rectangle.....	29
2.1.1. Charge critique.....	29
2.1.2. Rigidité sécante et tangente.....	30
2.1.3. Fonction impaire.....	30
2.1.4. Nombre des points expérimentaux N.....	31
3. Méthode de calcul.....	34
4. Programme SPULL-PARECT.....	40
4.1. Introduction.....	40
4.2. Organigramme de calcul de SPULL-PARECT	46
5. Procédé de calcul par SPULL MS-DOS.....	47
6. Validation de SPULL-PARECT version Windows.....	49

7. Comparaison des résultats	56
8. Conclusion.....	58

CHAPITRE 3: DEVELOPPEMENT D'UN PROGRAMME DE CALCUL D'UN PIEU ISOLE SOUS CHARGEMENT COMBINE.

1. Introduction.....	60
2. Développement des équations de base	61
3. Mise au point du programme de calcul de pieu sous chargement combine “L-PULAL”	64
3.1. Etapes de calcul.....	65
3.2. Organigramme de calcul.....	66
4. Validation de programme L-PULAL.....	76
4.2. Introduction du chargement.....	67
4.3. Affichage des résultats dans L-PULAL.....	68
4.4. Calcul manuel de déplacement $u(x)$	71
5. Etude de l'effet du chargement verticale sur les déplacements horizontaux.....	73
5.1. Etude paramétrique sur l'effet du chargement combiné.....	73
5.1.1 Etude paramétrique de l'influence de l'effort vertical N	73
5.1.2. Étude paramétrique de l'influence du module de réaction E_{s0} du pieu.....	74
5.1.3. Étude paramétrique de l'influence de la fiche D du pieu.....	75
5.1.4. Étude paramétrique de déplacement en tête du pieu	75
6. Conclusion.....	77

CHAPITRE 4 : ETUDE DE L'EFFET DE L'ENCASTREMENT EN TETE SUR UN PIEU CHARGE LATERALEMENT.

1. Introduction.....	79
----------------------	----

2. Étude de l'effet de l'encastrement en tête d'un pieu isolé chargé latéralement.....	80
3. Etude de l'effet de l'encastrement en tête d'un pieu isolé chargé latéralement à partir d'une étude paramétrique.....	83
3.1. Etude paramétrique de l'influence de l'effort latérale H.....	83
3.2. Étude paramétrique de l'influence de la rigidité flexionnelle $E_p I_p$ du pieu.....	87
3.3. . Étude paramétrique de l'influence de la fiche D du pieu.....	90
4. Conclusion.....	95

ملخص

غالبا ما تكون القواعد المرتكزة على أوتاد خاضعة لقوى أفقية ناشئة عن الأعمال الإنشائية أو البيئة المحيطة بالنظام تربة -قاعدة. يوجد الكثير من الطرق لحساب الأوتاد من أجل تحديد سعة الإزاحة الأفقية والدوران الرأسي للوتد وكذلك قوى التثني على طول الوتد.

تعتمد طرق الحسابات على مفهوم وحدة التفاعل الجانبي. لقد عرفت هذه الأساليب خلال هذه العقود الماضية ازدهارًا كبيرًا في جميع أنحاء العالم بسبب مرونتها التي يجب أن تأخذ في الاعتبار كلا من اللاخطية لسلوك علاقة النظام التربة/الوتد وعدم تجانس خصائص التربة. ثم نصل بعد ذلك إلى تطوير هام للبرنامج استنادًا إلى منحنيات التي تم تكييفها أيضًا مع حساب الأوتاد باعتبارها دعمًا للشاشات اللينة.

يقترح هذا العمل تحليل سلوك وتد معزول تحت الحمل المشترك (القوة الرأسية والقوة الأفقية ولحظة الانحناء) من ناحية، من خلال تطوير برنامج فورتران، ومن ناحية أخرى دراسة سلوك وتد تحت شرطان مختلفان للحدود: الرأس الحر والرأس المثبت، من أجل تحليل تأثير التثبيت على الإزاحة والقوى (قوة القص ولحظة الانحناء) على طول الوتد. في الجزء الأول أخذنا المبادرة لتذكر بعض المفاهيم الأساسية حول الأوتاد. في الجزء الثاني قمنا بتطوير برنامج فورتران يقوم بحساب الإزاحة الأفقية من خلال نقل إصدار "DOS" ، من "SPULL PARECT" ، إلى إصدار "WINDOWS" ، باستخدام " Vb.net " ، في الجزء الثالث درسنا سلوك وتد معزول تحت الحمل المشترك. الجزء الرابع يهتم بدراسة تأثير التثبيت على رأس وتد محمل بشكل جانبي. أخيرًا، خاتمة عامة تقدم توصيات عملية وتلخص اهتمامات الدراسة.

كلمات مفتاحية: وتد، تحميل أفقي، إزاحة، تثبيت، العناصر المنتهية، اختبار التحميل الأفقي.

RESUME

Une fondation sur pieux est couramment soumise à des efforts provenant de l'ouvrage ou de l'environnement entourant le système sol-fondation. Il existe une diversité de méthodes de calcul du pieu en vue de déterminer l'amplitude de déplacement horizontal et de la rotation, et des efforts de flexion le long du pieu.

Les méthodes de calcul à la base du module de réaction latérale, ont connu ces dernières décennies un épanouissement mondiale considérable à cause de leur flexibilité permettant de tenir compte d'une part de la non linéarité du comportement du système sol/pieu et de la non homogénéité des propriétés du sol d'autre part. On assiste ainsi à un développement important des logiciels basés sur les courbes P-y, adaptés aussi bien au calcul des pieux qu'aux écrans souples de soutènement.

Ce travail se propose d'analyser d'une part le comportement d'un pieu isolé sous un chargement combiné (force verticale, force horizontale et moment de flexion) en développant un programme en Fortran, et d'autre part il étudie le comportement d'un pieu sous deux conditions aux limites différents : tête libre et tête encastree, en vue d'analyser l'effet de l'encastrement sur les déplacements et les efforts (effort tranchant et moment de flexion) le long du pieu. En première partie nous avons pris l'initiative de rappelés quelques notions de bases concernant les pieux. En seconde partie nous avons développé un programme en Fortran qui calcul les déplacements horizontaux à partir de la transposition de la version DOS de SPULL-PARECT a une version Windows en utilisant Vb net. En troisième partie nous avons étudié le comportement d'un pieu isolé sous un chargement combiné. La quatrième partie s'intéresse à l'étude de l'effet d'un encastrement en tête d'un pieu chargé latéralement. Enfin une conclusion générale qui présente des recommandations pratiques et résume les intérêts de l'étude.

Mots clé: Pieu, Chargement horizontal, Déplacement, Encastrement, Eléments finis, Essai de chargement horizontal.

ABSTRACT

A piled foundation is usually subjected to horizontal efforts coming from the structure or environment surrounding the soil-foundation system. There are several methods of calculation of the pile in order to determine the amplitude of lateral displacement and rotation at pile head and bending force along the pile.

The calculations methods based on the concept of the lateral's reaction module. These methods have known during these last decades a world-wide considerable bloom because of their flexibility which to take count both of the non-linearity of the behavior of the system relation soil/pile and the non-homogeneity of the ground's properties. We, then get to an important development of the software based on the P-y curves adapted as well to the pile calculations as the sustain of the soft screens.

This work proposes to analyze on the one hand the behavior of an isolated pile under a combined loading (vertical force, horizontal force and bending moment) by developing a program in Fortran, and on the other hand it study the behavior of 'a pile under two different boundary conditions: free head and embedded head, in order to analyze the effect of embedding on displacements and forces (shear force and bending moment) along the pile. In the first part, we took the initiative to recall some basic notions about piles. In the second part we developed a program in Fortran which calculates the horizontal displacements from the transposition of the DOS version of SPULL-PARECT to a Windows version using Vb net. In the third part we studied the behavior of a pile isolated under a combined load. The fourth part is concerned with the study of the effect of embedding at the head of a laterally loaded pile. Finally, a general conclusion which presents practical recommendations and summarizes the interests of the study.

Key-word: Pile, Horizontal loading, displacement, Embedding, Finite elements, Horizontal loading test.

Remerciement

Nous adressons nos remerciements à nos encadreurs Monsieur **Salem Arezki** et le Professeur **Ali Bouafia** qui nous ont fait l'honneur d'accepter de diriger ce travail, leurs soutiens, leurs compétences ont été une aide inestimable

Par ailleurs nous remercions les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail

Nous tenons à remercier également tous les enseignants de la spécialité géotechnique

Nos remerciements les plus chaleureux à nos chères parents, nos familles, et tous nos camarades de la promo géotechnique 2020/2021

Dédicace

Nous dédions ce mémoire

A nos parents pour leurs amours inestimables, leurs sacrifices, leur confiance, leur soutien

A nos familles pour tous leurs précieux encouragements

A nos camarades de l'université de Blida 1 filière de génie civil, spécialité géotechnique

A toutes les personnes qu'on a perdues, ils restent toujours dans nos mémoires

Liste des figures

Figure 1.1 : Les principaux types de fondations.....	2
Figure 1.2: Mode de travail d'un pieu.....	3
Figure 1.3: Définition de la hauteur d'encastrement	3
Figure 1.4 (a): La première mise en œuvre des pieux bois dans le sol.....	4
Figure 1.4 (b): Des pieux préservés de 3600ans d'âge.....	4
Figure 1.5: Le fonctionnement des pieux.....	5
Figure 1.6: Les deux (02) types de pieux selon l'effet de l'installation	5
Figure 1.7: Schéma du procédé d'installation d'un pieu battu moulé.....	6
Figure 1.8: Schéma du procédé d'installation d'un pieu foré à la boue.....	7
Figure 1.9: Schéma du procédé d'un pieu foré tubé.....	7
Figure 1.10 : Schéma du procédé d'installation d'un pieu foré à terrière creuse.....	8
Figure 1.11: Classification des pieux selon EPF Lausanne (Travaux de Fondation, 2000).....	10
Figure 1.12: Mécanismes de rupture selon Blum.....	13
Figure 1.13: Modèle de calcul de pieu rigide libre et fixe en tête (d'après Brinch Hansen 1961)	13
Figure 1.14: Les coefficients K_q et K_c selon Brinch Hansen (1961)	14
Figure 1.15: Coefficients de résistance latérale à la surface du solet à grande profondeur (d'après Brinch Hansen 1961)	14
Figure 1.16 : Pieu rigide dans un milieu cohérent (d'après Broms 1964-a)	15

Figure 1.17 : Pieu flexible dans un milieu cohérent (d'après Broms 1964-a)	16
Figure 1.18 : Résistance latérale ultime de pieu rigide et de pieu souple dans un sol cohérent selon Broms (1964a) (Tiré de Poulos et Davis, 1980)	17
Figure 1.19: Pieu rigide dans un milieu pulvérulent (d'après Broms 1964-b)	17
Figure 1.20 : Pieu flexible dans un milieu pulvérulent (d'après Broms 1964-b).....	18
Figure 1.21 : Résistance latérale ultime de pieu rigide et de pieu souple dans un sol pulvérulent selon Broms(1964b) (Tiré de Poulos et Davis, 1980)	18
Figure 1.22 : Pieu rigide dans un milieu pulvérulent (d'après parasad et chari 1999)	20
Figure 1.23 : Schéma de rupture selon Ménard.....	21
Figure 1.24 : Critère de stabilité latéral selon Ménard.....	21
Figure 1.25 : Modèle basé sur la théorie de Winkler.....	23
Figure 1.26 : Courbe (P-y) incluant Put, et Es.	24
Figure 2.1 : : schéma des hypothèses de calcul.....	29
Figure 2.2 : Fonction impaire de PARECT.....	30
Figure 2.3 : Courbe Parabole-Rectangle	31
Figure 2.4 : Courbe P-Y.....	32
Figure 2.5 : Une colonne d'élément du pieu (d'après Hetenyi 1946).....	33
Figure 2.6 : Modèle basé sur la théorie de winkler.....	40
Figure 2.7 : L'interface de programme SPULL PARECT MS-DOS.....	41
Figure 2.8 : Le fichier des données de programme SPULL-PARECT MS-DOS.....	43
Figure 2.9 : Les fichiers d'affichage de programme SPULL-PARECT MS-DOS.....	44
Figure 2.10 : Fichier texte ou les résultats sont affichés.....	45

Figure 2.11 : Fenêtre d'introduction des données liée au projet.....	49
Figure 2.12 : Fenêtre d'introduction des paramètres des courbes P-Y.....	49
Figure 2.13 : Fenêtre d'introduction des données de moment et l'fort tranchant.....	50
Figure 2.14 : Fenêtre d'introduction des données de contrôle de convergence.....	50
Figure 2.15 : Fenêtre d'introduction les conditions aux limites.....	51
Figure 2.16 : Fenêtre d'affichage les résultats.....	51
Figure 3.1 : Interface de programme du chargement combine d'un pieu isolé.....	64
Figure 3.2 : Données du projet à introduire dans L-PULAL.....	67
Figure 3.3 : Introduction du chargement de projet dans L-PULAL.....	67
Figure 3.4 : Introduction de l'effort vertical.....	68
Figure 3.5 : Affichage des résultats du 1 ^{er} effort vertical (10 kN)	68
Figure 3.6 : Affichage des résultats du 2 ^{ème} incrément de chargement (20 kN)	69
Figure 3.7 : Affichage des résultats du 3 ^{ème} incrément de chargement (40 kN)	70
Figure 3.8 : Affichage des résultats du 4 ^{ème} incrément de chargement (100 kN)	70
Figure 3.9 : Affichage des résultats du 5 ^{ème} incrément de chargement (300 kN)	73
Figure 3.10 : variation du déplacement latérale en fonction de la profondeur.....	74
Figure 3.11 : variation du déplacement horizontales en fonctions de module de réaction.....	73
Figure 3.12 : variation du déplacement horizontales en fonctions de la fiche de pieu.....	75
Figure 3.13 : variation du déplacement horizontales en tête en fonctions de l'effort vertical.....	76
Figure 4.1 : Le déplacement pour un pieu libre en tête.....	80
Figure 4.2 : L'effort tranchant et le moment fléchissant pour un pieu libre en tête.....	81
Figure 4.3 : Le déplacement pour un pieu encasté en tête.....	81
Figure 4.4 : L'effort tranchant et le moment fléchissant pour un pieu encasté en tête.....	81

Figure 4.5 : Le Rapport $C_Y = Y_c(z)/Y(z)$ en fonction de profondeur.....	84
Figure 4.6 : Le rapport $C_T = T_c(z)/T(z)$ en fonction de profondeur.....	85
Figure 4.7 : Le rapport $C_M = M_c(z)/M(z)$ en fonction de profondeur.....	86
Figure 4.8 : Le rapport $C_Y = Y_c(z)/Y(z)$ en fonction de profondeur.....	88
Figure 4.9 : Le rapport $C_T = T_c(z)/T(z)$ en fonction de profondeur.....	89
Figure 4.10 : Le rapport $C_M = M_c(z)/M(z)$ en fonction de profondeur.....	90
Figure 4.11 : Le rapport $C_Y = Y_c(z)/Y(z)$ en fonction de profondeur.....	91
Figure 4.12 : Le rapport $C_T = T_c(z)/T(z)$	92
Figure 4.13: Le rapport $C_M = M_c(z)/M(z)$ en fonction de profondeur.....	93

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Classification des pieux (adapté de MCIF 2006)	9
Tableau 1.2 : Les équations pour le calcul de <i>Hult</i> dans un sol cohérent (d'après Broms 1964-a)	16
Tableau 1.3 : Les équations pour le calcul de <i>Hult</i> dans un sol pulvérulent (d'après Broms 1964b)	19
Tableau 1.4 : Valeurs des coefficients numériques α_1 et α_2 en fonction de D_c / D	22
Tableau 1.5 : Équations des poutres sur appuis élastiques pour l'analyse des pieux sous charges latérales	25
Tableau 2.1 : Tableau 2.1 : Les caractéristiques de pieu et de sol.....	52
Tableau 2.2 : Affichage des résultats de déplacement et de rotation pour le 1 ^{er} incrément.....	52
Tableau 2.3 : Affichage des résultats du 1 ^{er} incrément.....	52
Tableau 2.4 : Affichage des résultats de déplacement et de rotation pour le 2 ^{ème} incrément.....	53
Tableau 2.5 : Affichage des résultats du 2 ^{ème} incrément.....	54
Tableau 2.6 : Affichage des résultats de déplacement et de rotation pour le 3 ^{ème} incrément.....	54
Tableau 2.7 : : Affichage des résultats du 3 ^{ème} incrément.....	55
Tableau 2.8 : Tableau comparatif entre les résultats de SPULL-PARECT DOS et SPULL-PARECT Pour H=20KN et M=20KN.....	56
Tableau 2.9 : Tableau comparatif entre les résultats de SPULL-PARECT DOS et SPULL-PARECT pour H=40KN et M=40KN.....	56

Tableau 2.10 : Tableau comparatif entre les résultats de SPULL-PARECT DOS et SPULL-PARECT pour H=200KN et M=200KN.....	57
Tableau 3.1 : Résultats de déplacement avec un calcul manuelle pou N=10 KN.....	72
Tableau 4.1 : Les caractéristiques de pieu et de sol	80
Tableau 4.2 : Rapport des déplacements latéraux $C_Y = Y_c(z)/Y(z)$	83
Tableau 4.3 : Le rapport de l'effort tranchant $C_T = T_c(z)/T(z)$	84
Tableau 4.4 : Le rapport de moment de flexion $C_M = M_c(z)/M(z)$	86
Tableau 4.5 : Le rapport $C_Y = Y_c(z)/Y(z)$	87
Tableau 4.6 : Le rapport $C_T = T_c(z)/T(z)$	88
Tableau 4.7 : Le rapport $C_M = M_c(z)/M(z)$	89
Tableau 4.8 : Le rapport $C_Y = Y_c(z)/Y(z)$	91
Tableau 4.9 : Le rapport $C_T = T_c(z)/T(z)$	92
Tableau 4.10 : Le rapport $C_M = M_c(z)/M(z)$	93

Liste des Symboles

B : Le diamètre du pieu (m)

c : La cohésion du sol (KPa)

c' : La cohésion effective du sol (KPa)

C_M : Le coefficient d'un moment de flexion d'un pieu encastré par un moment de flexion d'un pieu libre

C_T : le coefficient d'un effort tranchant d'un pieu encastré par un effort tranchant d'un pieu libre

c_u : la cohésion non drainé du sol (KPa)

C_Y : Le coefficient d'un déplacement latéral d'un pieu encastré par un déplacement latéral d'un pieu libre

D : La fiche du pieu (m)

D/B : L'élanement du pieu

D_c : la profondeur critique du chargement latérale (m)

e : cote d'application de l'effort latérale (m)

E_{Ip} : La rigidité flexionnelle du pieu (MN.m²)

E_P : Le module de Young le long du pieu

E_S : Le module de réaction du sol (KPa)

E_{ti} : le module de réaction initiale du sol (KPa)

f : emplacement de moment depuis l'effort tranchant égal à zéro

H : L'effort horizontal (KN)

H_0 : l'effort horizontal en tête du pieu (KN)

H_u : l'effort tranchant ultime (KN)

I_P : Le moment d'inertie du pieu

K : la raideur de pieu

K_1, K_2, K_3, K_4 : les coefficients d'intégration

K_P : coefficient de pression des terres

K_{qz}, K_{cz} : coefficient de la résistance latérale (d'après Brinch Hansen 1961)

K_{qz}^0, K_{cz}^0 : coefficient de la résistance latérale à la surface du sol

K_s : la rigidité sécante

K_t : la rigidité tangente

L : la longueur du pieu, ou la fiche de pieu dans le sol (m)

L_0 : la longueur élastique de pieu (m)

M : le moment fléchissant du pieu (KN.m)

M_0 : le moment fléchissant en tête du pieu (KN.m)

M_{0c} : le moment de l'encastrement (KN.m)

M_c : Le moment de flexion d'un pieu encasté en tête (KN.m)

M_{max} : le moment fléchissant maximale (KN.m)

M_p : le moment fléchissant en pointe de pieu (KN.m)

M_u : Le moment fléchissant ultime (KN.m)

M_Y : le moment plastique (KN.m)

$P(KN/m)$: La réaction latérale du pieu

P_0 : la réaction latérale à la surface

P_z : la pression passive

ROTP : la rotation en pointe du pieu

T : l'effort tranchant du pieu (KN)

T_c : l'effort tranchant d'un pieu encastré en tête (KN)

T_p : l'effort tranchant en pointe du pieu

U : le déplacement horizontal du pieu

Y(z) : Le déplacement latéral du pieu

Y'_p : la rotation en pointe du pieu (rad)

Y_o : le déplacement latéral en tête du pieu (mm)

Y_{oc} : le déplacement latéral en surface d'un pieu encastré en tête

Y_c : le déplacement latéral d'un pieu encastré en tête (mm)

y_c : Le déplacement critique (mm)

Y_P : le déplacement latéral en pointe du pieu (mm)

y_r : Le déplacement de référence (mm)

Z : La profondeur (m)

z/B : la profondeur relative

γ : Le poids volumique du sol (KN/m³)

γ' : Le poids volumique déjaugé du sol (KN/m³)

σ_h : la contrainte passive horizontale (KPa)

σ_v : la contrainte verticale du sol (KPa)

σ'_v : la contrainte verticale effective du sol (KPa)

ε : la tolérance

η : le facteur de forme pour la réaction frontale normale

θ : La rotation (Rad)

τ_{\max} : la résistance maximale de cote du pieu

Φ : L'angle de frottement du sol (°)

INTRODUCTION GENERALE

Les Ouvrages en génie civil sont souvent réalisés sur des sols de différents types. Lorsque la résistance du sol en surface n'est pas suffisante pour utiliser des fondations superficielles, les ingénieurs optent pour des fondations profondes qui permettent de reporter les charges de la structure sur des couches plus profondes. Parmi celles-ci, les fondations sur pieux constituent une solution souvent préconisée en construction. Cependant, de nombreuses structures doivent pouvoir résister aussi bien à des charges axiales qu'à des charges latérales. Les pieux sont des éléments structuraux couramment utilisés en génie civil. Ils sont dimensionnés pour reprendre à la fois des efforts axiaux, des efforts latéraux et des moments. Leur comportement mécanique a déjà fait l'objet de nombreux travaux de recherches qui ont abouti à des méthodes de dimensionnement largement adoptées dans la profession.

Actuellement, les pieux verticaux sont dimensionnés pour reprendre aussi bien les sollicitations axiales mais aussi les sollicitations latérales. Ces dernières peuvent être de type quasi-statique (choc d'accostage d'un navire, freinage brusque d'un convoi sur un pont...) ou dynamique (houle, effet du vent sur les structures, séisme...).

L'analyse de la réponse latérale et axiale d'un système des fondations sur pieux était depuis plusieurs décennies un thème fécond d'études et de recherches aussi bien numériques qu'expérimentales, en vue en premier lieu de comprendre le phénomène de la réponse, et en deuxième lieu de mettre au point des méthodes pratiques de dimensionnement des pieux.

Or, ce type de phénomènes est assez complexe et a fait l'objet de peu de recherches. Par ailleurs, le fait que la conception de ce type de fondations fait appel à deux spécialités, la géotechnique et la structure (interaction sol-structure), rend l'accès à ce domaine frontière difficile. Le calcul de déplacement en tête et les efforts le long des pieux libres et encastres sous charges horizontale et verticale est un critère essentiel pour leur dimensionnement.

Les travaux présentés dans ce mémoire sont structurés en six (05) chapitres une introduction générale qui situe le contexte du sujet, son importance et le plan de travail mis en œuvre.

Le chapitre 1 Présente une synthèse bibliographique sur le comportement latéral des pieux isolés.

Le chapitre 2 Sera consacré à la transposition d'un programme de calcul d'un pieu isolé sous chargement horizontale d'une version DOS à une version sur VB.NET.

Le chapitre 3 Présente une étude du comportement d'un pieu isolé sous chargement combiné .

Le chapitre 4 Présente un étude de l'effet d'un encastrement en tête d'un pieu chargé latéralement .

Le chapitre 5 Présente des recommandations pratiques et une conclusion générale qui résume les intérêts de l'étude

**Chapitre 01 : Recherche
bibliographique du
comportement latéral des
pieux isolés**

1. Généralités sur les pieux :

1.1. Définitions et justification des fondations profondes :

La fondation d'un ouvrage de construction est la partie qui reprend les charges de la superstructure et les transmet par contact au sol support. Elle joue un rôle important pour une bonne tenue des ouvrages.

On distingue généralement trois types de fondations classés en fonction du rapport de la longueur d'encastrement D par rapport à la largeur ou le diamètre B de la fondation. Ainsi on a :

- Fondation superficielle : $D/B \leq 4$ à 5
- Fondation semi-profonde : $4 \leq D/B \leq 10$
- Fondation profonde : $D/B \geq 10$

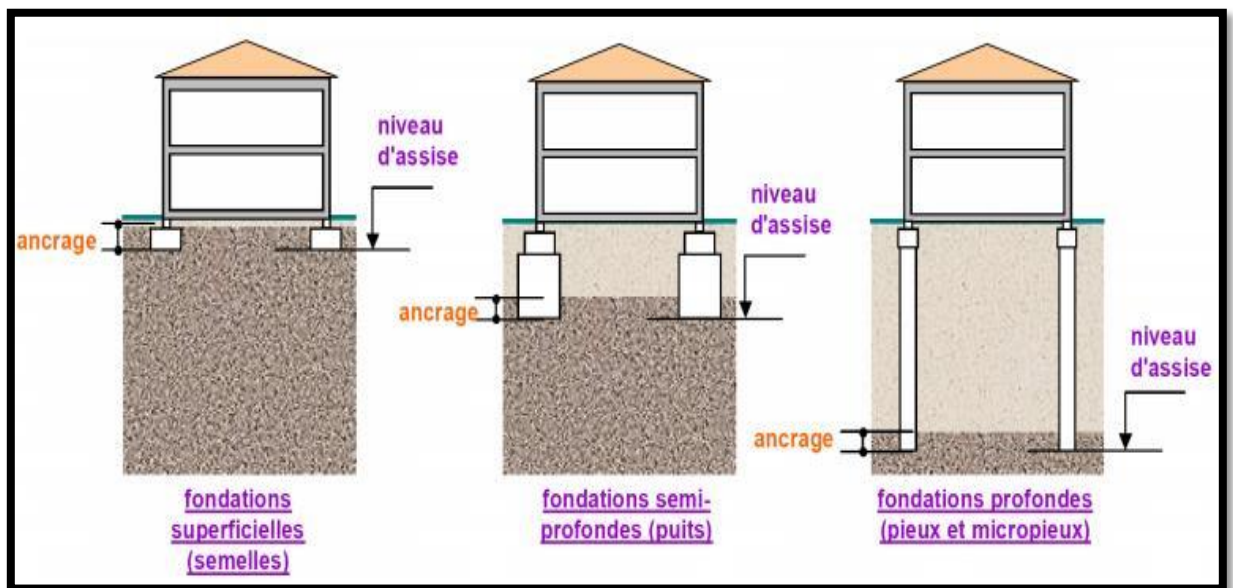


Figure 1.1 : Les principaux types de fondations [1].

Les fondations superficielles sont utilisées lorsque le terrain résistant se trouve à une faible profondeur et qu'il est facilement accessible. Par ailleurs lorsque les caractéristiques mécaniques du sol support des fondations superficielles sont insuffisantes pour supporter des charges importantes, il faut recourir à des fondations de profondeur plus élevées dites fondations profondes. Du point de vue résistance, les deux types de fondations (profondes et superficielles) se différencient essentiellement par la prise en compte d'un frottement sur les parois latérales.

Les fondations profondes, notamment les pieux, transmettent les charges non seulement par leur base (résistance de pointe) mais aussi par leur fut latérales (frottement latéral le long du pieu) (Figure 1.2). Ils permettent de reprendre les charges pour les transmettre à des couches compactes et profondes susceptibles de les supporter dans des conditions satisfaisantes de stabilité et de tassement.

On opte pour ce mode de fondation, lorsque les charges à transmettre au sol sont très importantes, lorsque le terrain en surface est de mauvaise portance et lorsque les couches résistantes du sol sont situées à une grande profondeur on utilise les fondations profondes.

Dans un pieu, on distingue essentiellement 03 parties : « **la tête** » qui reçoit la charge de la superstructure, « **la pointe** » qui délivre cette charge au sol qui se trouve en bas et « **le fût** » qui partage une partie de la charge sur le sol adjacent [3].

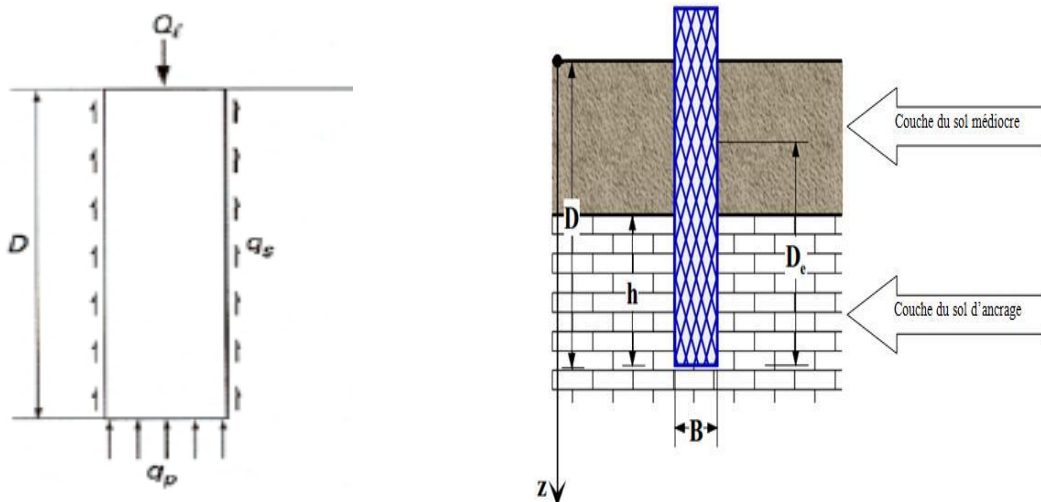


Figure 1.2 : Mode de travail d'un pieu [2]. Figure 1.3: Définition de la hauteur d'encastrement [3].

1.2. Historique sur les pieux :

L'utilisation des fondations sur pieux dans les travaux de construction peut être retracée au début de la civilisation. Herodotus, l'écrivain Grec du 4^{ème} siècle aussi connu par « père de l'histoire », a proposé le 1^{er} document historique sur les pieux qui mentionne que les 1^{ers} pieux dans le monde sont fabriqués par les Egyptiens, les Romains, les Grecs et autres qui ont utilisé des pieux pour ériger des clôtures pour se protéger des envahisseurs, soutenir les

routes et les structures. Les pieux étaient généralement fabriqués à partir de pierres et de bois. Certains éléments de construction de pile dans les civilisations du passé peuvent encore être vus dans diverses régions à travers le monde [4].

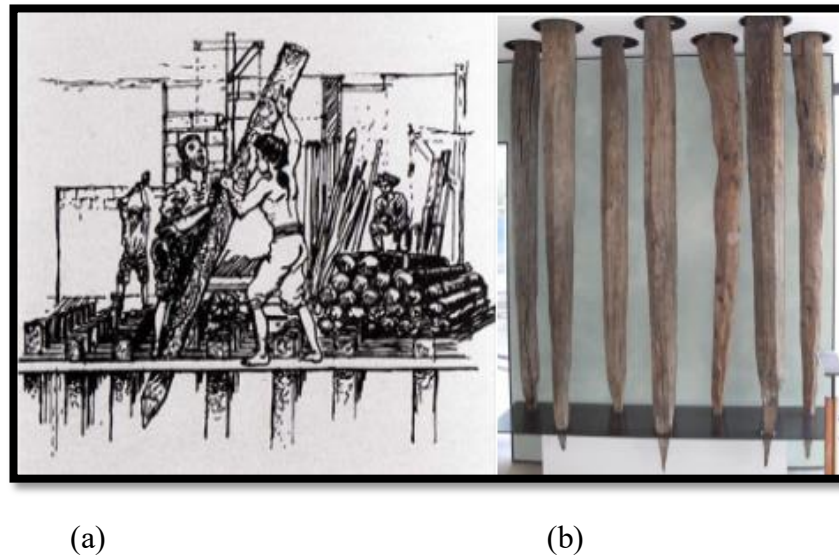


Figure 1.4:(a) La première mise en œuvre des pieux bois dans le sol (Source: venicethefuture.com), (b) Des pieux préservés de 3600ans d'âge [4].

1.3. Le mode de fonctionnement des pieux :

1.3.1. Pieu isolé :

La stabilité d'un pieu isolé est assurée soit par, la pointe du pieu, par frottement latéral ou bien les deux combinés :

- **Résistance en pointe** : un pieu résiste par sa pointe lorsque la pointe de ce dernier repose sur un sol assez rigide (substratum) et que le confinement autour du pieu est négligeable, Dans ce cas le pieu est dit : pieu colonne.

L'effort de pointe est conditionné par :

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

-**Le frottement latéral** : on définit 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, 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.

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. Dans ce cas-là le pieu est dit : pieu flottant.

-**La résistance en pointe et le frottement latéral** : le pieu est dit combiné lorsqu'il résiste par sa pointe et tel que par le frottement latérale, ce pieu est dit : pieu intermédiaire.

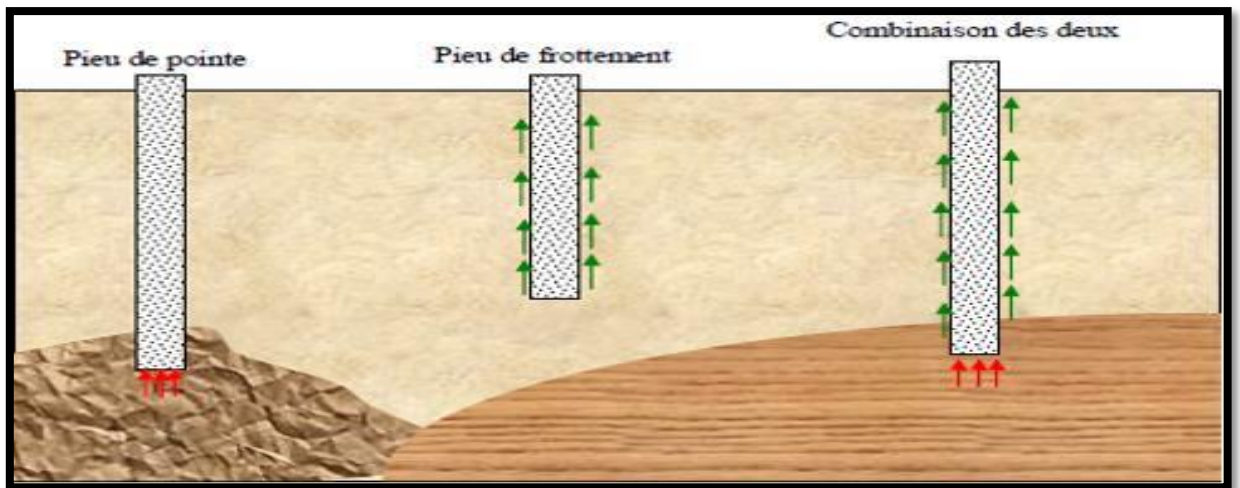


Figure 1.5 : Le fonctionnement des pieux [1].

1.4. Les modes d'installations des pieux :

Pour la mise en place des pieux, on distingue généralement deux mode d'installation : par refoulement du sol ou non refoulement.

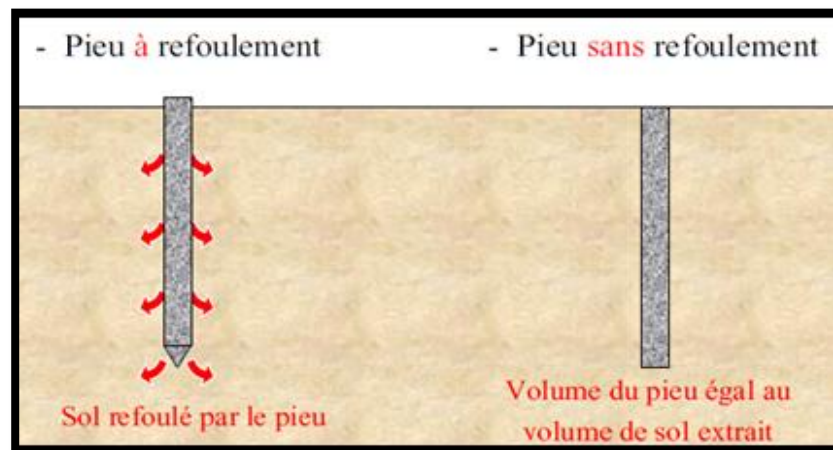


Figure 1.6: Les deux (02) types de pieux selon l'effet de l'installation [1].

- La catégorie des pieux refoulant le sol lors de l'installation comporte principalement :

-Les pieux battus : ce sont des pieux préfabriqués en béton armé ou précontraint, ou des pieux métalliques à base obturée sont enfoncés dans le sol par battage en tête. Appartiennent aussi à cette catégorie les pieux battus par pilonnage, par moulage, ou par enrobage.

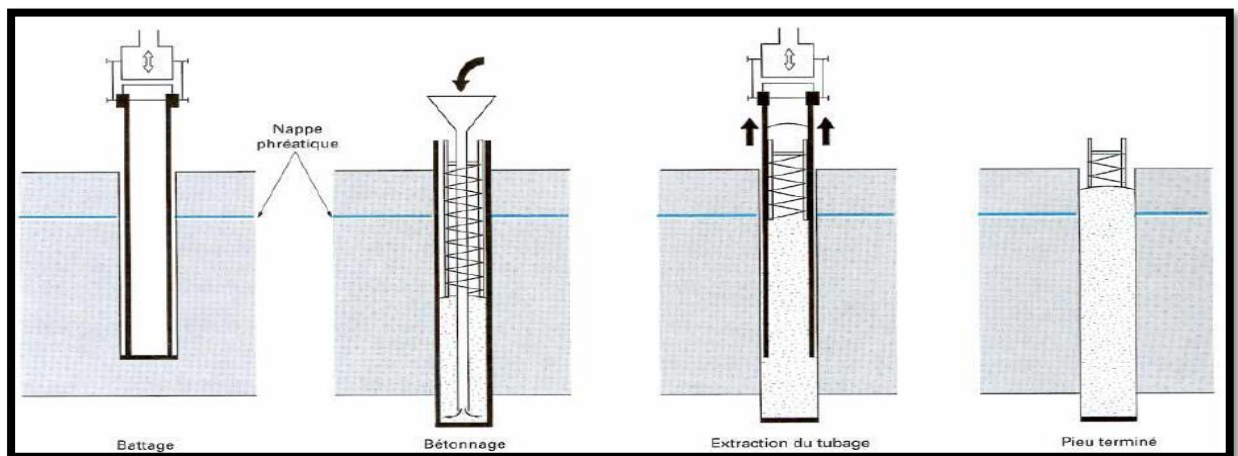


Figure 1.7 : Schéma du procédé d'installation d'un pieu battu moulé [2].

-Les pieux forcés : ce sont des pieux en béton armé préfabriqué, ou des pieux métalliques qui sont installés dans le sol par fonçage, avec un vérin s'appuyant sur un massif de réaction.

-Les pieux visés moulés : ce sont des pieux installés dans les sols par vissage préalable d'un outil en forme de double vis surmonté d'une colonne cannelée.

- Les pieux appartenant à la catégorie d'installation sans refoulement du sol sont :

-Les pieux forés simple : sont réalisés par excavation de matériaux puis remplacer le sol excaver par du béton. Suivant la nature des terrains traversés, il existe de nombreuses techniques de forage. Différents outils sont utilisés selon la dureté des sols (tarière creuse, etc.). Dans le cas de sols de faible cohésion, un tubage ou l'utilisation de boues permet d'assurer la tenue des terres durant les opérations de forage.

-Les pieux forés à la boue : ce sont des pieux réalisés à partir d'un forage avec maintien des parois avec la boue.

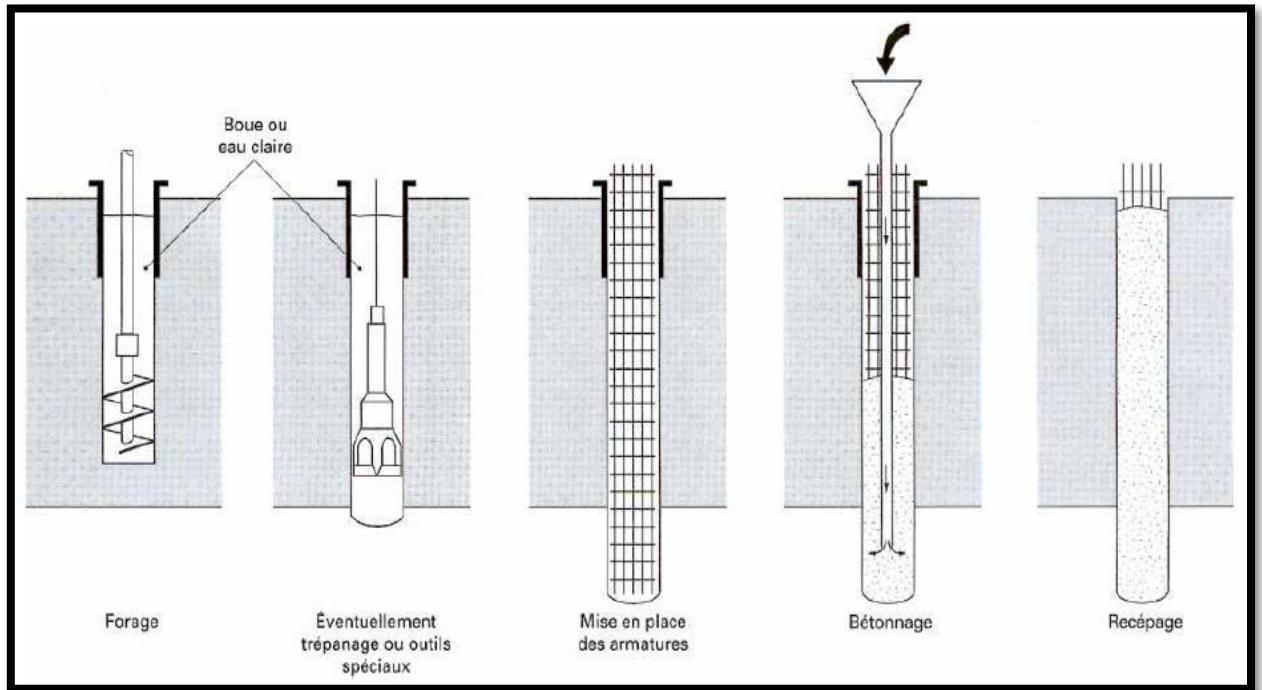


Figure 1.8 : Schéma du procédé d'installation d'un pieu foré à la boue [2].

-Les pieux forés tubés : la mise en œuvre de ces pieux est à partir d'un forage exécuté dans le sol par des moyens mécaniques tels que tarière, benne, etc., sous protection d'un tubage dont la base est toujours située au-dessous du fond de forage.

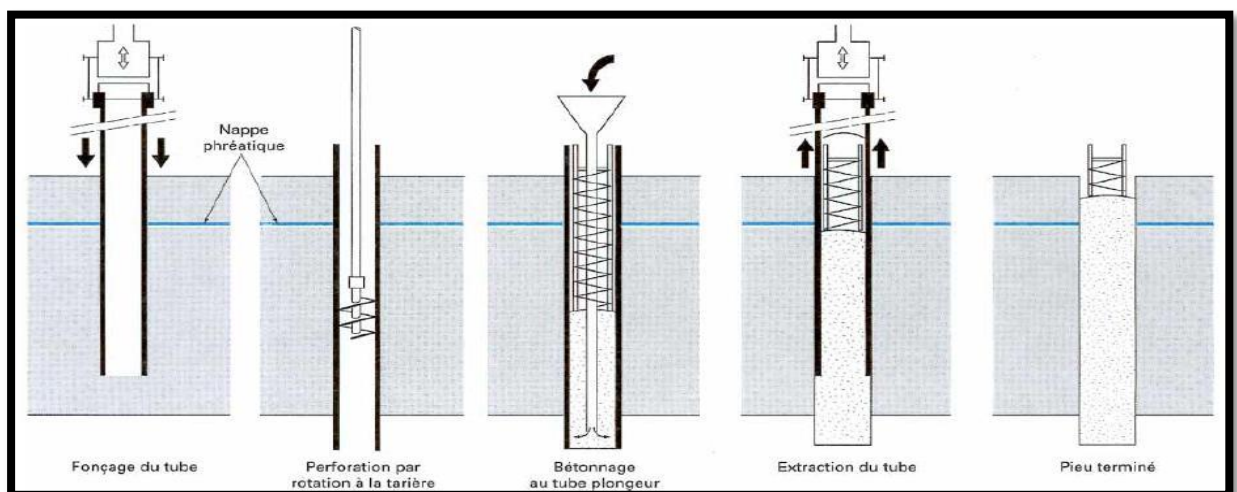


Figure 1.9 : Schéma du procédé d'un pieu foré tubé [2].

-Les pieux forés à tarière creuse : la mise en œuvre avec une tarière à axe creux, d'une longueur totale au moins égale à la profondeur des pieux à exécuter, vissée dans le sol sans extraction notable de terrain.

La tarière est extraite du sol sans tourner pendant que, simultanément, du béton est injecté dans l'axe creux de la tarière, prenant la place du sol extrait

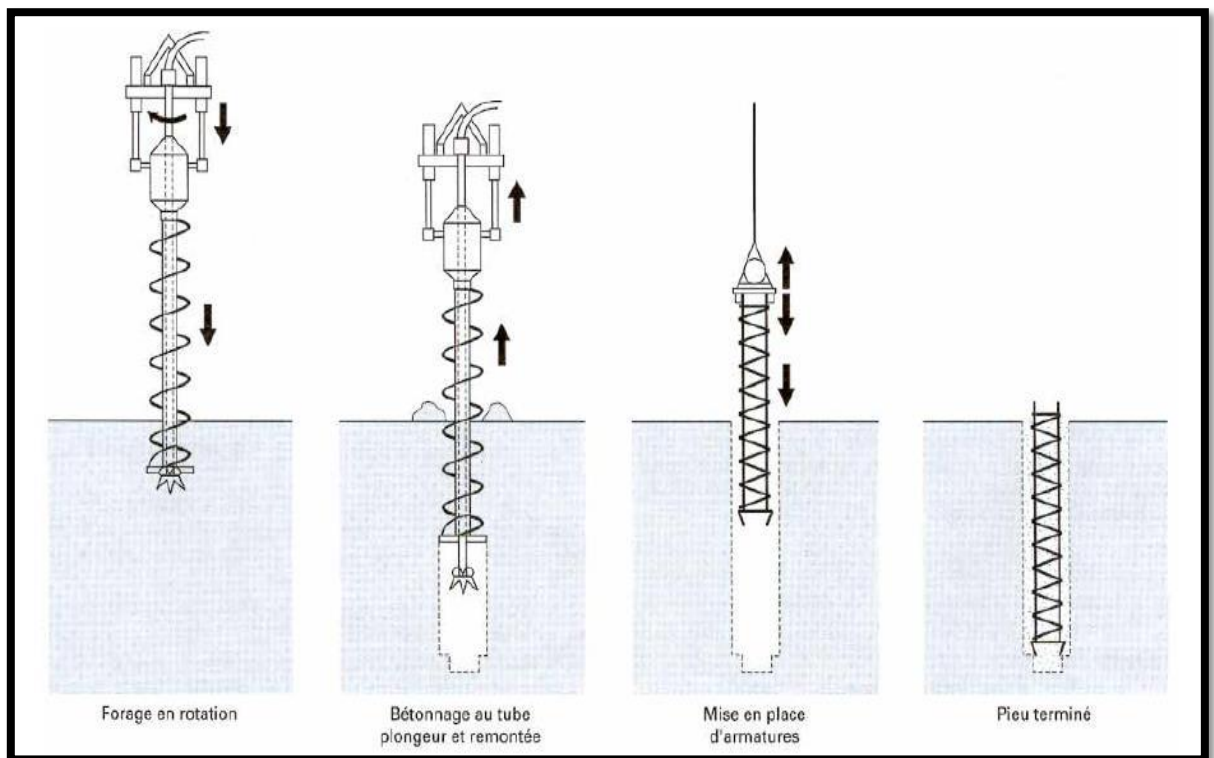


Figure 1.10 : Schéma du procédé d'installation d'un pieu foré à tarière creuse [2].

Micro-pieux : sont des pieux de faible diamètre inférieure 250mm à réalisés par forage puis injection d'un coulis de ciment, ils sont largement utilisé dans le renforcement du sol.

Puits : Sont généralement utilisés pour la reconnaissance et pour la vérification de la lithologie du site en plus de la capacité de l'obtention des échantillons pour les essais au laboratoire.

1.5. Classification des pieux :

Les pieux peuvent être classés de différentes façons selon les paramètres d'intérêt. Ces paramètres sont regroupés dans le tableau 1.1, adapté au Manuel Canadien d'ingénieur des fondations (MCIF,2006).

Tableau 1.1 : classification des pieux (adapté de MCIF 2006) [5].

Classification selon	Type de pieu
Mode d'installation	Battu, foré, tubé, vissé, moulé
Nature de matériau	Acier, béton, bois, béton précontraint
Géométrie et forme	Vertical (section variable ou uniforme, base élargie), incliné
rigidité	Long (flexible), court (rigide)
Type de structure	Tour, machinerie, bâtiment
Déplacements du sol	Subissant un grand déplacement, un faible déplacement, ne subissant pas de déplacement
Mode de fonctionnement	Frottement, pointe

Schéma de Classification des pieux:

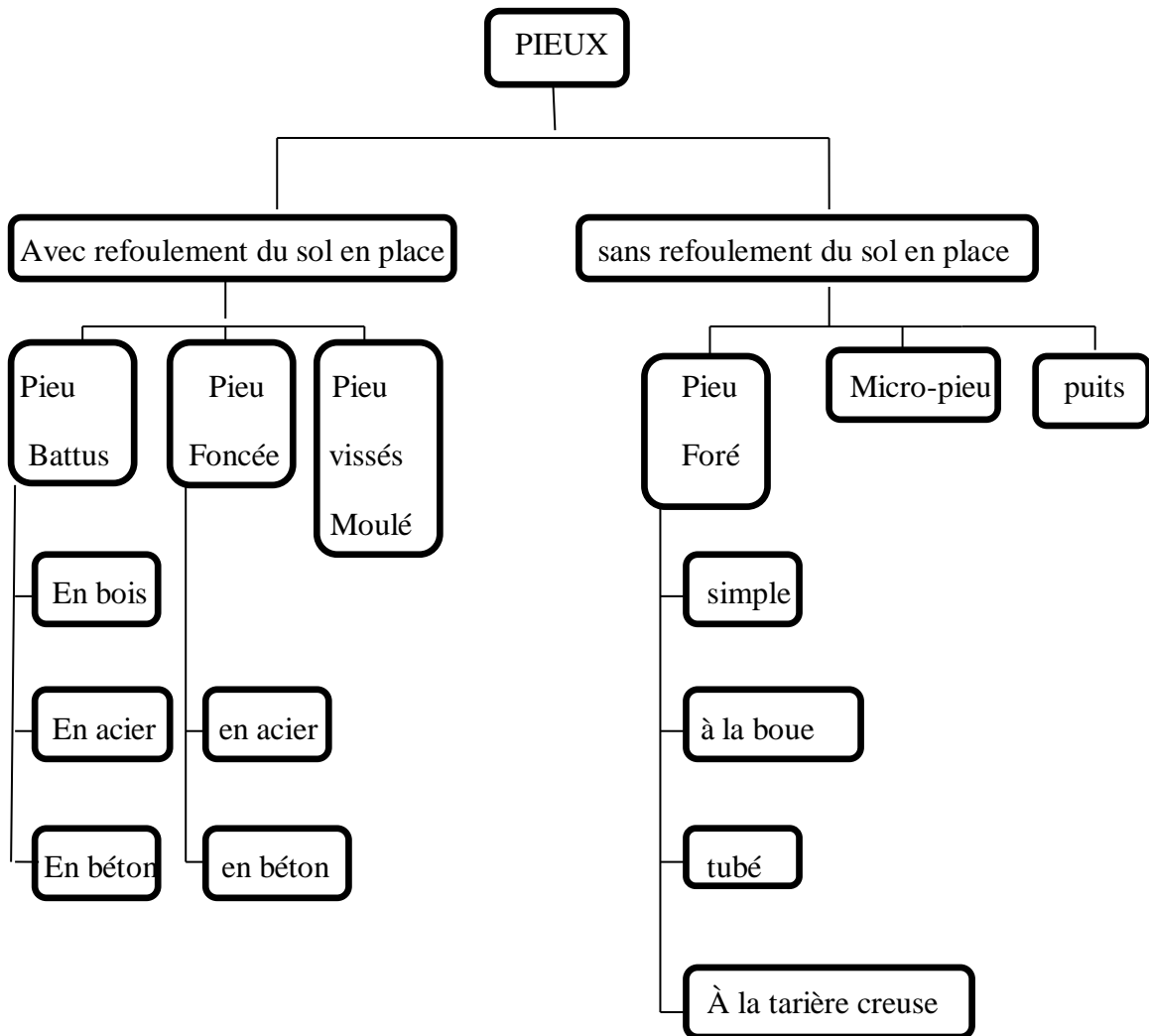


Figure 1.11 : Classification des pieux selon EPF Lausanne (Travaux de Fondation, 2000) [5].

1.6. Choix de fondation sur pieux :

Le choix du type, de la longueur et de la capacité est généralement fait à partir de l'estimation sur la base des conditions du sol et la grandeur de la charge. Dans les grandes villes, où les conditions de sol sont bien connues et où un grand nombre de fondations sur pieux ont été construits, l'expérience acquise dans le passé est extrêmement utile. En général, la conception de la fondation est faite sur les valeurs préliminaires estimées. Avant le début de la construction proprement dite, des essais de chargement de pieux doivent être

menées afin de vérifier les valeurs de conception. La conception de la fondation doit être révisée en fonction des résultats des essais.

Les facteurs qui régissent la sélection des pieux sont :

- La longueur du pieu en relation à la charge et type de sol.
- La disponibilité de matériau.
- Le type de chargement.
- Les facteurs qui causent la détérioration.
- L'estimation du cout de la réalisation des pieux en comparant avec d'autres types de fondations [6].

2. Les Méthodes de calcul d'un pieu chargé horizontalement :

2.1. Introduction :

La capacité portante horizontale H_u (et/ou M_u) dépend essentiellement de la rigidité relative pieu/sol, de l'élançement D/B et des propriétés mécaniques du sol autour du pieu. Un pieu rigide peut mobiliser la résistance latérale du sol autour du pieu lorsque l'effort latérale atteint une valeur limite H_u , un pieu flexible peut par contre se rompre par flexion avant que le sol mobilise sa résistance latérale. De ce fait la capacité portante horizontale H_u est par définition l'effort horizontal minimum causant la rupture du sol ou de pieu.

L'étude de comportement du pieu sous chargement horizontale se fait à l'état limite ultime (L'ELU), les efforts exercés doivent être inférieurs à la capacité portante latérale du sol, de plus les pieux doivent assurer le bon fonctionnement de l'ouvrage en dessus pour cela on fait la vérification à L'ELS.

Il existe plusieurs méthodes analytiques pour l'estimation de l'effort latérale limite

H_u et du moment de flexion limite M_u :

- Les méthodes théoriques
- Les méthodes semi-empiriques
- Les méthodes empiriques

2.2. Les Méthodes théoriques :

Elles sont basées sur un mécanisme de rupture par coin, telles que celles de Blum (1936) et Brinch Hansen (1961).

La résistance horizontale du sol est assimilée à un profil de pression composée en partie supérieure d'une butée et en partie inférieure d'une contrebutée, avec passage discontinu d'une zone à l'autre (centre de rotation).

2.2.1 Méthode de Blum (1932) :

La plus ancienne méthode qui a été développée; Blum (1932) considère la rupture du sol pulvérulent à partir du coin vers la surface (figure 1.12), la distribution de la pression du sol est déterminée par la théorie de coulomb.

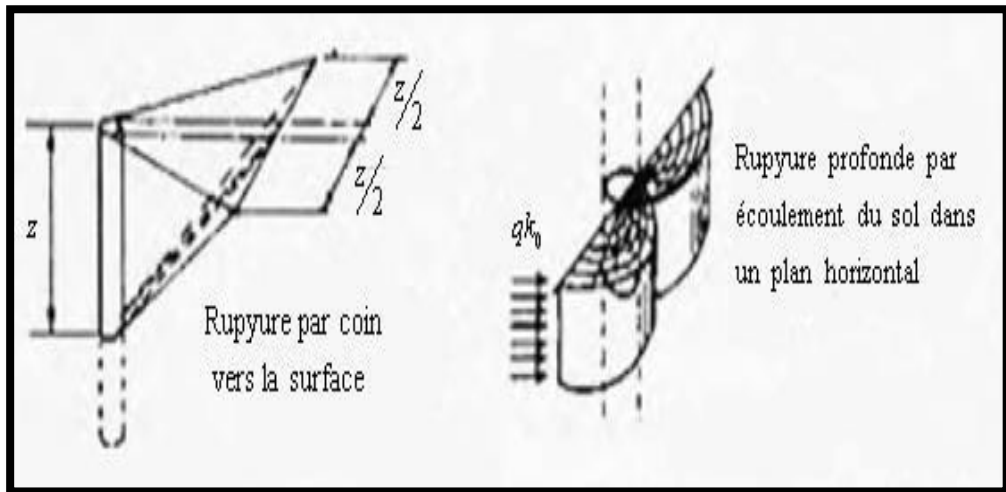


Figure 1.12 : Mécanismes de rupture selon Blum [7].

2.2.2 Méthode de Brinch-Hansen (1961) :

Brinch-Hansen a proposé une méthode pour calculer la résistance ultime latérale d'un pieu court (rigide) dans un sol cohérent ($c-\phi$), il juge que la rupture se produit non seulement à partir du coin mais qu'elle est aussi profonde et se localise autour de pieu (Figure 1.13). Dans cette méthode les paramètres inconnus sont la profondeur de rotation x et la valeur de l'effort ultime H_u , qui se déterminent à partir des deux conditions d'équilibres (forces horizontales et l'équation des moments).

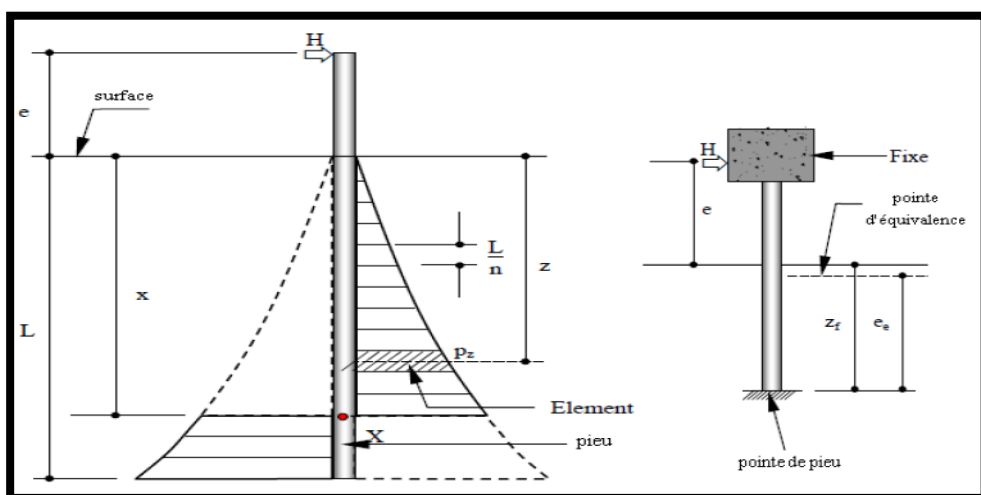


Figure 1.13: Modèle de calcul de pieu rigide libre et fixe en tête (d'après Brinch Hansen 1961) [8].

Calculer la pression passive P_z comme suite :

$$P_z = \sigma'_v \cdot K_{qz} + C' \cdot K_{cz} \quad (1.1)$$

$$\text{Avec : } \sigma'_v = \gamma' \cdot z \quad (1.2)$$

K_{qz} et K_{cz} : Coefficient de la résistance latérale dépendent de la profondeur relative z/B Et l'angle de frottement interne (Figure 1.14).

La différence entre la résistance en surface et la résistance à grande profondeur est schématisée sur la figure 1.15.

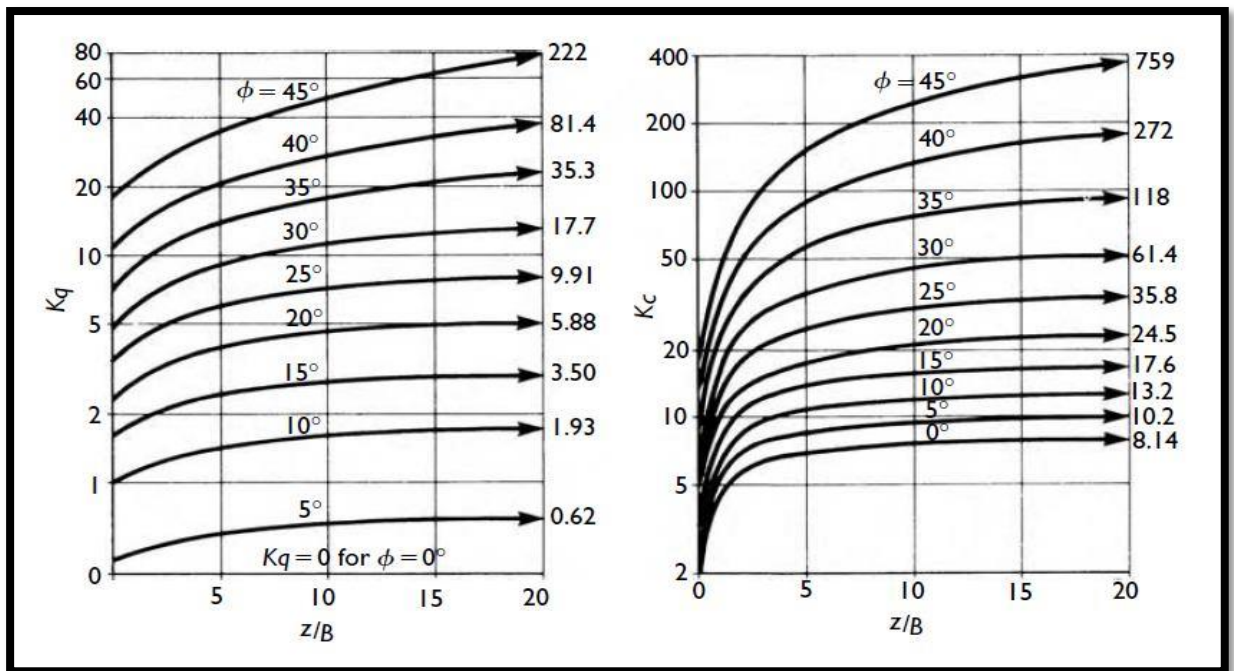


Figure 1.14 : Les coefficients K_q et K_c selon Brinch Hansen (1961) [9].

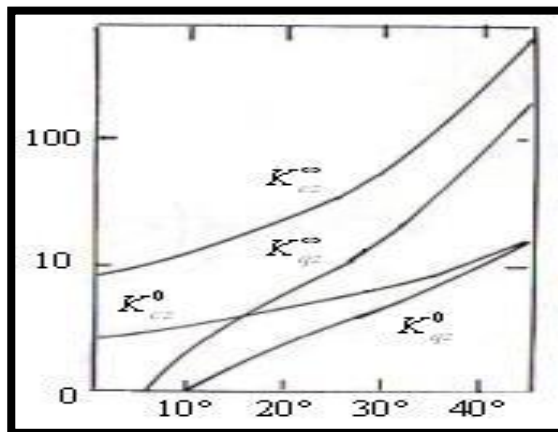


Figure 1.15 : Coefficients de résistance latérale à la surface du sol et à grande profondeur (d'après Brinch Hansen 1961) [9].

2.3. Méthodes Semi-Empiriques :

2.3.1 Méthode de Broms :

La méthode de Broms est basée sur la théorie classique où le sol est entièrement à l'état de rupture. Broms a posé des hypothèses simplificatrices pour développer sa méthode. Parmi celles-ci on peut citer :

- La pression ultime du sol est supposée égale à zéro à $1.5B$ de la surface du sol (B étant le diamètre ou la largeur de pieu). Cette hypothèse est justifiée par la faible résistance du sol en surface quand le pieu fléchit. En dessous de cette distance, la pression est supposée égale à $9C_uB$ dans le cas d'un sol cohérent.
- La contrainte passive du sol en arrière du pieu est considérée négligeable et la pression ultime en avant du pieu est égale au produit de 3 fois la contrainte passive horizontale par le diamètre du pieu $3\sigma_h B$ (ou la largeur) dans le cas d'un sol pulvérulent.

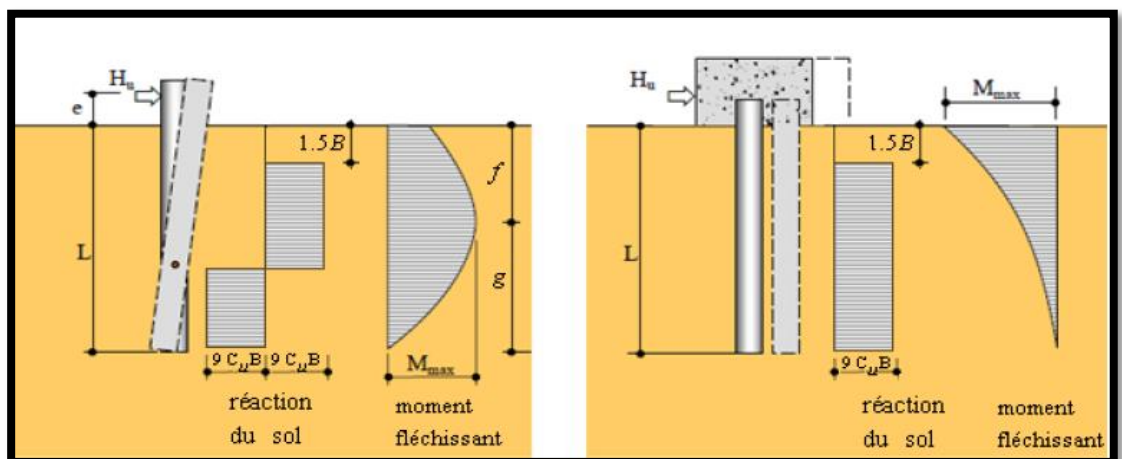
2.3.1.1. Équations pour le calcul de *H_{ult}* par la méthode de Broms :

Broms a développé des équations et a construit des abaques à l'aide de celles-ci pour calculer la capacité portante horizontale ultime H_{ult} . Les tableaux résument les équations développées pour les sols cohérents et pulvérulents et pour chaque type de pieu (rigide ou souple) selon les conditions aux limites (tête fixe ou tête libre).

2.3.1.1.1. Les sols cohérents :

$$L = 1.5B + f + g \tag{1.3}$$

F



Pieu rigide dans un milieu cohérent (d'après Broms 1964-a) [8].

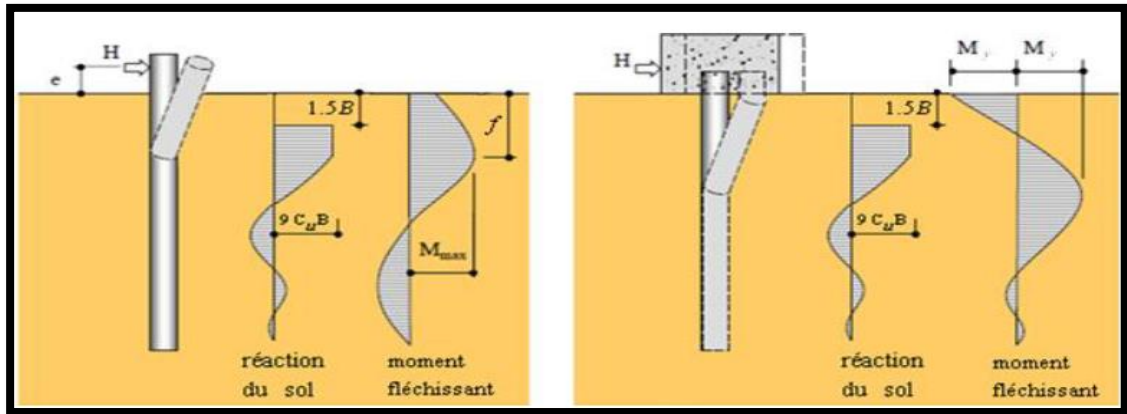


Figure 1.17: Pieu flexible dans un milieu cohérent (d'après Broms 1964-a) [8].

Tableau 1.2: Les équations pour le calcul de H_{ult} dans un sol cohérent (d'après Broms 1964-a) [8].

Type de pieu	Type de tête	Capacité horizontale H_{ult}
Rigide	Libre	$H_{ult} = 9C_u B \sqrt{2 \left(L^2 + 2eL + \frac{9B^2}{4} + 3eB + 2e^2 \right)} - 9C_u B(L + 2e + 1.5B)$ $M_{max} = H_{ult}(e + 1.5B + 0.5f) = 2.25Bg^2C_u \quad f = \frac{H_{ult}}{9C_u B}$
	Fixe	$H_{ult} = 9C_u B(L - 1.5B)$ $M_{max} = H_{ult}(0.5L + 0.75B)$
Souple	Libre	$H_{ult} = \frac{2.25Bg^2C_u}{e + 1.5B + 0.5f}$
	Fixe	$H_{ult} = \frac{2M_y}{1.5B + 0.5f}$ $M_y = 2.25C_u Bg^2 - 9C_u Bf(0.5L + 0.75B)$

On peut calculer la capacité portante horizontale ultime H_{ult} d'un pieu court ou long selon les conditions aux limites foncé on milieux pulvérulent soit par le tableau ou par les schémas de la figure 1.18, selon les équations suivant :

$$\frac{H_{ult}}{9C_u B^2} = \sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{L}{B}\right)^2 + \frac{2e}{B} \left(\frac{L}{B}\right) + \left(\frac{2e^2}{B^2} + \frac{3e}{B} + \frac{9}{4}\right)} - \left(\frac{L}{B} + \frac{2e}{B} + 1.5\right) \quad (1.4) \text{ Pour les pieux rigides}$$

$$\frac{H_{ult}}{9C_u B^2} = \sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{e}{B} + 1.5\right)^2 + \frac{2M_{max}}{9C_u B^3}} - \left(\frac{e}{B} + 1.5\right) \quad (1.5) \text{ Pour les pieux flexibles}$$

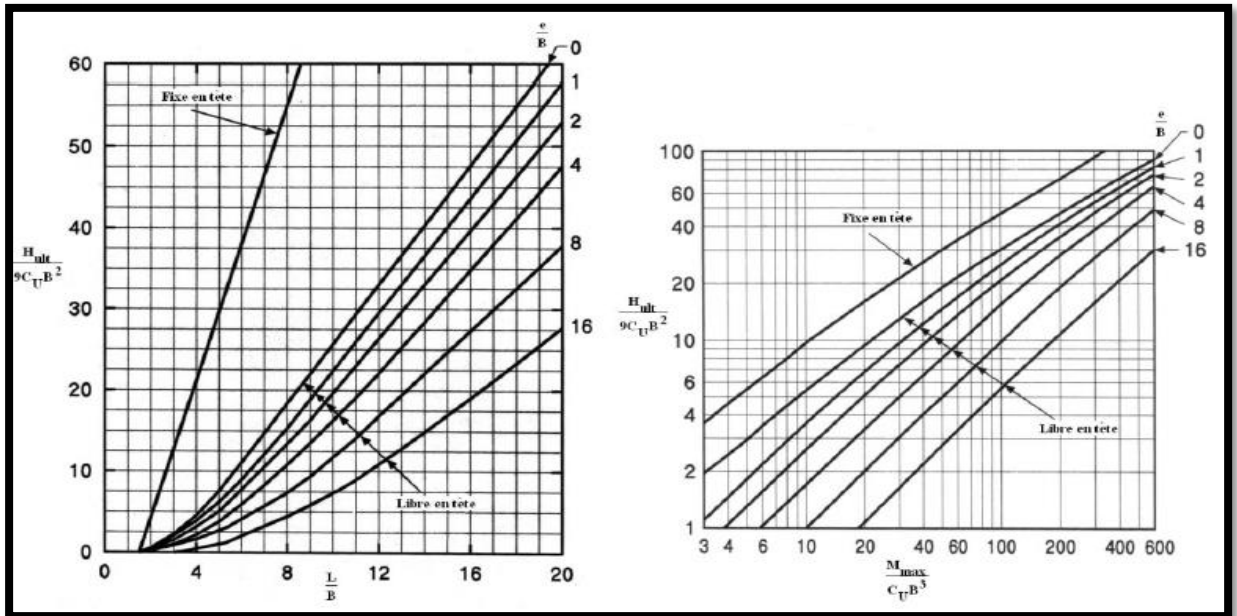


Figure 1.18: Résistance latérale ultime de pieu rigide et de pieu souple dans un sol cohérent selon Broms (1964a) (Tiré de Poulos et Davis, 1980) [11].

2.3.1.1.2. Les sols pulvérulents :

$$k_p = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (1.6)$$

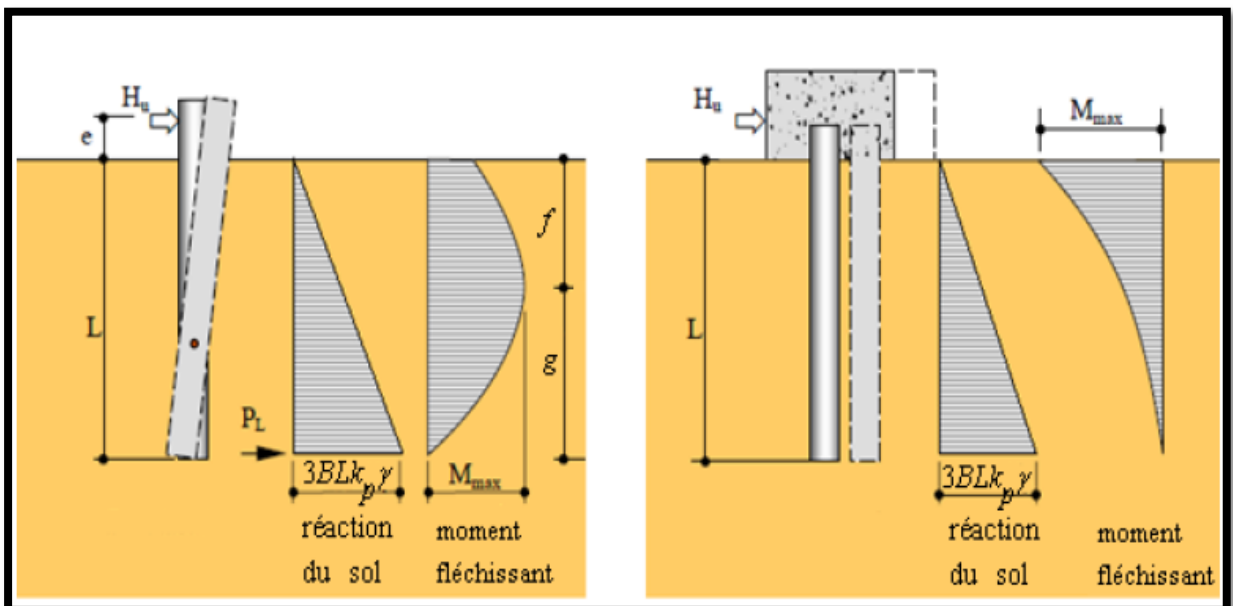


Figure 1.19 : Pieu rigide dans un milieu pulvérulent (d'après Broms 1964-b) [8].

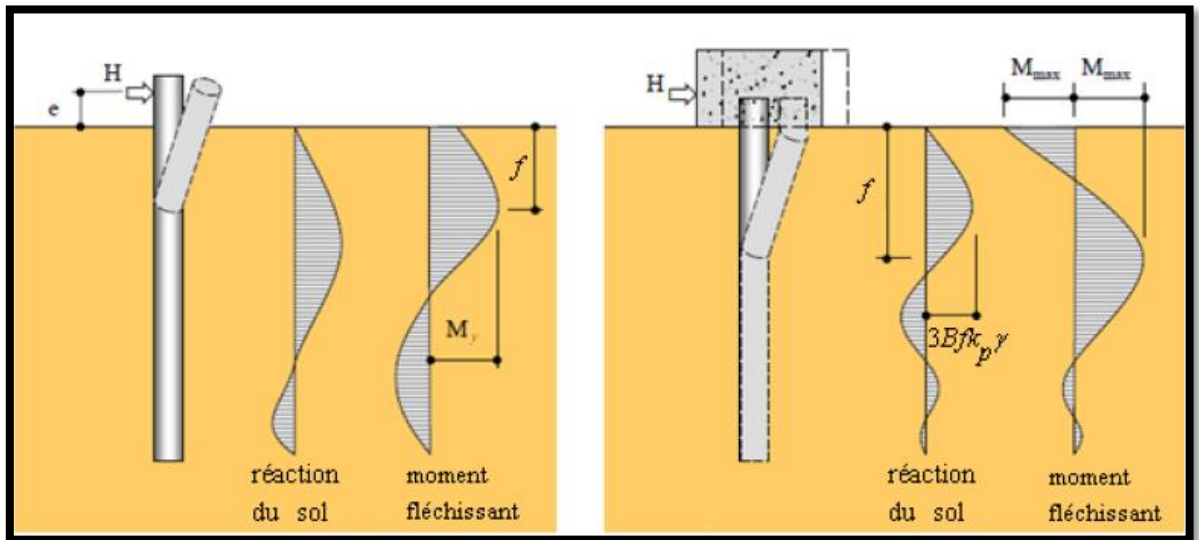
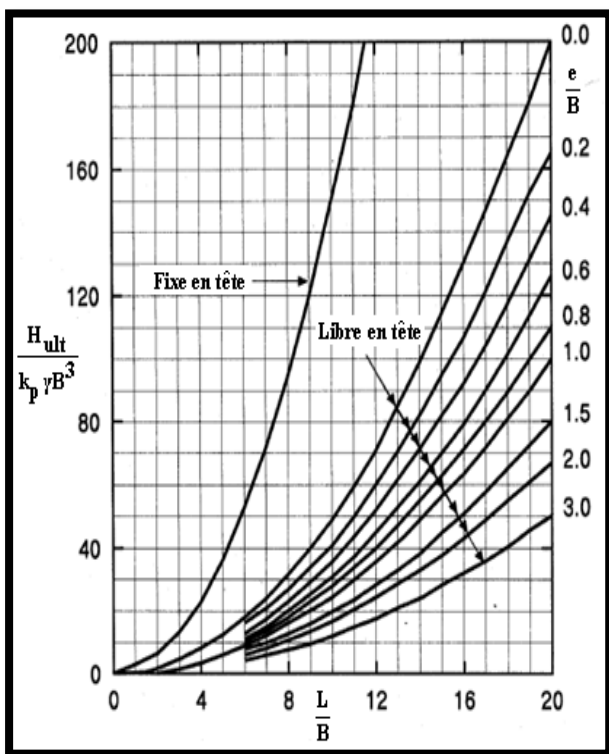
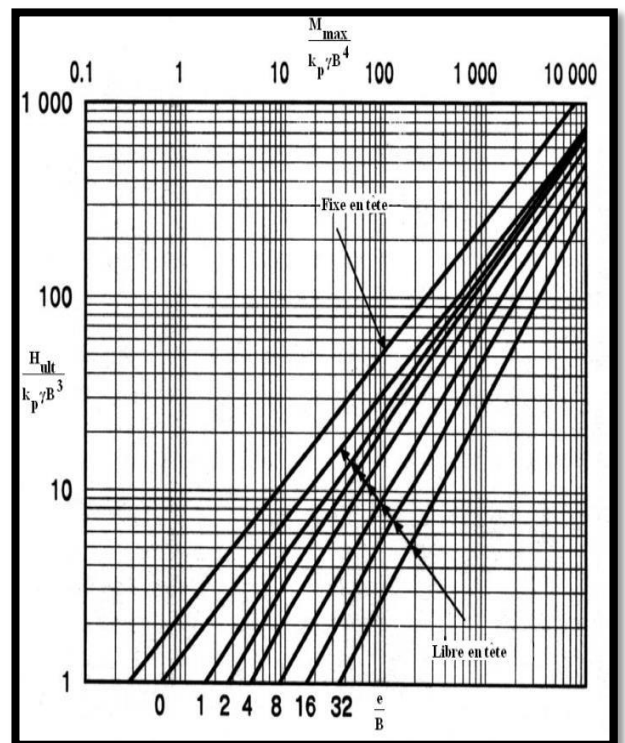


Figure 1.20: Pieu flexible dans un milieu pulvérulent (d'après Broms 1964-b) [8].



a) Pieu rigide



b) Pieu flexible

Figure 1.21: Résistance latérale ultime de pieu rigide et de pieu souple dans un sol pulvérulent selon Broms(1964b) (Tiré de Poulos et Davis, 1980) [11].

On peut calculer la capacité portante horizontale ultime H_{ult} d'un pieu court ou long selon les conditions aux limites foncé on milieux pulvérulent soit par le tableau 1.2 ou par les schémas de la figure 1.21.

Tableau 1.3: Les équations pour le calcul de H_{ult} dans un sol pulvérulent (d'après Broms 1964-b) [8].

Type de pieu	Type de tête	Capacité horizontale H_{ult}
Rigide	Libre	$H_{ult} = \frac{0.5\gamma BL^3 k_p}{e + L} \quad f = 0.82 \sqrt{\frac{H_{ult}}{\gamma B k_p}}$ $M_{max} = H_{ult} \left(e + \frac{2f}{3} \right)$
	Fixe	$H_{ult} = 1.5\gamma B k_p L^2$ $M_{max} = \frac{2}{3} H_{ult} L = L^3 B k_p \gamma$
Souple	Libre	$H_{ult} = \frac{3}{2} \gamma B k_p f^2$
	Fixe	$H_{ult} = \frac{2M_y}{e + \frac{2f}{3}} \quad M_y = \frac{(0.5\gamma BL^3 k_p) \left(e + \frac{2}{3} f \right)}{\frac{2}{3} f + e + 2L}$

2.3.2 Méthode de Prasad et Chari (1999) :

Elle Est basée sur le même mécanisme de rupture qui utilise les résultats de test et ne considère aucune résistance du sol au point de rotation. Nous utiliserons cette forme de la distribution pour les deux réactions frontales normale et latérale du frottement. La résistance latérale ultime H_{ult} d'un pieu rigide à la force horizontale en tête peut être obtenu par :

$$H_{ult} = \int_0^L P_{ult} \cdot B dz = \int_0^L (\eta \cdot p_{max} + \varepsilon \tau_{max}) B dz \quad (1.7)$$

$$H_{ult} e = \int_0^L P_{ult} \cdot B z dz = \int_0^L (\eta \cdot p_{max} + \varepsilon \tau_{max}) B z dz \quad (1.8)$$

La profondeur de rotation x est définie comme suite :

$$X = \frac{-(0.567L + 2.7e) + (5.307L^2 + 7.29e^2 + 10.541eL)^{0.5}}{2.1996} \quad (1.9)$$

$$H_{ult} = 0.3(\eta.K_p^2 + \varepsilon.K.\tan\delta)\gamma Bx(2.7x - 1.7L)$$

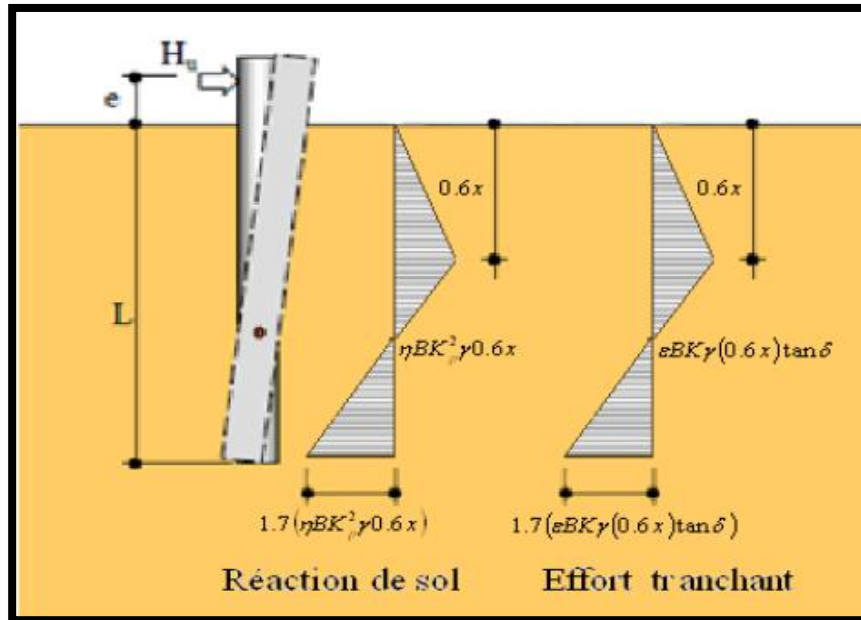


Figure 1.22: Pieu rigide dans un milieu pulvérulent (d'après parasad et chari 1999) [11].

2.4. Les Méthodes Empiriques :

Elles sont basées en départ sur l'observation du comportement des pieux en essais de chargement latéral, telles que celles de Ménard (1962).

2.4.1 Méthode de Ménard (1962) :

Ménard (1962) a établi une méthode pratique qui permet de déterminer en fonction des essais pressiométriques, d'une part les valeurs limites H_u et M_u des efforts tranchants et des moments de renversement applicables sur un pieu rigide, et d'autre part les déformations et les réactions correspondant à des efforts donnés inférieurs ou au plus égaux à ces valeurs limites affectées d'un coefficient de sécurité en général égal à 3. Il a adopté le schéma de rupture illustré à la (Figure 1.23) dans lequel les trois résultantes partielles F_1 , F_2 et F_3 sont exprimées en fonction de la pression limite P_1 , la pression des terres au repos P_0 et la profondeur critique D_c . Ménard recommande de prendre une profondeur critique égale à 2 diamètres pour un sol cohérent et 4 diamètres pour un sol pulvérulent [12].

L'intensité des forces F_1 , F_2 , F_3 et la profondeur de leur point d'application sont comme suit :

$$F_1 = \frac{3}{4} B D_c (p_l - p_0) \qquad D_1 = \frac{5}{9} D_c \qquad (1.10)$$

$$F_2 = B (Z - D_c - \varepsilon D) (p_l - p_0) \qquad D_2 = \frac{1}{2} (z + D_c - \varepsilon D) \qquad (1.11)$$

$$F_3 = B (Z - D - \varepsilon D) (p_l - p_0) \qquad D_3 = \frac{1}{2} (z + D + \varepsilon D) \qquad (1.12)$$

Le facteur ε , de l'ordre de 0.05, peut en général être négligé.

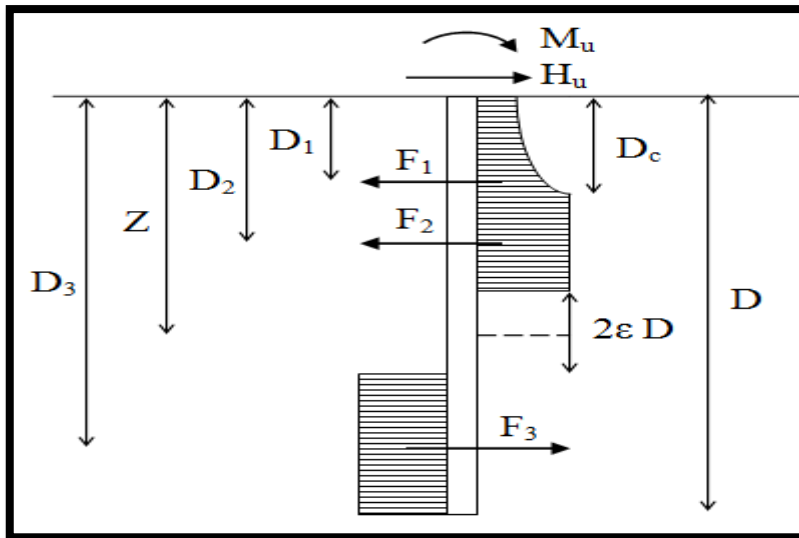


Figure 1.23: Schéma de rupture selon Ménard [12].

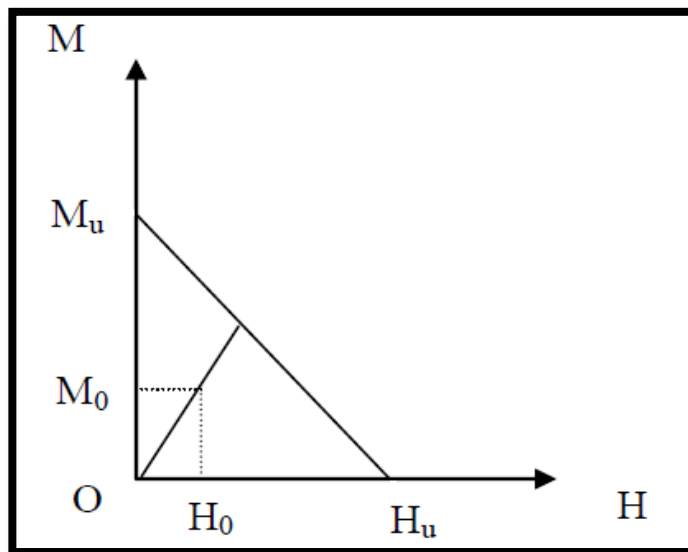


Figure 1.24: Critère de stabilité latérale selon Ménard [12].

Une zone neutre de passage de la butée à la contre butée, épaisse de $2\mathcal{E}D$, est introduite pour tenir compte de la faible mobilisation des pressions dans cette zone. Le facteur \mathcal{E} de l'ordre de 0.05 peut être en général être négligé. L'auteur a proposé d'écrire Les valeurs limites à partir de l'équilibre statique, ce qui donne :

$$H_u = \alpha_1 B D (p_l - p_0) \quad (1.13)$$

$$M_u = \alpha_2 B D^2 (p_l - p_0) \quad (1.14)$$

α_1 et α_2 sont des coefficients numériques fonction du rapport D_c/D et qui sont donnés dans le Tableau ci-après :

Tableau 1.4 : Valeurs des coefficients numériques α_1 et α_2 en fonction de D_c/D .

D_c/D	α_1	α_2
0.00	0.41	0.25
0.25	0.36	0.22
0.50	0.32	0.19
0.66	0.30	0.17
∞	0.20	0.13

Si le pieu est sollicité simultanément en tête par un effort horizontal H_0 et un moment M_0 , il est nécessaire de vérifier le critère de stabilité en s'assurant que le point représentatif des efforts dans un système de coordonnées (M,H) est situé à l'intérieur du triangle limité par les axes de coordonnées et la droite joignant les points de coordonnées $(H_u,0)$ et $(M_u,0)$. Les efforts admissibles en tête seront tel que : $H_0 \leq H_u/3, M_0 \leq M_u/3$.

3. Méthodes de modules de réaction :

3.1. Introduction :

La méthode de Broms (1964) est simple pour estimer la capacité latérale ultime mais ne convient pas pour évaluer les déplacements de pieux. Le recours aux ressorts élastiques pour modéliser le comportement du sol peut présenter cet avantage. La méthode des ressorts assimile le comportement d'un pieu à celui d'une poutre élastique reposant sur une série de ressorts rapprochés découplés (Figure 1.25). Cette méthode relie le comportement du sol (réaction du sol (P)) au comportement du pieu (déplacement (y)) sous un chargement avec un coefficient de proportionnalité dit le module de réaction (E_s).

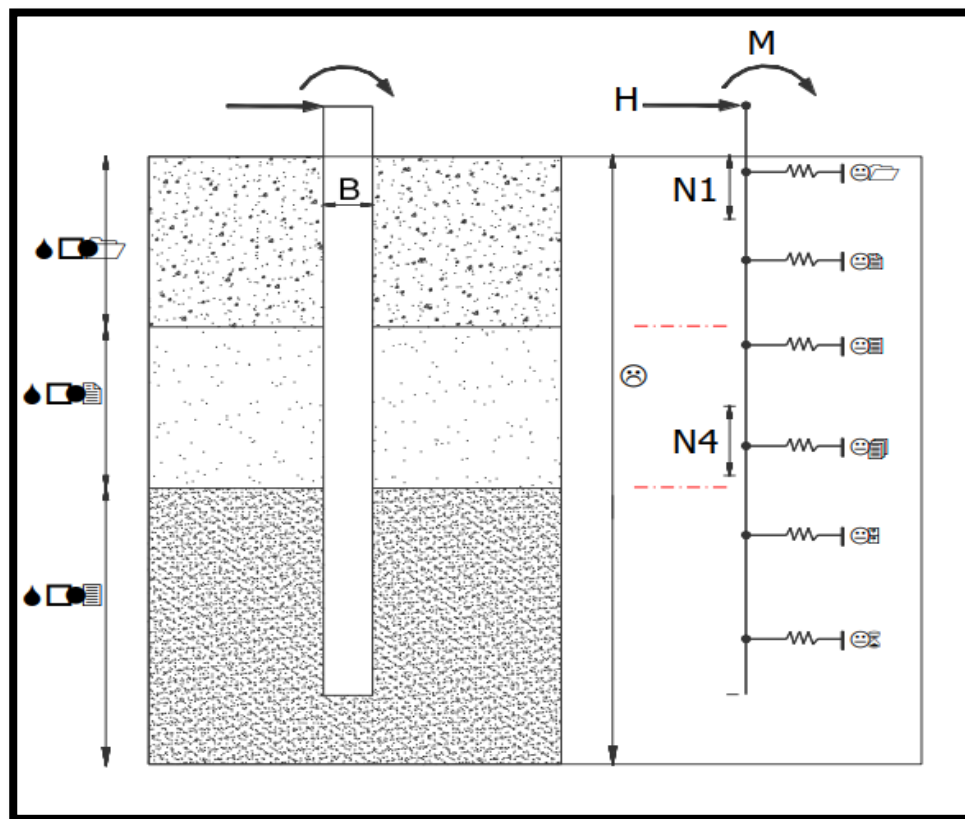


Figure 1.25 : Modèle basé sur la théorie de Winkler [7].

3.2. Développement des courbes de réaction (P-y) :

Le problème majeur pour calculer un pieu sous charges horizontales est la prévision des courbes de réaction (P-y) à chaque profondeur. Des courbes (P-y) ont été développées par de nombreux chercheurs avec plusieurs approches comme par exemple: essais sur modèle

réduit ou en vraie grandeur ou par des équations empiriques (MCIF, 2006). Deux éléments importants caractérisent les courbes (P-y) : E_s et P_{ult} . (Figure 1.26). En général, ces courbes sont non linéaires et varient avec la profondeur. Par ailleurs, elles sont en fonction de type du sol et des caractéristiques de pieux. Même, dans un continuum élastique linéaire, parfaitement plastique, la courbe (P-y) ne se présente pas réellement comme une droite qui représente la réponse linéaire puis à un palier (limite élastique et début de la plastification autour du pieu).

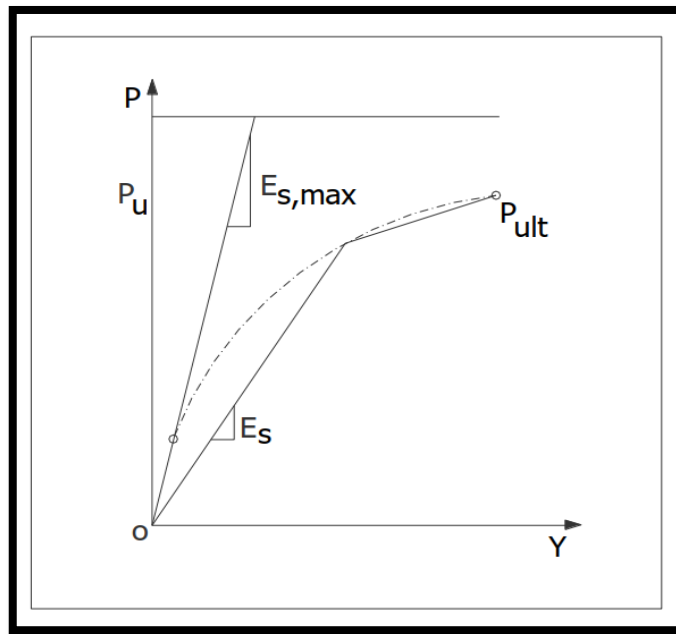


Figure 1.26 : Courbe (P-y) incluant P_u et E_s [7].

La résolution des équations des poutres sur des appuis élastiques (Tableau 1.5) (Timoshenko, 1955; Hetenyi, 1946) donne les efforts tranchants, les moments fléchissant, les déplacements et la réaction du sol à toutes les profondeurs dans le cas où le module de réaction (E_s) est constant (Reese et al, 2006; Frank, 1984; 1995). Par contre, dans les cas tels que le module de réaction du sol et la rigidité (EI) de pieux forés sont non linéaires, le pieu soumis à des poussées latérales du sol et pour les différentes conditions aux limites de pieu (tête et pointe), on doit avoir recours à des logiciels spécialisés (ex : LPILE).

Tableau 1.5 : Équations des poutres sur appuis élastiques pour l'analyse des pieux sous charges latérales [7].

Paramètre	Équation
équation différentielle de 4eme ordre	$EI \frac{d^4y}{dx^4} + P \frac{d^2y}{dx^2} + Es.y$
rotation de la section de pieu	$S_p = \frac{dy}{dx}$
moment fléchissant	$M_p = EI \frac{d^2y}{dx^2}$
effort tranchant	$V_p = \frac{dM_p}{dx} = EI \frac{d^3y}{dx^3}$
réaction du sol (*)	$P = -\frac{dV_p}{dx} = -EI \frac{d^4y}{dx^4}$

Note : x = coordonnée (origine en tête de pieu), y = déplacement latéral de pieu, Es = module du sol, P = charge axiale (compression) et EI = rigidité à la flexion du pieu.

(*) : Le signe de la réaction du sol est contraire de signe de l'effort tranchant.

4. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une synthèse bibliographique donnant des généralités sur les pieux, leurs modes de fonctionnement, leurs modes d'installations et ainsi leurs classifications. Cette étude permet de définir les différents critères influant le choix de type de pieu à utiliser dans l'ouvrage à réaliser.

Nous avons aussi fait une présentation des méthodes de calcul théoriques, semi-empirique et les méthodes empiriques simplifiées de chargement latéral, ainsi que les possibilités et les limites de chaque méthode.

**Chapitre 02 : Développement
d'un programme de calcul d'un
pieu isolé sous chargement
latéral**

1. Introduction :

Les enjeux sociaux et économiques de nos jours amènent l'ingénieur à résoudre des problèmes géotechniques de plus en plus complexes. Pour l'exécution et la mise au point de ces projets et vu l'incapacité des méthodes analytiques à résoudre des problématiques complexes et pointues, l'ingénieur a recours aux méthodes qui lui permettent de simuler ce type de problèmes.

Dans le cas des pieux, ces derniers sont sujets à différents modes de chargement (axiaux, latéraux, et combinés). Dans le cas des pieux sous chargement latéraux, la méthode à jour de ces dernières années est la méthode du module de réaction communément appelée théorie des courbes P-Y. Elle se considère la plus performante vu son grand champ d'application.

Pour intérêt de raccourcir les longues étapes de calcul, nous allons développer un programme, cela veut dire la rédaction d'un code source afin d'accomplir des tâches de besoin.

L'exploitation de Codage se fait à partir d'un des outils de programmation suivants qui vont traduire le code introduit à des méthodes de calculs. On peut citer: Python, FORTRAN, Matlab, VB.NET...etc.

De ce fait, l'objectif de ce chapitre consiste à mettre au point un programme de calcul de pieux sous chargement latéral à partir de courbes P-y et ceci en utilisant le langage de programmation VB.NET.

2. Hypothèses de calculs :

Les hypothèses de calcul sur lesquelles se base le logiciel SPULL-PARECT sont les suivantes :

- Parfaite adhérence de système sol/pieu.
- Contraintes de cisaillement horizontal sont négligeable.
- $\tau(z)$ vertical et uniforme autour de la section du pieu (périmètre).
- La courbe de réaction est décrite par une fonction PARECT (parabole-rectangle).

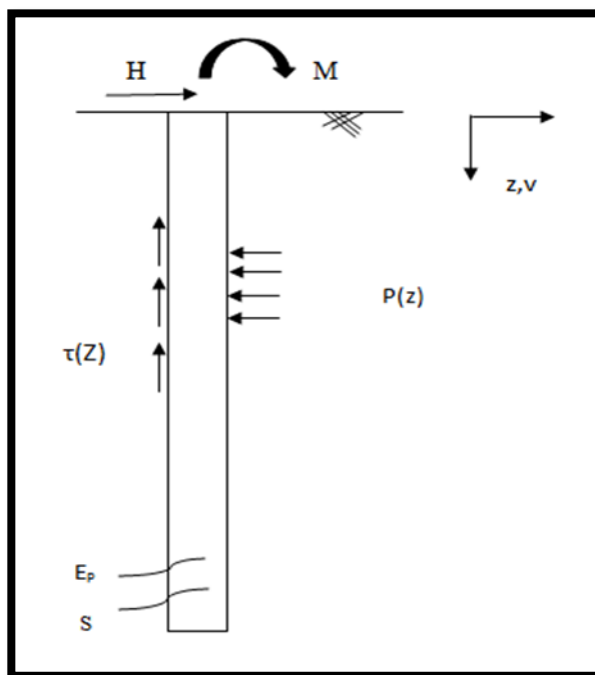


Figure 2.1 : schéma des hypothèses de calcul.

2.1. Propriétés de la fonction parabole-rectangle :

2.1.1. Charge critique :

On voit que :

$x_c = \frac{y_1}{a}$ déplacement critique = seuil du comportement non linéaire (domaine des moyens déplacements).

- Calculons la charge critique :

$$y_c = 2y_1 \left(\frac{x_c}{x_1} \right) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{x_c}{x_1} \right) = 2y_1 \cdot \frac{y_1}{ax_1} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{y_1}{ax_1} \right). \quad (2.1)$$

$y_c = y(1 - \frac{1}{4}) = \frac{3y_1}{4} y_c = \frac{3y_1}{4}$: est la charge critique. Elle correspond au déplacement critique $x_c = \frac{3y_1}{4}$.

Le seuil du comportement plastique ($x \geq x_1$) est appelé déplacement du référence ou déplacement ultime : $x_r = \frac{2y_1}{a} = x_1$.

On croit que : $x_r = 2x_c$.

2.1.2. Rigidité sécante et tangente :

- Rigidité sécante : $k_t = \frac{dy}{dx} = a - \frac{ax}{x_1} = a(1 - \frac{x}{x_1})$. (2.2)

- Rigidité tangente : $k_s = \frac{y}{x} = a - \frac{1}{2}a(\frac{x}{x_1})$. (2.3)

On voit que lorsque 'on atteint le comportement plastique :

$x = x_R \rightarrow k_s = a - \frac{ax_1}{2x_1} = \frac{a}{2} \rightarrow$ la rigidité diminue de la moitié.

2.1.3. Fonction impaire :

On écrit dans ce cas : $Y = 2y \cdot \frac{x}{x_1} (1 - \frac{1}{2} \frac{|x|}{x_1})$. (2.4)

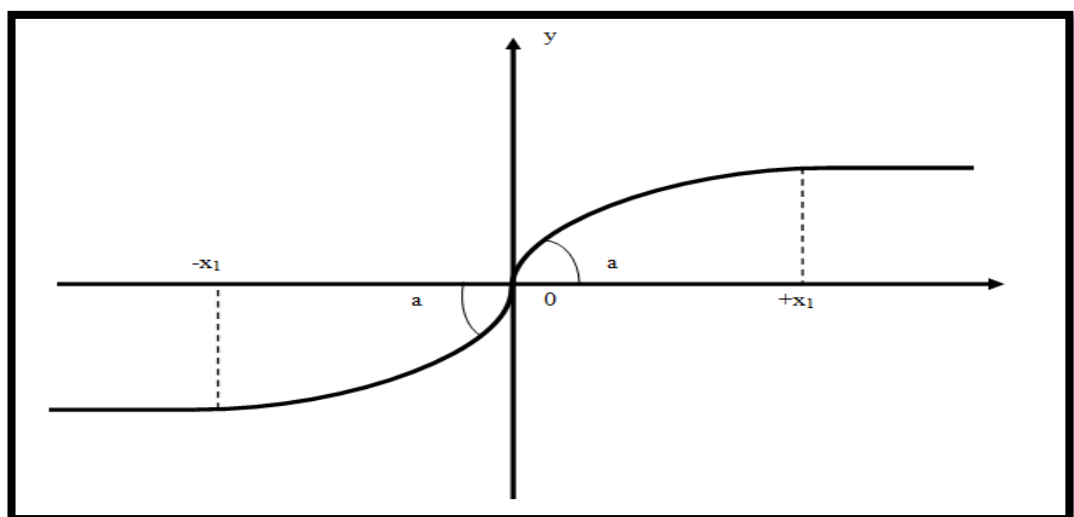


Figure 2.2 : fonction impaire de PARECT.

2.1.4. Nombre des points expérimentaux N :

Pour que l'ajustement par une parabole soit possible il faut que $N \geq 3$, et pour ajuster les derniers points (N_{i+1} , N) par une droite horizontale il faut que $N - N_1 \geq 3$:

$$N - N_1 \geq 3 \rightarrow N \geq N_1 + 3 \geq 6 \text{ points.}$$

Le nombre minimum de points expérimentaux est donc 6.

On a les caractéristiques de la fonction PARECT :

$$\begin{cases} F(x) = a \cdot x - \frac{a \cdot x^2}{2x_1} & \text{si : } x \leq x_1 \quad (\text{avec } x_1 = x_r) & (2.5) \\ F(x) = y_u & \text{si : } x \geq x_1 & (2.6) \end{cases}$$

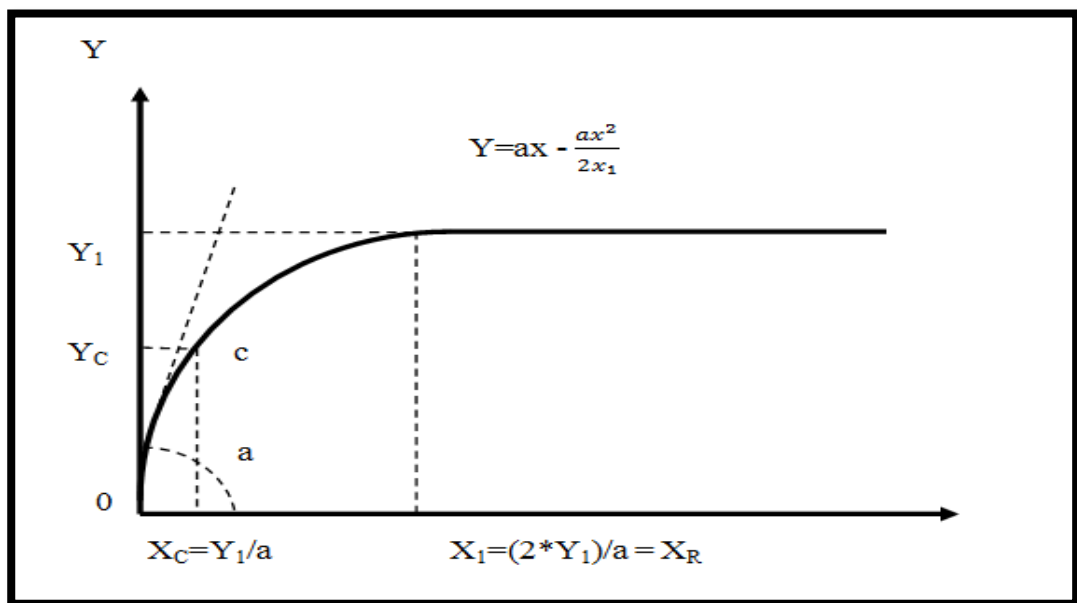


Figure 2.3 : Courbe Parabole-Rectangle.

$$\text{Et : } x_r = 2 \cdot y_u / ab \longrightarrow b y_r = 2 \cdot P_{ult} / E_s \quad (2.7)$$

- La fonction PARECT devient:

$$\begin{cases} P(z) = E_s \cdot y(z) - \frac{E_s \cdot y^2(z)}{4 \frac{P_{ult}}{E_s}} & \text{si : } y \leq y_r & (2.8) \\ P(z) = P_{ult} & \text{si : } y \geq y_r & (2.9) \end{cases}$$

- L'avantage de cette formule est qu'elle permet d'atteindre l'asymptote horizontale (la réaction latérale ultime du sol P_{ult}) pour un déplacement $y(z)$ fini
- Le comportement de l'interface sol-pieu à chaque profondeur Z est représenté par la réaction du sol $P(z) = ES(z).y(z)$.
 - Dans un cas simple d'un sol homogène et dont les déplacements suivent un comportement linéaire on peut utiliser les méthodes traditionnelles ; mais on ne peut pas traiter ce type de problème dans un cas plus compliqué comme un sol hétérogène et une réponse latéral non linéaire du système sol/pieu.
 - La méthode des courbes p-y est largement utilisé pour les pieux rigides, sa courbe aux petits déformations est défini par une pente E_{ti} qui est le module de réaction initiale, une réaction latérale ultime P_u et les déplacements y comme le schématise la figure 2.4 ; et pour les grands déplacements la courbe est définie par une pente dites E_s .

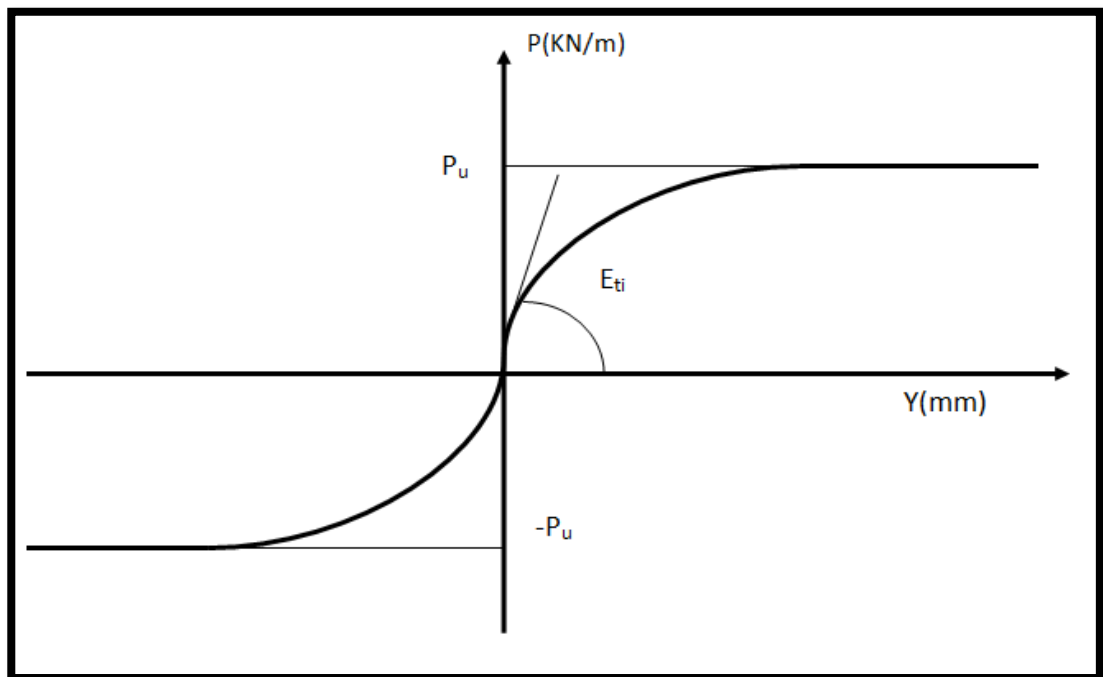


Figure 2.4 : Courbe P-Y.

On considère une section constante le long du pieu :

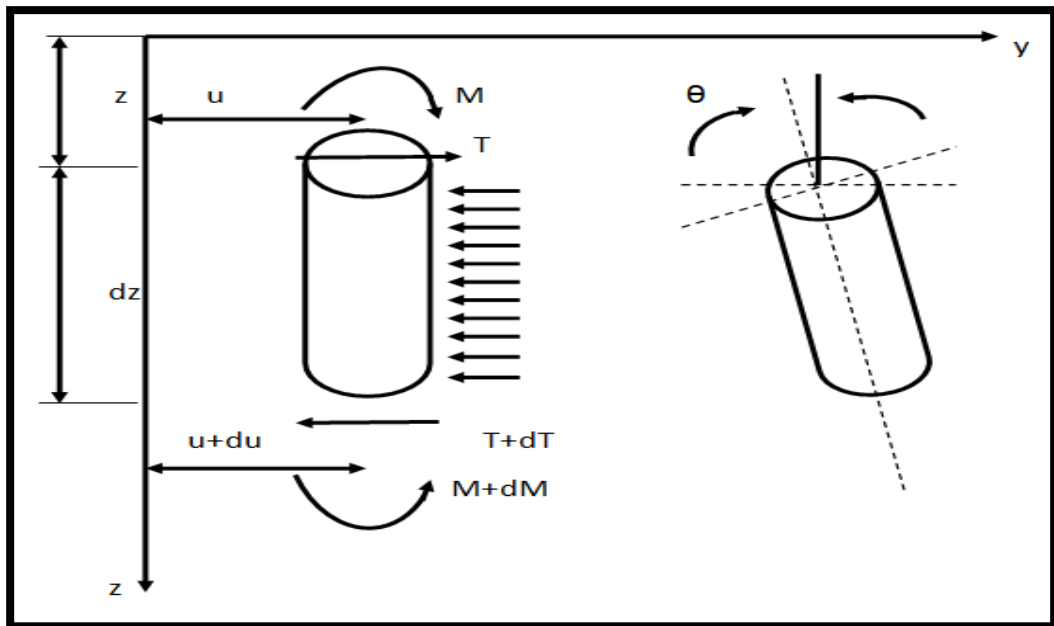


Figure 2.5 : Une colonne d'élément du pieu (d'après Hetenyi 1946).

- On calcule la somme des forces horizontal par l'équilibre des forces :

$$\sum F_y = 0 \quad \leftrightarrow \quad T - (T+dT) - P(z).dz = 0 \quad (2.10)$$

$$P(z) = -\frac{dT}{dz} \quad (2.11)$$

- On calcule la somme des moments par rapport au point o :

$$\sum M/O = 0$$

- On néglige l'effort du chargement vertical sur le pieu (N) et on obtient l'équation d'un pieu chargé latéralement :

$$Tdz + M - (M + dM) = 0 \quad \rightarrow \quad Tdz - dM = 0 \quad \rightarrow \quad T = \frac{dM}{dz}$$

$$\frac{dT}{dz} - \frac{d^2M}{dz^2} = 0 \quad (2.12)$$

D'après les lois de mécanique rationnelle on a : $\frac{d^2M}{dz^2} = E_P I_P \frac{d^4u}{dz^4}$ (2.13)

D'après les équations (2.10), (2.11), (2.12) et (2.13) on peut écrire l'équation d'équilibre statique sur un tronçon du pieu comme suite :

$$E_p I_p \frac{d^4 u}{dz^4} + P = 0 \Leftrightarrow E_p I_p \frac{d^4 u}{dz^4} + E_s \cdot u = 0 \quad (2.14)$$

3. Méthodes de calcul :

- L'intégration de l'équation différentielle (2.14) ne peut être atteinte seulement si le module de réaction de sol reste constant quel que soit la profondeur z

L'équation (2.14) devient :

$$E_p I_p \frac{d^4 u}{dz^4} + E_s \cdot u = 0 \quad (2.15)$$

- On fait un changement de variable : $x = z/L_0$

$$\frac{1}{L_0} \frac{d^4 u}{d(\frac{z}{L_0})^4} + \frac{4}{4} \frac{E_s \cdot u}{E_p \cdot I_p} = 0 \quad (2.16)$$

- On pose $L_0 = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_p \cdot I_p}{E_s}}$ (L_0 : La longueur élastique du pieu) (2.17)

- On obtient l'équation différentielle comme suit : $\frac{d^4 u}{dx^4} + 4u = 0$ (2.18)

-Si le sol est homogène, on considère que le module de réaction du sol est constant à une profondeur z donnée, elle peut être résolue par les lois mathématiques.

$$u(x) = e^{\alpha x} (k_1 \cdot \cos \beta x + k_2 \cdot \sin \beta x) + e^{-\alpha x} (k_3 \cdot \cos \beta x + k_4 \cdot \sin \beta x) \quad (2.19)$$

Avec : λ, μ, η sont des constantes utilisé pour simplifier les équations.

Les dérivés successifs de l'équation différentielle (2.14) :

$$\frac{du}{dx} = e^{\alpha x} (\lambda_1 \cdot \cos \beta x + \lambda_2 \cdot \sin \beta x) + e^{-\alpha x} (\lambda_3 \cdot \cos \beta x + \lambda_4 \cdot \sin \beta x) \quad (2.20)$$

Avec :

$$\lambda_1 = \alpha \cdot k_1 + \beta \cdot k_2, \quad \lambda_2 = \alpha \cdot k_2 - \beta \cdot k_1$$

$$\lambda_3 = -\alpha \cdot k_3 + \beta \cdot k_4, \quad \lambda_4 = -\alpha \cdot k_4 - \beta \cdot k_3$$

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = e^{\alpha x} (\mu_1 \cdot \cos \beta x + \mu_2 \cdot \sin \beta x) + e^{-\alpha x} (\mu_3 \cdot \cos \beta x + \mu_4 \cdot \sin \beta x) \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \alpha.\lambda_1 + \beta.\lambda_2 & , & & \mu_2 &= \alpha.\lambda_2 - \beta.\lambda_1 \\ \mu_3 &= -\alpha.\lambda_3 + \beta.\lambda_4 & , & & \mu_4 &= -\alpha.\lambda_4 - \beta.\lambda_3 \\ \frac{d^3 u}{dx^3} &= e^{\alpha x} (\eta_1.\cos\beta x + \eta_2.\sin\beta x) + e^{-\alpha x} (\eta_3.\cos\beta x + \eta_4.\sin\beta x) \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \alpha.\mu_1 + \beta.\mu_2 & , & & \eta_2 &= \alpha.\mu_2 - \beta.\mu_1 \\ \eta_3 &= -\alpha.\mu_3 + \beta.\mu_4 & , & & \eta_4 &= -\alpha.\mu_4 - \beta.\mu_3 \end{aligned}$$

On a les relations du moment fléchissant, effort tranchant et de la réaction latérale :

$$P = -\frac{dT}{dz} \quad (2.23) \quad , \quad T = \frac{dM}{dz} \quad (2.24) \quad , \quad M = EI \frac{d^2 u}{dz^2} \quad (2.25)$$

-Conditions de continuité :

On a :

$$\begin{aligned} \frac{du(x)}{dx} &= K_1[\alpha.(\cos\beta x) - \beta.(\sin\beta x)].e^{\alpha x} + K_2[\beta.(\cos\beta x) + \alpha.(\sin\beta x)].e^{\alpha x} + \\ &K_3[-\alpha.(\cos\beta x) - \beta.(\sin\beta x)].e^{-\alpha x} + K_4[-\alpha.(\cos\beta x) + \beta.(\sin\beta x)].e^{-\alpha x} \end{aligned} \quad (2.26)$$

• On pose :

$$\begin{aligned} T_1 &= e^{\alpha x} . \cos\beta x & , & & T_2 &= e^{\alpha x} . \sin\beta x \\ T_3 &= e^{-\alpha x} . \cos\beta x & , & & T_4 &= e^{-\alpha x} . \sin\beta x \end{aligned}$$

• On obtient les équations suivantes :

$$u(x) = T_1.K_1 + T_2.k_2 + T_3.K_3 + T_4.k_4 \quad (2.27)$$

$$\frac{du}{dx} = K_1(\alpha.T_1 - \beta.T_2) + K_2(\alpha.T_2 + \beta.T_1) + K_3(-\alpha.T_3 - \beta.T_4) + K_4(-\alpha.T_4 + \beta.T_3) \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u}{dx^2} &= K_1[T_1(\alpha^2 - \beta^2) + T_2(-2\alpha\beta)] + K_2[T_2(2\alpha\beta) + T_2(\alpha^2 - \beta^2)] + \\ &K_3[T_3(\alpha^2 - \beta^2) + T_4(2\alpha\beta)] + K_4[T_3(-2\alpha\beta) + T_4(\alpha^2 - \beta^2)] \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^3 u}{dx^3} &= K_1[T_1(\alpha^3 - 3\alpha\beta^2) + T_2(\beta^3 - 3\beta\alpha^2)] + K_2[T_1(3\alpha^2\beta - \beta^3) + T_2(\alpha^3 - 3\alpha\beta)] + \\ &K_3[T_3(-\alpha^3 + 3\alpha\beta^2) + T_4(\beta^3 - 3\beta\alpha^2)] + K_4[T_1(3\alpha^2\beta - \beta^3) + T_4(-\alpha^3 + 3\alpha\beta)] \end{aligned} \quad (2.30)$$

- On pose:

$$S = \alpha^3 - 3\alpha\beta^2 = \lambda_1 \quad , \quad U = \beta^3 - 3\beta\alpha^2 = -\lambda_2$$

$$R = \alpha^2 - \beta^2 \quad , \quad P = 2\alpha\beta$$

- On aura l'écriture suivante:

$$u(x) = k_1.T_1 + k_2.T_2 + K_3.T_3 + K_4.T_4$$

$$\frac{du}{dx} = K_1 \underbrace{(\alpha T_1 - \beta T_2)}_{B_1} + K_2 \underbrace{(\alpha T_2 + \beta T_1)}_{B_2} + K_3 \underbrace{(-\alpha T_3 - \beta T_4)}_{B_3} + K_4 \underbrace{(-\alpha T_4 + \beta T_3)}_{B_4} \quad (2.31)$$

$$\text{Rot}(z) = \frac{du}{dz} = \frac{1}{L_0} (K_1 B_1 + K_2 B_2 + K_3 B_3 + K_4 B_4) \quad (2.32)$$

$$\frac{d^2u}{dx^2} = K_1 \underbrace{[T_1.R - T_2.P]}_{C_1} + K_2 \underbrace{[T_1.P + T_2.R]}_{C_2} + K_3 \underbrace{[T_3.R + T_4.P]}_{C_3} + K_4 \underbrace{[-T_3.P + T_4.R]}_{C_4} \quad (2.33)$$

$$M(z) = \frac{EI}{L_0^2} (K_1.C_1 + K_2.C_2 + K_3.C_3 + K_4.C_4) \quad (2.34)$$

$$\frac{d^3u}{dx^3} = K_1 \underbrace{[T_1.S + T_2.U]}_{E_1} + K_2 \underbrace{[-T_1.U + T_2.S]}_{E_2} + K_3 \underbrace{[-T_3.S + T_4.U]}_{E_3} + K_4 \underbrace{[-T_3.U + T_4.S]}_{E_4} \quad (2.35)$$

$$T(z) = \frac{EI}{L_0^3} (K_1.E_1 + K_2.E_2 + K_3.E_3 + K_4.E_4) \quad (2.36)$$

-Effort tranchant :

$$T(z) = EI \cdot \frac{d^3u}{dz^3} = \frac{EI}{L_0^3} \left(\frac{d^3u}{dx^3} \right) \quad (2.37)$$

- Continuité des déplacements à l'interface i :

$$K_1^i.T_1^i + K_2^i.T_2^i + K_3^i.T_3^i + K_4^i.T_4^i = K_1^{i+1}.T_1^{i+1} + K_2^{i+1}.T_2^{i+1} + K_3^{i+1}.T_3^{i+1} + K_4^{i+1}.T_4^{i+1}$$

- Continuité des rotations :

$$\frac{1}{L_0^i} (K_1^i.B_1^i + K_2^i.B_2^i + K_3^i.B_3^i + K_4^i.B_4^i) = \frac{1}{L_0^{i+1}} (K_1^{i+1}.B_1^{i+1} + K_2^{i+1}.B_2^{i+1} + K_3^{i+1}.B_3^{i+1} + K_4^{i+1}.B_4^{i+1})$$

$K^{i+1}.B_4^{i+1})$

- Continuité des moments de flexion :

$$\frac{EI}{L_0^{2i}} * (K_1^i.C_1^i + K_2^i.C_2^i + K_3^i.C_3^i + K_4^i.C_4^i) = (K_1^{i+1}.C_1^{i+1} + K_2^{i+1}.C_2^{i+1} + K_3^{i+1}.C_3^{i+1} + K_4^{i+1}.C_4^{i+1}) * \frac{EI}{L_0^{2i+1}}$$

$$L_{0i} = \sqrt[4]{\frac{4EpIp}{ES_i}} \quad (2.38)$$

$$L_{0i+1} = \sqrt[4]{\frac{4EpIp}{ES_{i+1}}} \quad (2.39)$$

- Continuité des efforts tranchants:

$$K_1^i.E_1^i + K_2^i.E_2^i + K_3^i.E_3^i + K_4^i.E_4^i = K_1^{i+1}.E_1^{i+1} + K_2^{i+1}.E_2^{i+1} + K_3^{i+1}.E_3^{i+1} + K_4^{i+1}.E_4^{i+1}$$

- Condition aux limites en tête :

$$H = E_P I_P \frac{d^3 u}{dz^3} \Big|_{z=0} \quad (2.40)$$

$$M = E_P I_P \frac{d^2 u}{dz^2} \Big|_{z=0} \quad (2.41)$$

- Conditions aux limites en pointe :

$$y_p = u(x)_{x=D/L_0} \quad (2.42)$$

$$ROTP = Y'_p = \frac{1}{L_0} \left(\frac{du}{dx} \right) \Big|_{x=D/L_0} \quad (2.43)$$

$$\text{Ou : } M_p = E_P I_P \frac{d^2 u}{dz^2} \Big|_{z=D} \quad (2.44)$$

$$T_p = E_P I_P \frac{d^3 u}{dz^3} \Big|_{z=D}$$

Considérons, pour des raisons de clarté, le cas simple d'une bicouche :

En pointe : y_p , ROTP sont connus

Y_p : le déplacement latéral en pointe

Y'_p : la rotation en pointe

M_p : le moment de flexion en pointe

T_p : l'effort tranchant en pointe

- Conditions de continuité :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1^1 \cdot T_1^1 + K_2^1 \cdot T_2^1 + K_3^1 \cdot T_3^1 + K_4^1 \cdot T_4^1 - K_1^2 \cdot T_1^2 - K_2^2 \cdot T_2^2 - K_3^2 \cdot T_3^2 - K_4^2 \cdot T_4^2 = 0 \\ K_1^1 \cdot B_1^1 + K_2^1 \cdot B_2^1 + K_3^1 \cdot B_3^1 + K_4^1 \cdot B_4^1 - K_1^2 \cdot B_1^2 - K_2^2 \cdot B_2^2 - K_3^2 \cdot B_3^2 - K_4^2 \cdot B_4^2 = 0 \\ \frac{EI}{L_0^2} \cdot (K_1^1 \cdot C_1 + K_2^1 \cdot C_2 + K_3^1 \cdot C_3 + K_4^1 \cdot C_4) - \frac{EI}{L_0^2} \cdot (K_1^2 \cdot C_1^2 - K_2^2 \cdot C_2^2 - K_3^2 \cdot C_3^2 - K_4^2 \cdot C_4^2) = 0 \\ K_1^1 \cdot E_1^1 + K_2^1 \cdot E_2^1 + K_3^1 \cdot E_3^1 + K_4^1 \cdot E_4^1 - K_1^2 \cdot E_1^2 - K_2^2 \cdot E_2^2 - K_3^2 \cdot E_3^2 - K_4^2 \cdot E_4^2 = 0 \\ K_1^1 \cdot T_1^1 + K_2^2 \cdot T_2^2 + K_3^2 \cdot T_3^2 + K_4^2 \cdot T_4^2 = Y_P \\ 0 + 0 + 0 + 0 + K_1^2 \cdot B_1^2 + K_2^2 \cdot B_2^2 + K_3^2 \cdot B_3^2 + K_4^2 \cdot B_4^2 = ROTP \\ K_1^1 \cdot E_1^1 + K_2^1 \cdot E_2^1 + K_3^1 \cdot E_3^1 + K_4^1 \cdot E_4^1 + 0 + 0 + 0 + 0 = H \\ \frac{EI}{L_0^2} \cdot (K_1^1 \cdot C_1^1 + K_2^1 \cdot C_2^1 + K_3^1 \cdot C_3^1 + K_4^1 \cdot C_4^1) + 0 + 0 + 0 + 0 = M \end{array} \right.$$

- D'après les conditions de continuités, on a le système d'équation sous forme matricielle suivant :

$$[H] \cdot (X) = (B)$$

[H] : Matrice des coefficients d'ordre 4N*4N

(X) : Vecteur de 4N inconnues des constantes d'intégration

(B) : vecteur d'ordre 4N des conditions aux limites

Cette matrice comporte des Blocs sous la forme suivante :

$$\text{Avec : } \left[\text{Bloc N} \right] = \begin{pmatrix} T_1 & T_2 & T_3 & T_4 \\ B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \\ C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ E_1 & E_2 & E_3 & E_4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix}
 \left[\text{Bloc 1} \right] \left[-\text{Bloc 2} \right] & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \left[\text{Bloc 2} \right] \left[-\text{Bloc 3} \right] & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \left[\text{Bloc 3} \right] \left[-\text{Bloc 4} \right] & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \left[\text{Bloc N-3} \right] \left[-\text{Bloc N-2} \right] & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \left[\text{Bloc N-2} \right] \left[-\text{Bloc N-1} \right] & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \left[\text{Bloc N-1} \right] \left[-\text{Bloc N} \right] \\
 E_1^1 & E_2^1 & E_3^1 & E_4^1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 C_1^1 & C_2^1 & C_3^1 & C_4^1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & T_1^2 & T_2^2 & T_3^2 & T_4^2 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & B_1^2 & B_2^2 & B_3^2 & B_4^2
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 K_1^1 \\
 K_2^1 \\
 K_3^1 \\
 K_4^1 \\
 \dots \\
 \dots \\
 \dots \\
 K_1^5 \\
 K_2^5 \\
 K_3^5 \\
 K_4^5
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 H \\
 M \\
 Y_p \\
 \text{Rot}
 \end{pmatrix}$$

- Le cas au-dessus représente la forme matricielle $[H].(X)=(B)$ c'est le d'une étude d'un sol bicouche divisé en tranches minces avec nombre de tranches = 5 et nombres d'interfaces =4
- H et M sont les conditions en tête du pieu (l'effort tranchant et le moment de flexion)
- Y_p , Rot_p , T_p , M_p sont les conditions en pointe du pieu (Déplacement horizontal, Rotation, effort tranchant, moment de flexion)
- Il y a 6 cas pour formuler se système matricielle, tout dépend les conditions aux limites en pointe introduites dans le vecteur (X), par contre les conditions aux limites en surface reste inchangeable :

1. Moment M_p et Effort tranchant T_p
2. Moment M_p et déplacement Y_p
3. Moment M_p et Rotation Y'_p
4. Effort tranchant T_p et Déplacement Y_p
5. Effort tranchant T_p et déplacement Y_p
6. Déplacement Y_p et Rotation Y'_p
7. Courbe $M_p=f(Y'_p)$ et $T_p=g(Y_p)$

4. Programme SPULL-PARECT version DOS :

4.1 Introduction :

Le logiciel SPULL-PARECT MS DOS est basé sur la théorie de module de réaction (courbe P-y) qui permet de faire un calcul automatique du pieu isolé chargé latéralement. Cette dernière est basée sur la théorie de Winkler qui assimile le comportement d'un pieu à celui d'une poutre élastique reposant sur une série de ressort.

La prise en compte du comportement non linéaire de l'interface sol/pieu ainsi que l'hétérogénéité des propriétés du sol avec la profondeur fait du logiciel SPULL-PARECT MS DOS un outil puissant pour la conception et le calcul des pieux dans un projet de Fondations.

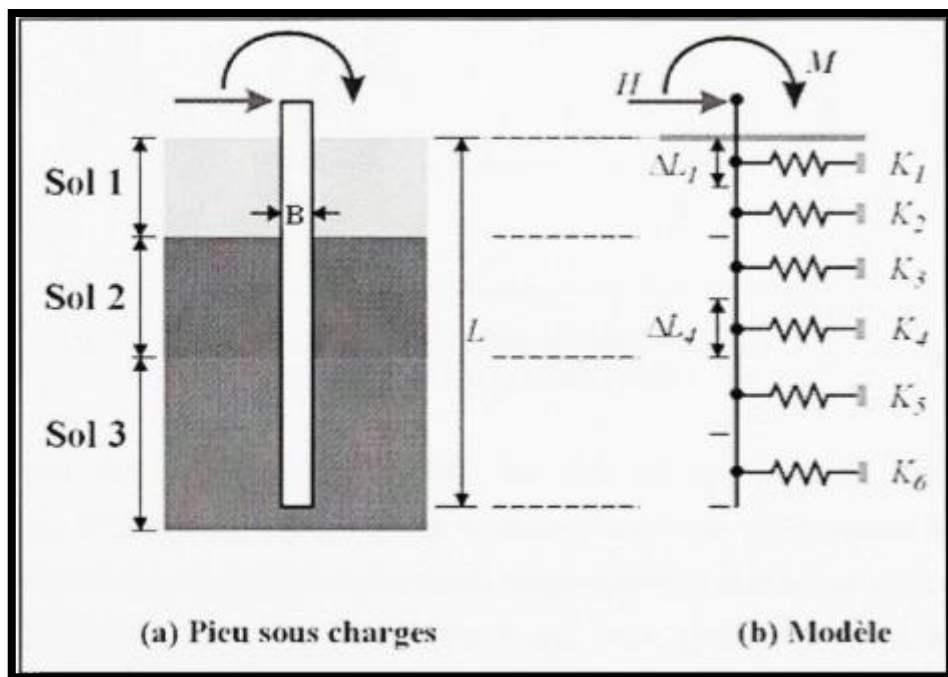
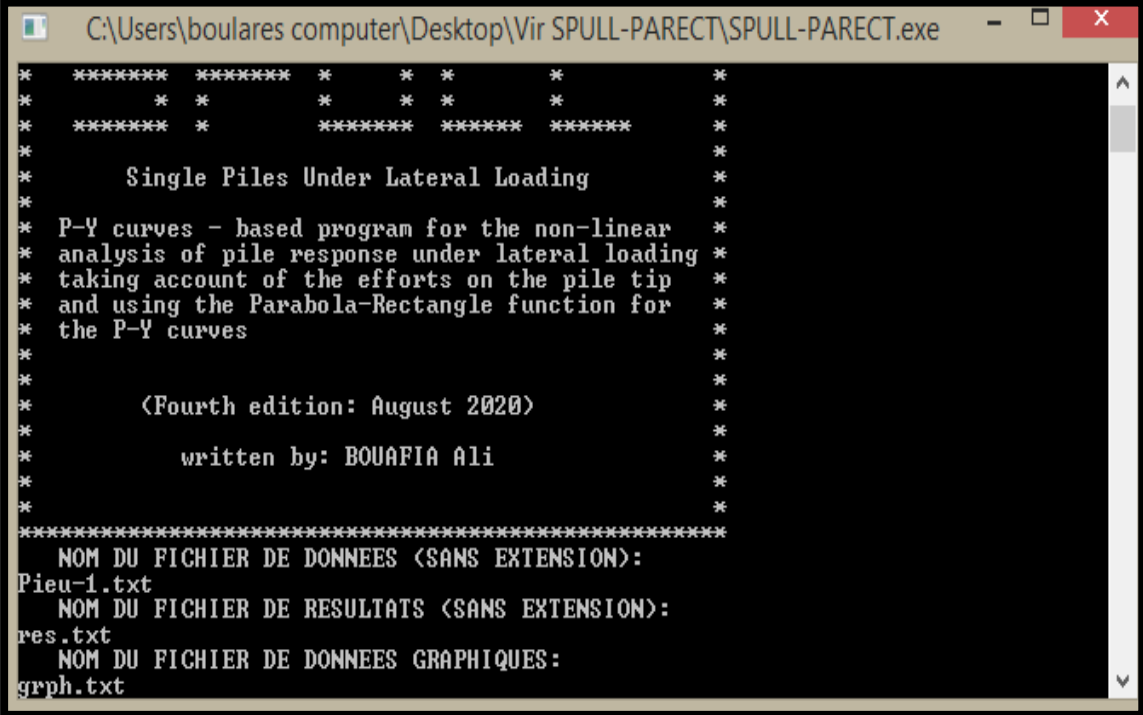


Figure 2.6 : Modèle basé sur la théorie de Winkler.

Le logiciel SPULL-PARECT MS DOS a été développé numériquement avec le langage fortran 95 a été toujours le principal langage utilisé dans les champs de programmation scientifique, numérique et de l'ingénieur.

L'interface de logiciel SPULL MS DOS s'affiche comme le montre la figure 2.7 :



```
C:\Users\boulares computer\Desktop\Vir SPULL-PARECT\SPULL-PARECT.exe
* ***** * * * * *
* * * * *
* ***** * ***** *****
*
*      Single Piles Under Lateral Loading
*
* P-Y curves - based program for the non-linear
* analysis of pile response under lateral loading
* taking account of the efforts on the pile tip
* and using the Parabola-Rectangle function for
* the P-Y curves
*
*
*      (Fourth edition: August 2020)
*
*      written by: BOUAFIA Ali
*
*
* *****
* NOM DU FICHIER DE DONNEES (SANS EXTENSION):
* Pieu-1.txt
* NOM DU FICHIER DE RESULTATS (SANS EXTENSION):
* res.txt
* NOM DU FICHIER DE DONNEES GRAPHIQUES:
* grph.txt
```

Figure 2.7: L'interface de programme SPULL-PARECT MS-DOS.

Le code source développe en 800 lignes contient 1 programme principal et 3 Sous programmes.

Le programme principal contient 3 fichiers texte, le premier notée **Pieu-1** pour entrer les données, le deuxième notée **res** pour afficher un rapport d'analyse et le troisième fichier pour **grph** pour afficher les résultats pour dessiner les graphiques.

Les 3 sous programmes sont les suivants :

- 1) le sous-programme **HMAT** : Ce sous-programme lorsqu'il est appelé par le programme principal il effectue le remplissage de la matrice H.
- 2) le sous-programme **RESOL** : Le sous-programme RESOL à la tâche de résoudre system d'équation et ainsi déterminer les constantes d'intégrations.
- 3) le sous-programme **TEST**: ce sous-programme effectue le test de convergence des itérations.

-Le fichier des données que le programme principal importe, doit être sous un format texte.

Le fichier texte doit suivre l'ordre suivant :

- 1e ligne : Nom du projet,
- 2e ligne : Localisation du projet,
- 3e ligne : Date
- 4e ligne : Nom de l'opérateur,
- 5e ligne : mode de contrôle de la convergence des résultats

Mode = 1 : contrôle convergence par différence relative

Mode = 2 : contrôle convergence par différence absolue

- 6e ligne : epsilon
- 7e ligne : diamètre du pieu, fiche du pieu, rigidité relative pieu/sol, rigidité à la flexion du pieu, nombre de tranches.
- 8^e ligne : les tranches, les profondeurs, les réactions latérales limite du sol, le module de réaction du sol.

Le fichier des données est comme suite:

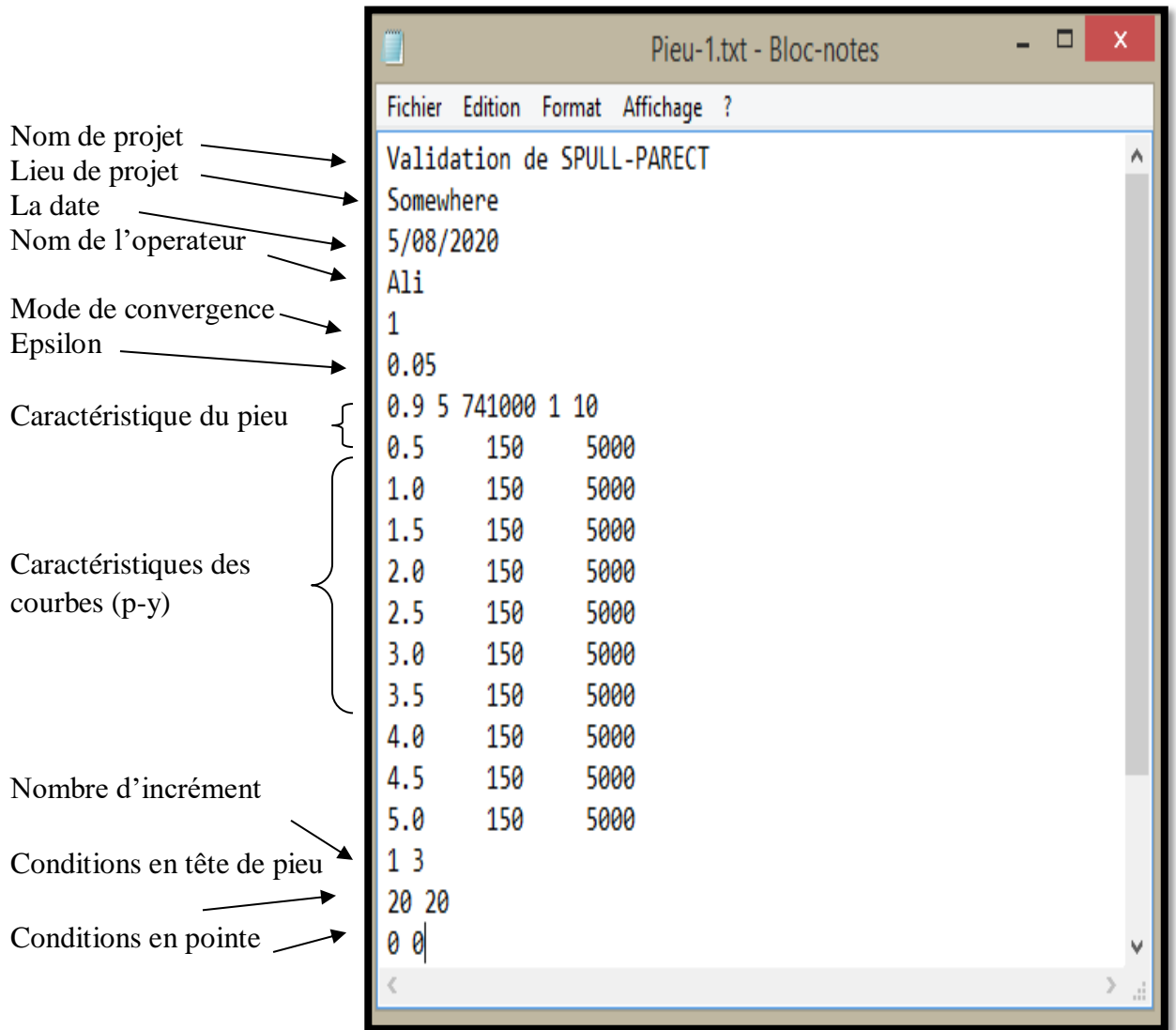


Figure 2.8: Le fichier des données de programme SPULL-PARECT MS-DOS.

Une fois on fait entré le nom du fichier des résultats est on exécute le programme, ce dernier crée un fichier texte dans lequel on trouve tous les résultats, comme l'indique la figure ci-dessous, ou on trouve les informations suivantes:

1. Le fichier des données « Pieu-1 » :

Les données nécessaires seront introduites sous forme d'un fichier texte avec un ordre précis Comme suit :

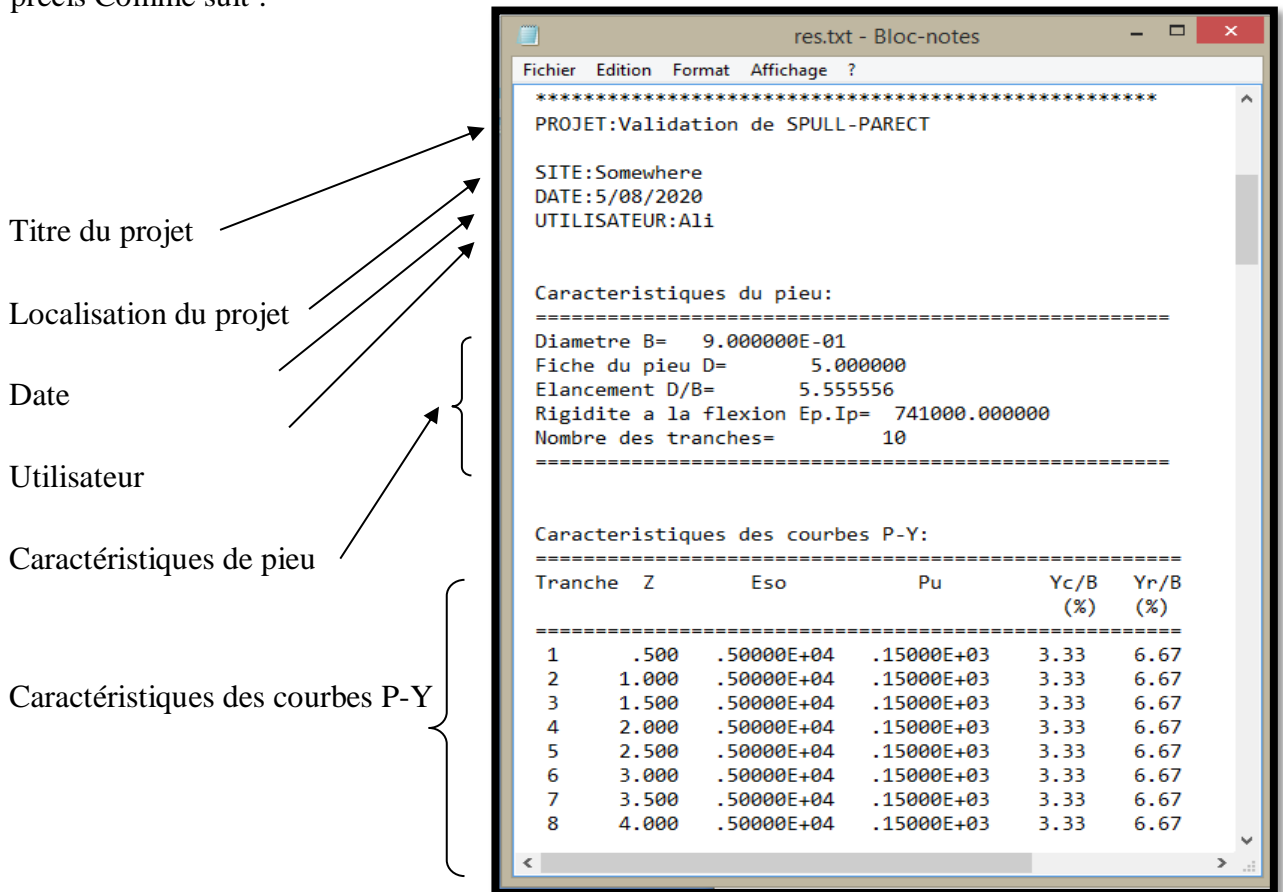


Figure 2.9 : Les fichiers d'affichage de programme SPULL-PARECT MS-DOS.

2. Les fichiers des résultats « res » et « grph » :

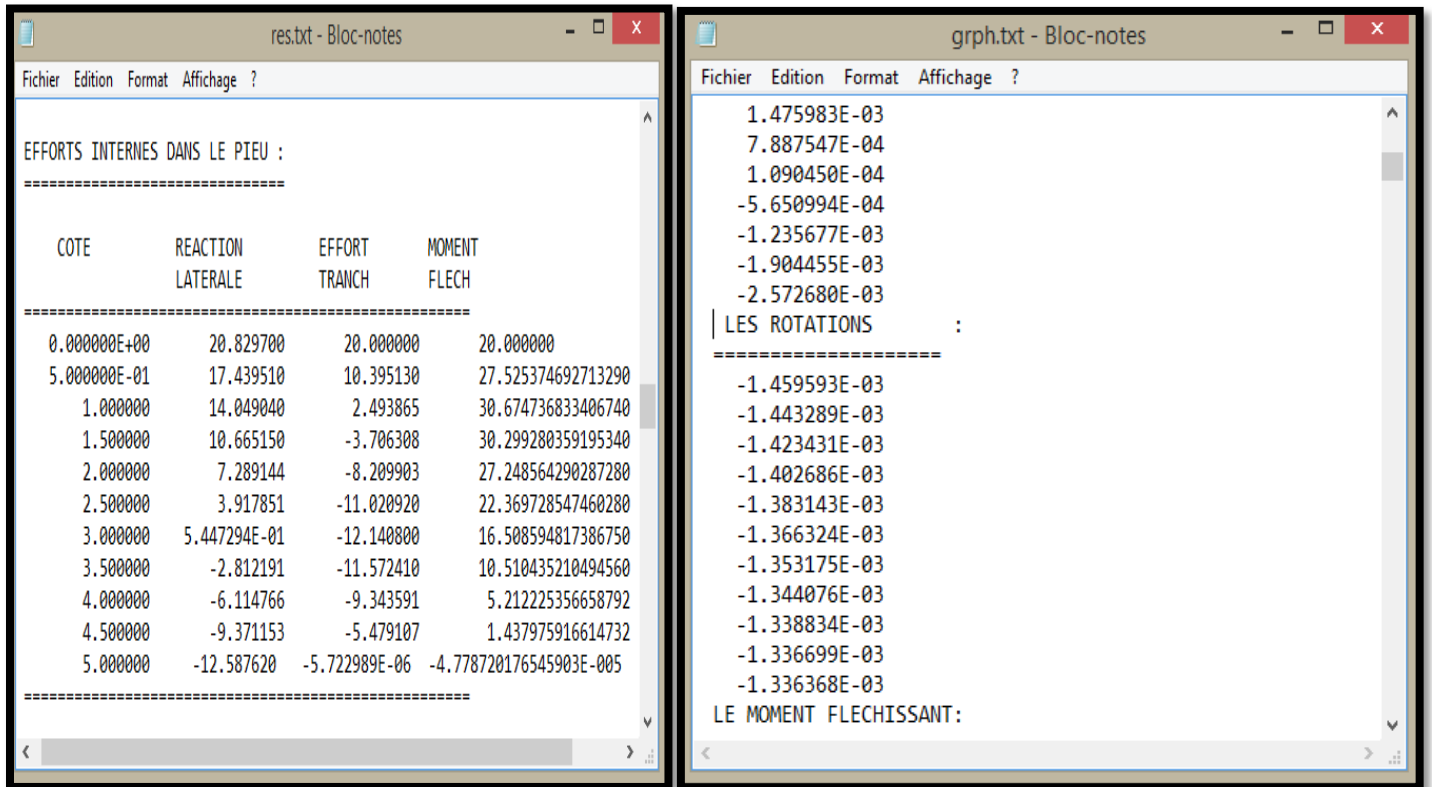
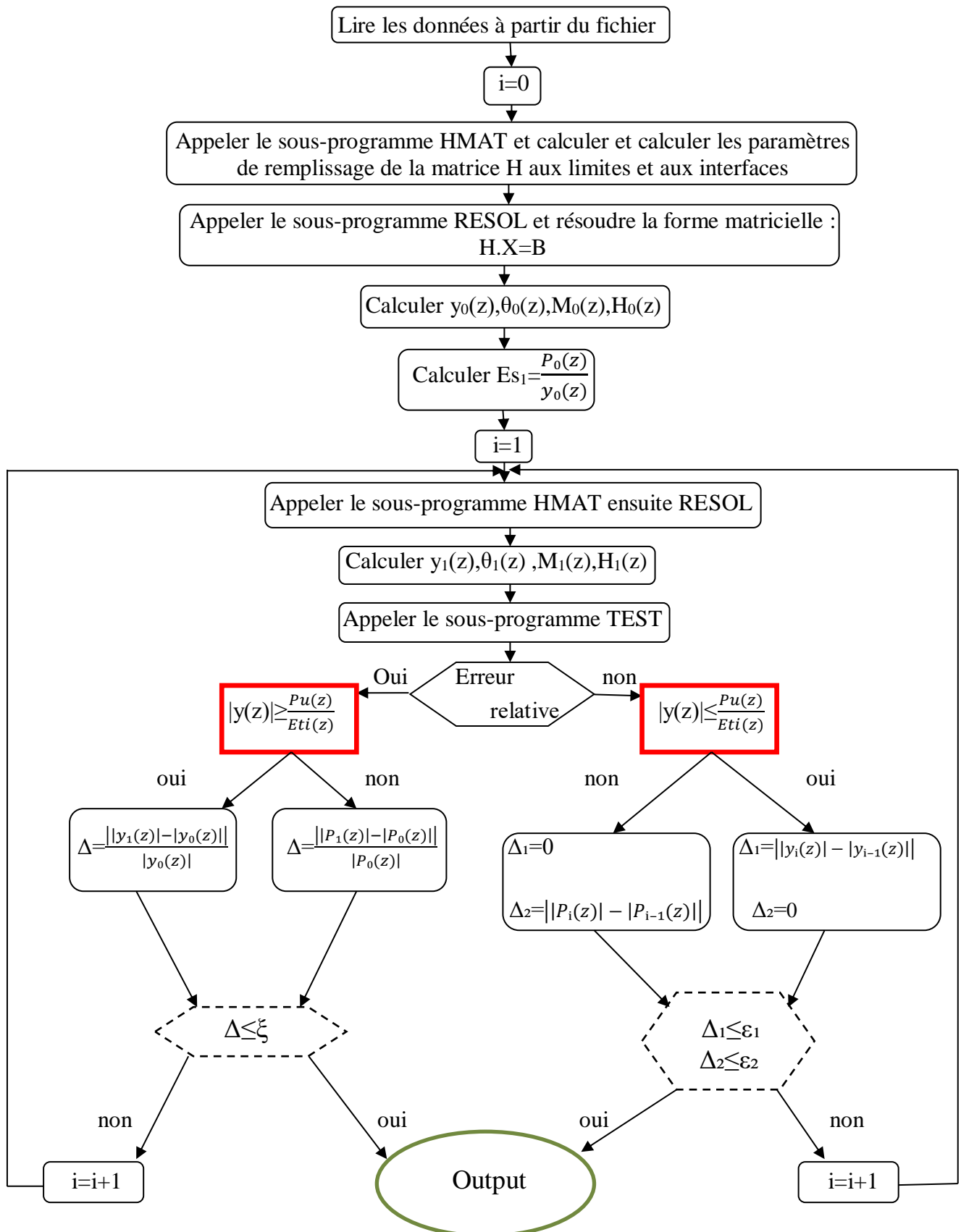


Figure 2.10: Fichier texte ou les résultats sont affichés.

4.2 Organigramme de calcul de SPULL-PARECT:



5. Procédé de calcul de SPULL-PARECT version VB.NET:

La méthodologie du processus itératif est comme suite :

- Etape 1 : introduire les caractéristiques du pieu et de sol
 - Ntt : nombre de tranches
 - B : diamètre du pieu (m)
 - La rigidité flexionnelle du pieu $E_p I_p$ (MN.m²)
 - D : la fiche du pieu (m)
 - Z : la profondeur (m)
 - $E_s(z)$: le module de réaction du sol (KPa)
 - $P_u(z)$: La réaction latéral du sol
- Etape 2 : appel du sous-programme **Hmat** et calcul les paramètres de continuité et remplissage de la matrice H aux interfaces et aux limites.
- Etape 3 : Une fois la matrice [H] rempli, le programme principal fait appelle au second sous-programme qui est (RESOL), pour résoudre la forme matricielle $[H](A) = (R)$.
 - Etape 4 : calcul de $U_0(z)$, $\theta_0(z)$, $M_0(z)$, $H_0(z)$
 - Etape 5 : calcul de la réaction latéral du sol pour chaque interface i avec l'expression de la fonction Parabole-Rectangle suivante :
$$P_0(z) = E_s \cdot y_0(z) - \frac{E_s \cdot y_0^2(z)}{4 \frac{P_{ult}}{E_s}}$$
 - Etape 6: calcul le module de réaction à partir du rapport $E_{s1}(z) = \frac{p_0(z)}{y_0(z)}$ pour chaque interface i, ce dernier sera réintroduit comme donnée pour calculer les déplacements, les rotations, les moments fléchissant et les efforts tranchant correspondants à la première itération.
 - Etape 7: Une fois les paramètres calculés, le programme principal appelle du sous-programme (TEST).
 - Etape 8 : Choisir le type d'erreur (erreur relative, erreur absolue).

- Différences relatives : On impose un critère de convergence, en estimant que la convergence des itérations est atteinte si l'écart relatif Δ (exprimé en %) est inférieur ou égal à ζ . L'écart relatif exprime comme suit :

$$\Delta = \frac{||y_1(Z)| - |y_0(Z)||}{|y_0(Z)|} * 100 \quad \text{pour} \quad y(Z) \geq \frac{Pult(z)}{Eti(z)}$$

Dans le domaine des grands déplacements on constate une augmentation rapide des déplacements horizontale, alors que la réaction horizontale évolue faiblement, pour cela on propose de contrôler la convergence des itérations à partir d'un test sur les déplacements.

Lorsque le déplacement est inférieur à $Pult(z)/Eti(z)$ on est dans le domaine des petits déplacements et la partie linéaire de notre courbe PARECT, l'évolution de la réaction horizontale est plus rapide alors que les déplacements horizontaux varient peu, on procède donc d'imposer le même critère de convergence des itérations qui sera effectué sur les réactions comme suit :

$$\Delta = \frac{||p_1(Zj)| - |p_0(Zj)||}{|p_0(Zj)|} * 100 \quad \text{pour} \quad y(Z) \leq \frac{Pult(z)}{Eti(z)}$$

- Différences absolue :

Etape 1 : dans l'erreur absolue on impose un critère de convergence, en estimant que la convergence des itérations est atteinte si l'écart relatif Δ_1 (exprimé en m) et si l'écart relatif Δ_2 (exprimé en kN) est inférieur ou égal à ζ_1 et ζ_2 successive comme suit :

$$\Delta_1 = ||y_i(Zj)| - |y_{i-1}(Zj)|| \quad \text{pour} \quad |y(Zj)| \geq \frac{Pult}{Eti}$$

$$\Delta_2 = 0$$

$$\Delta_1 = 0 \quad \text{pour} \quad |y(Zj)| < \frac{Pult}{Eti}$$

$$\Delta_2 = ||p_i(Zj)| - |p_{i-1}(Zj)||$$

Etape 2 : Si $\Delta_1 > \zeta_1$ et $\Delta_2 > \zeta_2$ on refait les calculs à partir de l'étape 5 et si $\Delta_1 \leq \zeta_1$ et

$\Delta_2 \leq \zeta_2$ le calcul est achevé, ce qui permet d'obtenir $U(z)$, $\theta(z)$, $M(z)$, $H(z)$, $P(z)$.

6. Validation de SPULL-PARECT version VB.NET:

1. Introduction des données:

La 1ère étape est l'introduction des caractéristiques de pieu et les paramètres des Courbes p-y comme le schématise les figures suivantes :

Le diamètre de pieu →

La fiche de pieu →

La rigidité a la flexion de pieu →

Nombre de tranches →

Caractéristiques du pieu

Diamètre B

Fiche D

Rigidité flaxionnelle

Nombre de tranches

Figure 2.11 : Fenêtre d'introduction des données liée au projet.

La profondeur →

La réaction latérale →

Le module de réaction initiale du sol →

Le déplacement critique →

Le déplacement de référence →

Paramètres des Courbes P-Y

z	Pu	Eti	yc/B	Yr / B
0.5	150	5000	3.3333...	6.6666...
1	150	5000	3.3333...	6.6666...
1.5	150	5000	3.3333...	6.6666...
2	150	5000	3.3333...	6.6666...
2.5	150	5000	3.3333...	6.6666...
3	150	5000	3.3333...	6.6666...
3.5	150	5000	3.3333...	6.6666...
4	150	5000	3.3333...	6.6666...
4.5	150	5000	3.3333...	6.6666...
5	150	5000	3.3333...	6.6666...

Figure 2.12 : Fenêtre d'introduction des paramètres des courbes P-Y.

Nous allons ajouter le nombre des lignes avec le bouton « ajouter » et nous allons remplir le tableau par les paramètres qui lui contient ensuite on lance le calcul pour Y_c/B et Y_r/B ,

On peut aussi supprimer le tableau en utilisant le bouton « supprimer »

Après avoir introduire tous les paramètres mentionné au-dessus, nous allons introduire notre premier incrément de chargement le moment de flexion et l'effort tranchant imposés en surface

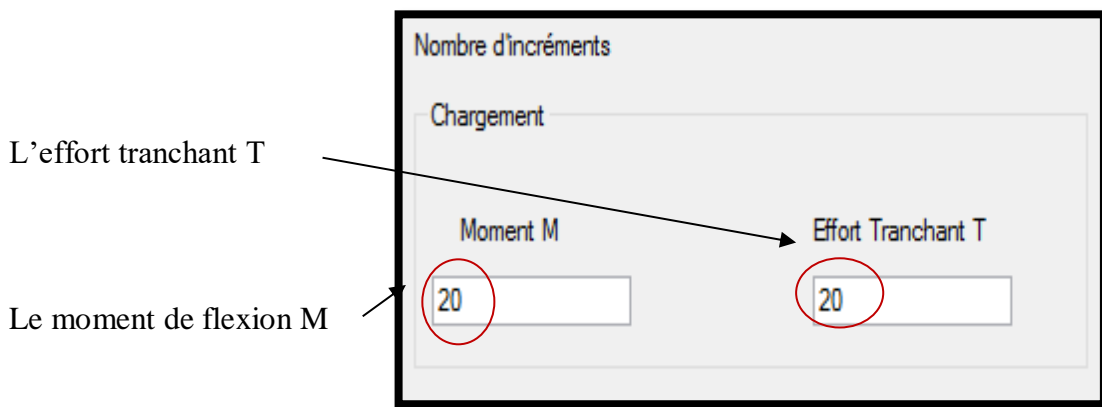


Figure 2.13: Fenêtre d'introduction des données de moment et l'fort tranchant.

L'étape suivante est de choisir le mode de contrôle de convergence qu'on veut travailler avec. Et nous allons introduire les paramètres nécessaires pour lancer le test de convergence, dans notre cas on choisira le contrôle de convergence par erreur relative et nous allons introduire la tolérance

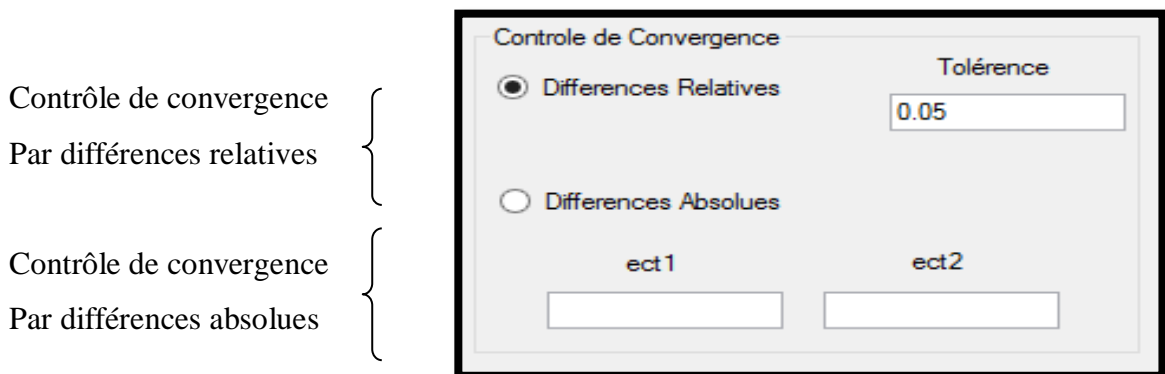


Figure 2.14: Fenêtre d'introduction des données de contrôle de convergence.

Ensuite on choisit l'une des 6 conditions pour remplir la matrice H, nous allons choisir la 1ère condition « Effort tranchant et moment de flexion »

Figure 2.15: Fenêtre d'introduction les conditions aux limites.

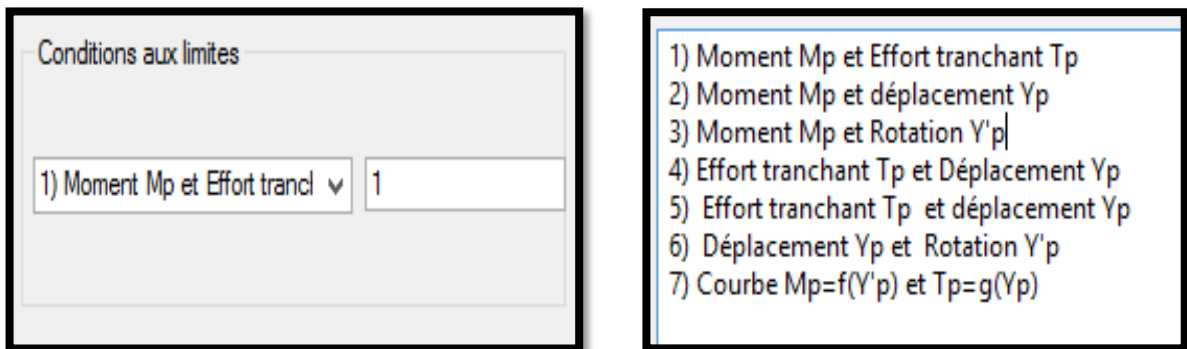


Figure 2.15: Fenêtre d'introduction les conditions aux limites.

Et finalement nous allons cliquer sur le bouton « Calcul » pour afficher les résultats de la résolution de notre forme matricielle

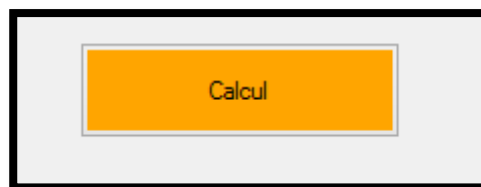


Figure 2.16: Fenêtre d'affichage les résultats.

2. Affichage des résultats :

Tableau 2.1 : Les caractéristiques de pieu et de sol.

Les caractéristiques du pieu	Les caractéristiques du sol
$D = 0,9 \text{ m}$ $B = 5 \text{ m}$ $E_p \cdot I_p = 741000 \text{ KN.m}^2$	$P_u = 150 \text{ KN/m}$ $E_{ti} = 5000 \text{ KPa}$

- Pour le 1^{er} incrément on a : $H_0=20$ et $M_0=20$ (en surface), et : $H=0$ et $M=0$ (en pointe)
 Nous allons obtenir lorsqu'on lance le calcul les tableaux suivants :

Tableau 2.2 : Affichage des résultats de déplacement et de rotation pour le 1^{er} incrément.

- Déplacement en tête : $Y_h=5,79016\text{mm}$

Profondeur (m)	Déplacements latérales (mm)	Rotations (rad)
0	4,321571	-1,459592
0,5	3,595641	-1,443287
1	2,878872	-1,42343
1,5	2,172355	-1,402684
2	1,475985	-1,383142
2,5	0,7887561	-1,366322
3	0,1090463	-1,353174
3,5	-0,5650983	-1,344074
4	-1,235675	-1,338832
4,5	-1,904451	-1,336697
5	-2,572675	-1,336366

Tableau 2.3 : Affichage des résultats du 1^{er} incrément.

Profondeur (m)	L'effort tranchant (KN)	Le moment fléchissant (KN.m)	La réaction latérale (KN/m)	$Y(z)/Y_r(z)$
0	20	20	20,82969	0,07202619
0,5	10,39512	27,52538	17,43951	0,0002157384
1	2,493871	30,67473	14,04903	0,0001727323

1,5	-3,706297	30,29932	10,66514	0,0001303413
2	-8,209903	27,24859	7,289151	8,855908 E-05
2,5	-11,02092	22,36975	3,917858	4,732536 E-05
3	-12,14081	16,50859	0,5447361	6,542778 E-06
3,5	-11,5724	10,51046	-2,812186	-3,39059 E-05
4	-9,343592	5,212243	-6,114752	-7,414047 E-05
4,5	-5,479125	1,437969	-9,371131	-0,000114267
5	8,309458 E-06	3,292378 E-05	-12,5876	-0,0001543605

-Les résultats qui s'affichent dans le 1^{er} tableau représente le déplacement latéral en tête, les déplacements latéraux et les rotations concernant le 2^{ème} tableau les résultats représente les efforts internes : l'effort tranchant, le moment de flexion, la réaction latérale et le rapport de déplacement latéral sur le déplacement de référence pour chaque interface.

- Pour le 2^{ème} incrément on a : $H_0=40$ KN et $M_0=40$ KN.m (en surface), et : $H=0$ et $M=0$ (en pointe)

Tableau2.4 : Affichage des résultats de déplacement et de rotation pour le 2^{ème} incrément.

- Déplacement en tête : $Y_h = 11,86701$ mm

Profondeur (m)	Déplacement (mm)	Rotation (rad)
0	8.859835	-2.989184
0.5	7.372973	-2.956565
1	5.904455	-2.916792
1.5	4.456484	-2.875183
2	3.028876	-2.835942
2.5	1.619625	-2.802144
3	0.225495	-2.775718
3.5	-1.157457	-2.75744
4	-2.533246	-2.74692
4.5	-3.905521	-2.742642
5	-5.276496	-2.741978

Tableau 2.5 : Affichage des résultats du 2ème incrément.

Profondeur (m)	Effort tranchant (KN)	Moment fléchissant (KN.m)	Réaction latérale (KN/m)	Y(z)/Yr(z)
0	40	40	41.02848	0.1476639
0.5	20.95622	55.09364	34.59984	0.0004423784
1	5.178276	61.48185	28.06967	0.0003542678
1.5	-7.288828	60.80891	21.45491	0.000267389
2	-16.40595	54.74026	14.76213	0.0001817326
2.5	-22.13477	44.96033	7.988826	9.717751 E-05
3	-24.43414	33.17315	1.125356	1.35297 E-05
3.5	-23.27851	21.10227	-5.731466	-6.944744 E -05
4	-18.76126	10.45196	-12.39884	-0.0001519948
4.5	-10.97387	2.879957	-18.89159	-0.0002343253
5	3.952273 E-05	9.152064 E-05	-25.22242	-0.0003165898

- Pour le 3ème incrément :

$H_0=200$ KN et $M_0=200$ KN.m (en surface), et : $H=0$ et $M=0$ (en pointe)

Tableau 2.6 : Affichage des résultats de déplacement et de rotation pour le 3^{ème} incrément.

- Le déplacement en tête : $Y_h=81,40778$ mm

Profondeur (m)	Déplacement (mm)	Rotation (rad)
0	60.98652	-20.3313
0,5	50.85962	-20.16746
1	40.82564	-19.96416
1,5	30.89774	-19.74717
2	21.07698	-19.53909
2,5	11.35414	-19.35792
3	1.712481	-19.21597
3,5	-7.86931	-19.11851
4	-17.41314	-19.06325
4,5	-26.93808	-19.04118
5	-36.45742	-19.03779

Tableau 2.7 : Affichage des résultats du 3^{ème} incrément.

Profondeur (m)	L'effort tranchant (KN)	Le moment de flexion (KN.m)	La réaction latérale (KN/m)	Y(z)/Yr(z)
0	200	200	150	1.016442
0,5	117.3833	278.7225	146.5189	0.003051577
1	40.40771	317.4682	134.681	0.002449539
1,5	-26.96497	320.0509	114.7108	0.001853865
2	-80.91398	292.2313	86.87493	0.001264619
2,5	-117.7407	241.6488	51.39917	0.0006812483
3	-133.8376	177.7604	8.440215	0.0001027489
3,5	-126.6191	111.7137	-36.7663	-0.0004721586
4	-99.43933	54.34464	-74.43163	-0.001044788
4,5	-56.01155	14.70326	-104.4546	-0.001616285
5	-0.0001938697	0.0004768248	-126.9061	-0.002187445

7. Comparaison des résultats :

Nous allons comparer les résultats obtenus de SPULL-PARECT version DOS avec celles obtenues de SPULL-PARECT version VB.NET , nous allons trouver les mêmes résultats par comparaisons avec les résultats obtenus de la part de SPULL-PARECT version DOS, par exemple on prend les résultats obtenus en surface de tous les paramétrés précédents en ont fait la comparaison pour les chargements suivants :

- 1^{er} Chargement : H =20KN et M =20KN

Tableau 2.8 : Tableau comparatif entre les résultats de SPULL-PARECT DOS et SPULL PARECT Pour H=20KN et M=20KN.

	SPULL-PARECT Version DOS	SPULL-PARECT version VB.NET
Déplacement latérale y_0 (mm)	4.3216	4.32157
Rotation θ_0 (rad)	-1.45959	-1.45959
Réaction latérale P_0 (KN/m)	20.829700	20.82969

- 2^{ème} Chargement : H=40KN, M=40KN

Tableau 2.9: Tableau comparatif entre les résultats de SPULL-PARECT DOS et SPULL-PARECT pour H=40KN et M=40KN.

	SPULL-PARECT Version DOS	SPULL-PARECT version VB.NET
Déplacement latérale y_0 (mm)	8.8598	8.8598
Rotation θ_0 (rad)	-2.9892	-2.98918
Réaction latérale P_0 (KN/m)	41.02847	41.02848

- 3^{ème} Chargement : H=200KN, M=200K

Tableau 2.10 : Tableau comparatif entre les résultats de SPULL-PARECT DOS et SPULL-PARECT pour H=200KN et M=200KN.

	SPULL-PARECT Version DOS	SPULL-PARECT version VB.NET
Déplacement latéral y_0 (mm)	6.0987	6.09865
Rotation θ_0 (rad)	-2.0331	-2.0331
Réaction latéral P_0 (KN/m)	150.00	150.00

8. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté une méthode de calcul d'un pieu isolé chargé latéralement à la base de la théorie de module de réaction (courbe P-y) qui est présenté dans le programme SPULL-PARECT de système d'exploitation MS-DOS et on a présenté les grandes lignes d'un programme de calcul adopté SPULL-PARECT été par ailleurs implémenté et dont la mise en œuvre numérique a été faite en langage FORTRAN 90.

On a développé aussi une version VB.NET de SPULL, cette version constitue un outil de calcul du pieu sur une charge latérale par la méthode des courbes (P-Y), qui effectue un calcul rapide de déplacement, rotation, moment fléchissant et effort tranchant du pieu et la réaction du sol par rapport au calcul manuelle.

**Chapitre 03 : Etude de
comportement
D'un pieu isolé sous
Chargement combiné**

1. Introduction :

Dans le but d'étudier le comportement d'un pieu isolé sous un chargement combiné on a développé un programme "L-PULAL" (Linear Pile Under Lateral and Axial Loading).

"L-PULAL" est un programme pour le calcul de déplacement des pieux chargés latéralement et axialement. Il a été développé à l'Université de BLIDA en aout 2021.

Le principal objectif de ce chapitre est étudier l'effet d'une charge verticale sur un comportement d'un pieu chargé latéralement, en s'intéressent aux déplacements latéraux du pieu et au moment fléchissant le long du pieu.

Dans le but de valider le programme "L-PULAL", on va comparer les résultats de déplacements en absence de l'effort vertical ($N=0$) et aux présence de l'effort vertical. On tirera une conclusion sur l'effet d'une charge verticale sur le comportement d'un pieu sous chargement latéral.

2. Développement des équations de base :

On suppose dans ce qui suit que le pieu est flexible (pointe au repos) et que le sol est un monocouche homogène (module de réaction E_{s0} constant avec la profondeur).

On considère le cas courant des faibles charges verticales :

Donc on a : $b \rightarrow 0$ et $b = \frac{Nl_0^2}{EpIp} < 4$. (c'est le cas $\Delta \leq 0$).

L'équation de déformation du pieu s'écrit comme suit :

$$E_p \cdot I_p \cdot \frac{d^4 u}{dz^4} + N \cdot \frac{du}{dz} + E_{s0} \cdot y = 0 \quad (3.1)$$

La solution générale est :

$$u(x) = e^{\alpha x} (K_1 \cdot \cos(\beta x) + K_2 \cdot \sin(\beta x)) + e^{-\alpha x} (K_3 \cdot \cos(\beta x) + K_4 \cdot \sin(\beta x)) \quad (3.2)$$

On a besoin des conditions aux limites suivantes pour déterminer les constantes d'intégration K_1, K_2, K_3, K_4 .

On considère le cas simple d'un pieu souple et long, c'est-à-dire sa fiche $D \geq 3L_0$

$$\text{Avec : } L_0 = \sqrt[4]{\frac{4EpIp}{Es_0}} \quad (3.3)$$

Conditions aux limites :

- En pointe ($Z = \infty$) : pas de déplacement ($u=0$) et pas de rotation ($\frac{du}{dz} = 0$).

D'après l'équation (3.1) : $x = \frac{z}{L_0} \rightarrow \infty \rightarrow$ nous donnent : $K_1 = K_2 = 0$.

- En tête ($Z=0$) :

$$\text{Effort tranchant en tête du pieu } T(0) = H_0 \quad (3.4)$$

$$\text{Moment fléchissant en tête du pieu } M(0) = M_0 = H \cdot e \quad (3.5)$$

On a l'équation de l'effort tranchant suivante :

$$T(z) = \frac{dM}{dz} + N \cdot \frac{du}{dz} \quad (3.6)$$

et puisque $M(z) = E_p \cdot I_p \cdot \frac{d^2 u}{dz^2}$: équation de déformée d'une poutre, on aura : (3.7)

$$T(z) = E_p \cdot I_p \cdot \frac{d^3 u}{dz^3} + N \cdot \frac{du}{dz} \quad (3.8)$$

$$u(x) = e^{-\alpha x} (K_3 \cdot \cos(\beta x) + K_4 \cdot \sin(\beta x)) \quad (3.9)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} K_3 = e^{-\alpha x} \cdot \cos(\beta x) \\ K_4 = e^{-\alpha x} \cdot \sin(\beta x) \end{cases}$$

Et : $\Phi_1 = \arccos(-b/4)$ (3.10)

$$\alpha = \sqrt{2} \left| \cos\left(\frac{\Phi_1}{2}\right) \right| \quad (3.11)$$

$$\beta = \sqrt{2 - \alpha^2} \quad (3.12)$$

- Les dérivées successives de l'équation (3.1) ont donné les résultats suivants :

1. L'équation de rotation :

$$\frac{du}{dz} = K_3 \cdot B_3 + K_4 \cdot B_4 \quad (3.13)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} B_3 = -\alpha T_4 - \beta T_4 \\ B_4 = -\alpha T_4 + \beta T_3 \end{cases}$$

2. L'équation du moment fléchissant :

$$M(z) = \frac{E_p \cdot I_p}{L_0^2} (K_3 \cdot C_3 + K_4 \cdot C_4) \quad (3.14)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} C_3 = T_3 \cdot R + T_4 \cdot P \\ C_4 = -T_3 \cdot P + T_4 \cdot R \end{cases} \quad \text{et : } \begin{cases} R = \alpha^2 - \beta^2 \\ P = 2\alpha\beta \end{cases}$$

3. L'équation de l'effort tranchant :

$$T(z) = \frac{E_p \cdot I_p}{L_0^3} (K_3 \cdot D_3 + K_4 \cdot D_4) + \frac{N}{L_0} (K_3 \cdot B_3 + K_4 \cdot B_4) \quad (3.15)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} D_3 = -T_3 \cdot S + T_4 \cdot U \\ D_4 = -T_3 \cdot U - T_4 \cdot S \end{cases} \quad \text{et : } \begin{cases} S = \alpha^3 - 3\alpha\beta^2 \\ U = \beta^3 - 3\beta\alpha^2 \end{cases}$$

- Les équations (3.3) et (3.4) qui représentent les conditions aux limites du moment et de l'effort tranchant permettent de déterminer les constantes d'intégration K_3, K_4 :
on pose $x=z/ L_0$.

$$u(z) = e^{-\alpha \cdot \left(\frac{z}{L_0}\right)} \left[K_3 \cdot \cos\left(\frac{\beta \cdot z}{L_0}\right) + K_4 \cdot \sin\left(\beta \cdot \frac{z}{L_0}\right) \right] \quad (3.16)$$

-A $z=0$, on a :

$$M(0) = \frac{Eplp}{L_0^2} \left[R \times K_3 + K_4 \cdot (-P) \right] = H \cdot e \quad (3.17)$$

Et :

$$T(0) = \frac{Eplp}{L_0^3} \left[-S \cdot K_3 - U \cdot K_4 \right] + \frac{N}{L_0} \left(K_3 \cdot (-\alpha) + K_4 \cdot \beta \right) = H \quad (3.18)$$

- Nous allons résoudre le système de deux équations (3.3) et (3.4) :

$$a \cdot K_3 + b \cdot K_4 = c \quad (3.19)$$

$$d \cdot K_3 + e \cdot K_4 = f \quad (3.20)$$

$$\text{avec : } a = -S \cdot \frac{Eplp}{L_0^3} - \frac{N}{L_0} \alpha \quad \text{et : } d = R \cdot \frac{Eplp}{L_0^2}$$

$$b = -U \cdot \frac{Eplp}{L_0^3} + \beta \cdot \frac{N}{L_0} \quad e = -P \cdot \frac{Eplp}{L_0^2}$$

$$c = H \quad f = H \cdot e$$

On trouve :

$$K_3 = \frac{ce - fb}{ae - bd} \quad (3.21) \quad \text{et} \quad K_4 = \frac{fa - cd}{ae - bd} \quad (3.22)$$

On obtient enfin le déplacement latéral du pieu avec la formule suivante :

$$U(z) = e^{-\alpha \cdot \left(\frac{z}{L_0}\right)} \left(K_3 \cdot \cos\left(\beta \cdot \frac{z}{L_0}\right) + K_4 \cdot \sin\left(\beta \cdot \frac{z}{L_0}\right) \right) \quad (3.23)$$

3. Mise au point du programme de calcul de pieu sous chargement combiné "L-PULAL":

Afin d'étudier l'effet du chargement combiné sur les déplacements latéral d'un pieu isolé, nous allons développer un programme basé sur un calcul linéaire du déplacement latéral $u(z)$ sous un chargement axial N en considérant les conditions aux limites en tête du pieu, ce qui nécessite un système d'équation à deux inconnues pour déterminer les constants d'intégration K_3 et K_4 et en déduire le déplacement et le moment fléchissant.

La figure 3.1 illustre une copie d'écran de l'interface du programme comportant aussi bien l'introduction des données que la sortie des résultats.

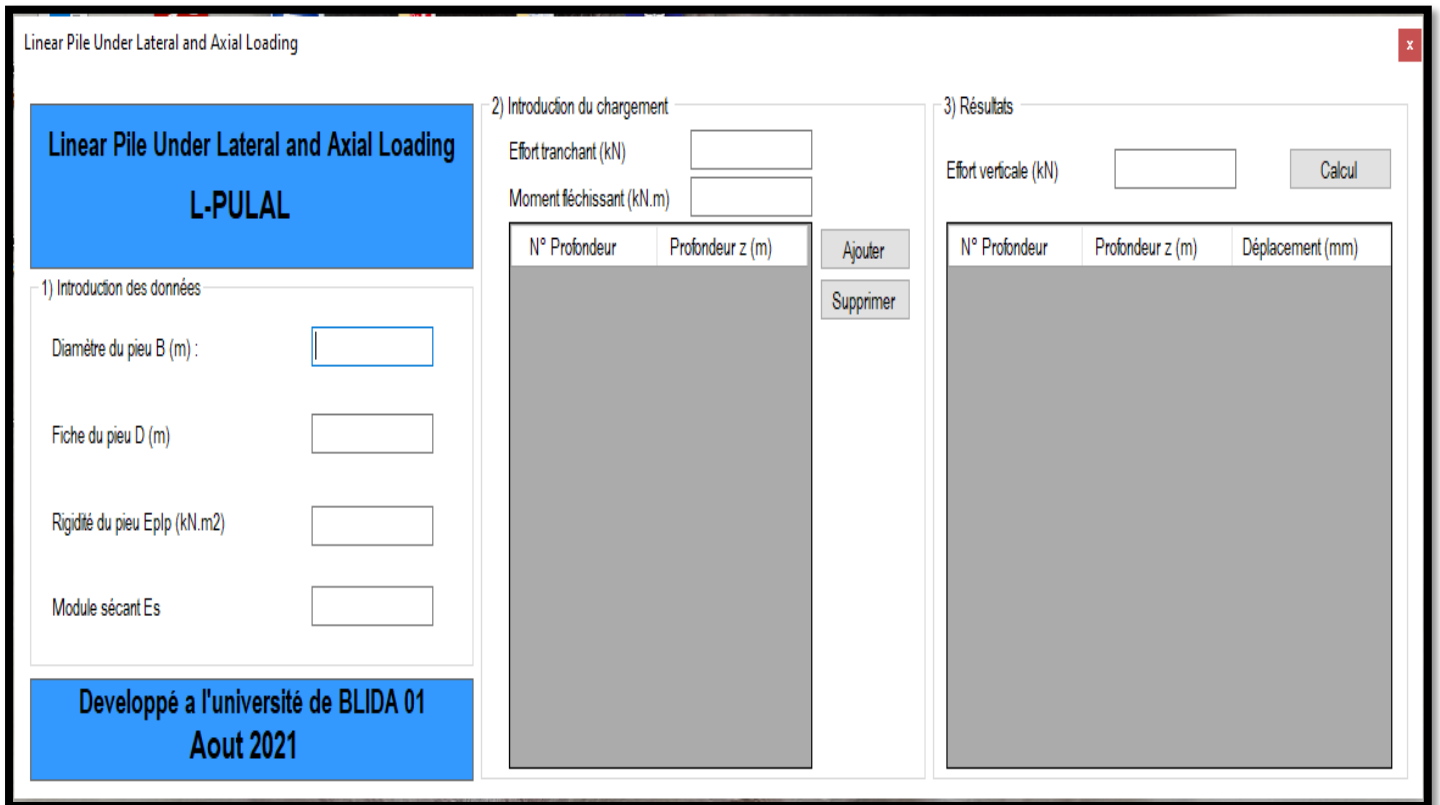


Figure 3.1: L'interface de programme du chargement combiné d'un pieu isolé.

3.1 Etapas de calcul :

Etape (01): Introduction des données

- Introduire les caractéristiques du pieu et les propriétés des courbes (P-Y)
La fiche D(m), le diamètre B(m), le nombre des tranches, la rigidité flexionnelle $E_p I_p$ (KN.m²), le module de réaction initiale E_{s0}

Etape (02): Introduction des données de chargement

- Introduire l'effort tranchant T et le moment fléchissant, ainsi que le chargement axiale N pour chaque incrément

Etape (03): Programmer les équations, et résoudre le système d'équation

- Calculer L_0 , ainsi que les constantes R, P, U, S

$$R = \alpha^2 - \beta^2 \quad , \quad S = \alpha^3 - 3\alpha\beta^2$$

$$P = 2\alpha\beta \quad , \quad U = \beta^3 - 3\beta\alpha^2$$
- Calculer les constantes suivantes qui vont former notre système d'équations

$$a = -S \cdot \frac{E_p I_p}{L_0^3} - \frac{N}{L_0} \alpha \quad \text{et :} \quad d = R \cdot \frac{E_p I_p}{L_0^2}$$

$$b = -U \cdot \frac{E_p I_p}{L_0^3} + \beta \cdot \frac{N}{L_0} \quad e = -P \cdot \frac{E_p I_p}{L_0^2}$$

$$c = H \quad f = H \cdot e$$

- Lancer le calcul des équations du moment et de l'effort tranchant en tête du pieu pour un système d'équation à deux inconnues

$$a \cdot K_3 + b \cdot K_4 = c$$

$$d \cdot K_3 + e \cdot K_4 = f$$

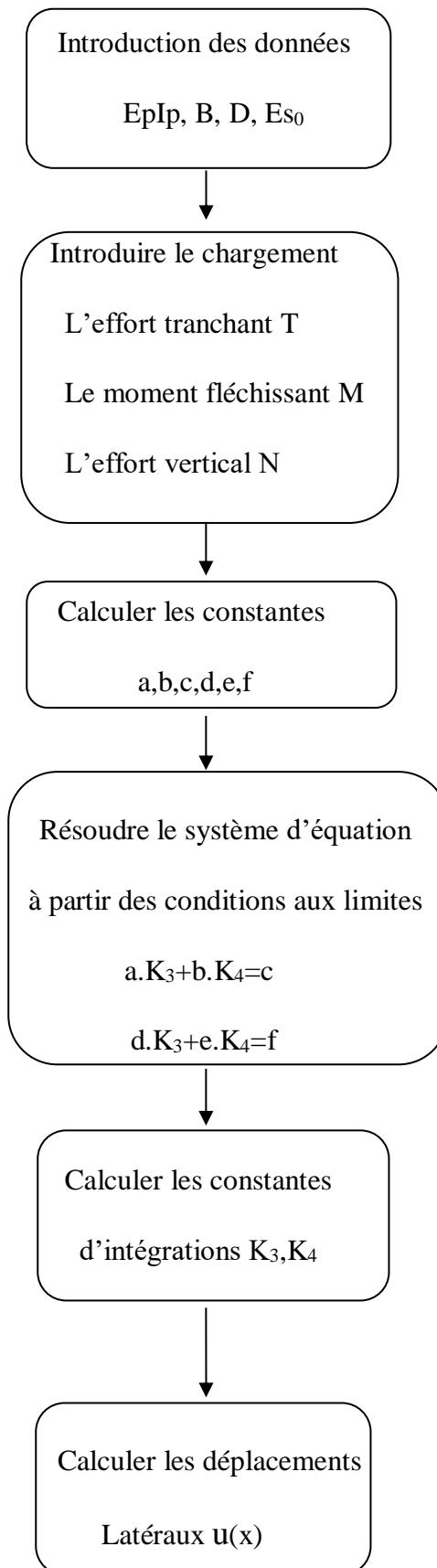
- Déterminer les valeurs des constantes d'intégration K_3 et K_4

Etape (04):

- Lancer un calcul linéaire de l'équation des déplacements latéral

$$u(z) = e^{-\alpha \left(\frac{z}{L_0}\right)} \left(K_3 \cdot \cos\left(\beta \cdot \frac{z}{L_0}\right) + K_4 \cdot \sin\left(\beta \cdot \frac{z}{L_0}\right) \right)$$

3.2 Organigramme de calcul:



4. Validation de programme L-PULAL:

4.1. Introduction des données:

On considère un pieu isolé libre en tête et que le sol est homogène.

Les caractéristiques du pieu sont : $D=10\text{m}$, $B=1\text{m}$, $E_p I_p=56650\text{KN.m}^2$, $E_{s0}=5000\text{KPa}$.

La 1ère étape est l'introduction des données comme le montrent la figure suivante :

1) Introduction des données	
Diamètre du pieu B (m) :	10
Fiche du pieu D (m)	1
Rigidité du pieu Eplp (kN.m2)	56650
Module sécant Es	5000

Figure3.2: Données du projet à introduire dans L-PULAL.

4.2. Introduction du chargement :

Après avoir introduit tous les paramètres mentionnés, on a introduit le moment fléchissant et l'effort tranchant imposés : $H=100\text{ KN}$ et $M_0=100\text{KN.m}$.

L'étape suivante est d'ajouter le nombre de lignes avec le bouton « ajouter » et on remplit le tableau par les paramètres qui lui contiennent. On peut aussi supprimer les lignes de tableau en utilisant le bouton « Supprimer ».

2) Introduction du chargement	
Effort tranchant (kN)	100
Moment fléchissant (kN.m)	100
N° Profondeur	Profondeur z (m)
1	0
2	1
3	2
4	3
5	4
6	5
7	6
8	7
9	8
10	9
11	10

Figure3.3: Introduction du chargement de projet dans L-PULAL.

Ensuite on introduit l'effort vertical N et finalement on clique sur le bouton « Calcul » pour afficher les résultats de déplacement.

Figure 3.4 : Introduction de l'effort vertical.

4.3 Affichage des résultats dans L-PULAL :

Après cela, on ouvre la fenêtre qui va nous permettre d'afficher les résultats de déplacement pour N=10,20,40,100 et 300 KN :

On obtient lorsqu'on lance le calcul les tableaux suivants :

- Pour N=10 KN

N° Profondeur	Profondeur z (m)	Déplacement (mm)
1	0	21.375
2	1	11.952
3	2	5.178
4	3	0.998
5	4	-1.138
6	5	-1.896
7	6	-1.863
8	7	-1.472
9	8	-0.993
10	9	-0.571
11	10	-0.260

Figure 3.5 : Affichage des résultats du 1^{er} effort vertical (10 KN).

- Pour N=20 KN

N° Profondeur	Profondeur z (m)	Déplacement (mm)
1	0	21.391
2	1	11.963
3	2	5.184
4	3	1.000
5	4	-1.138
6	5	-1.897
7	6	-1.865
8	7	-1.473
9	8	-0.994
10	9	-0.572
11	10	-0.261

Figure3.6: Affichage des résultats du 2^{ème} incrément de chargement (20 kN).

- Pour N=40 KN

N° Profondeur	Profondeur z (m)	Déplacement (mm)
1	0	21.423
2	1	11.983
3	2	5.194
4	3	1.004
5	4	-1.138
6	5	-1.898
7	6	-1.867
8	7	-1.475
9	8	-0.996
10	9	-0.573
11	10	-0.261

Figure3.7 : Affichage des résultats du 3^{ème} incrément de chargement (40 kN).

- Pour N= 100 KN

N° Profondeur	Profondeur z (m)	Déplacement (mm)
1	0	21.522
2	1	12.045
3	2	5.227
4	3	1.016
5	4	-1.137
6	5	-1.903
7	6	-1.873
8	7	-1.481
9	8	-1.000
10	9	-0.575
11	10	-0.263

Figure3.8: Affichage des résultats du 4^{ème} incrément de chargement (100 KN).

- Pour N= 300 KN

N° Profondeur	Profondeur z (m)	Déplacement (mm)
1	0	21.854
2	1	12.255
3	2	5.337
4	3	1.058
5	4	-1.135
6	5	-1.920
7	6	-1.896
8	7	-1.501
9	8	-1.015
10	9	-0.585
11	10	-0.268

Figure3.9: Affichage des résultats du 5^{ème} incrément de chargement (300 KN).

4.4. Calcul manuel de déplacement u(x):

- Pour N= 10 KN :
- On calcul d'abord les inconnues K_3 et k_4 avec les formules suivant :

$$K_3 = \frac{ce-fb}{ae-bd} \quad (1) \quad \text{et} \quad k_4 = \frac{fa-cd}{ae-bd} \quad (2)$$

On a: $S = -2.000891$

$R = -0.0005942$

$U = -1.999108$

$P = 2$

$L_0 = 2.594612 \text{ m}$

$\alpha = 0.9998514$

$\beta = 1.000149$

$\Phi_1 = 1.571093$

- Ensuite, on remplace les constantes dans les formules suivantes, on trouve :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = -S \cdot \frac{Eplp}{L_0^3} - \frac{N}{L_0} \alpha = 6485.566 \\ b = -U \cdot \frac{Eplp}{L_0^3} + \beta \cdot \frac{N}{L_0} = 6487.493 \\ c = H = 100 \\ d = R \cdot \frac{Eplp}{L_0^2} = -5.000693 \\ e = -P \cdot \frac{Eplp}{L_0^2} = -16830.03 \\ f = H \cdot e = 100 \end{array} \right.$$

- On calcul les équations (1) et (2) on obtient :

$$K_3 = 0.02136873 \quad \text{et} \quad k_4 = - 0.005948109$$

- Finalement on calcule le déplacement dans chaque profondeur avec la formule suivante :

$$u(x) = e^{-\alpha x} (K_3 \cdot \cos(\beta x) + k_4 \cdot \sin(\beta x))$$

On trouve les résultats représentés dans le tableau (3.1) :

Tableau 3.1 : Résultats de déplacement avec un calcul manuelle pou N=10 KN.

N ° de tranche	Profondeur z(m)	Déplacement (mm)
1	0	21.375
2	1	11.952
3	2	5.178
4	3	0.998
5	4	-1.138
6	5	-1.896
7	6	-1.863
8	7	-1.472
9	8	-0.993
10	9	-0.571
11	10	-0.260

On constate une concordance exacte en comparant les résultats du tableau 3.1 et la figure 3.5.

5. Etude de l'effet du chargement verticale sur les déplacements horizontaux :

5.1. Etude paramétrique sur l'effet du chargement combiné :

L'étude sera menée en considérant le pieu isolé libre et tête soumis à un chargement vertical et horizontal dans un sol homogène.

Les propriétés du pieu sont comme suite :

$B = 1\text{m}$, $D = 10\text{m}$, $E_p I_p = 56650\text{KN. m}^2$ et $E_s = 5000\text{KPa}$.

5.1.1 Etude paramétrique de l'influence de l'effort vertical N :

On a chargé le pieu avec un effort vertical N et on augmente la charge jusqu'à $N = 10000$

KN. (la valeur de N ne doit pas dépasser $\frac{4.E_p I_p}{L_0^2}$)

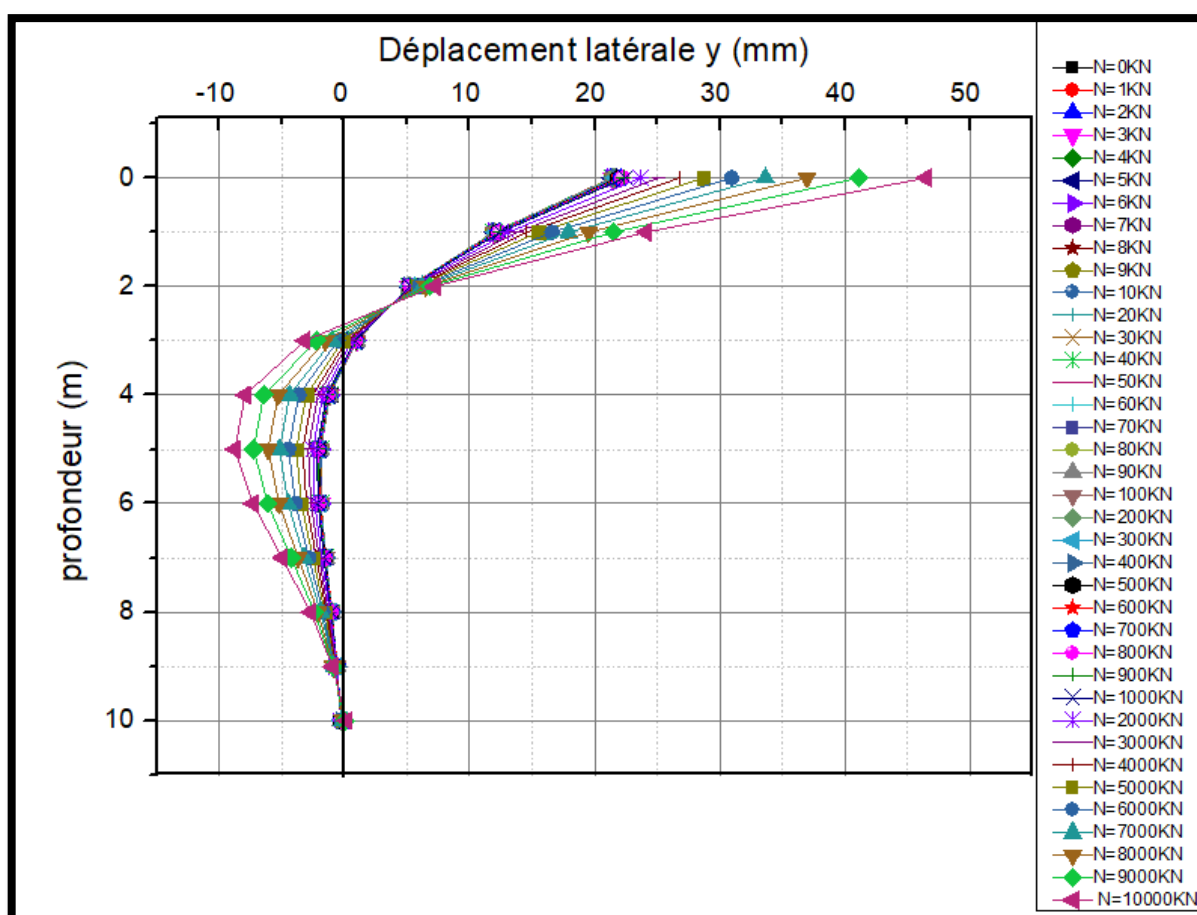


Figure 3.10 : Variation du déplacement latérale en fonction de la profondeur.

-La figure 3.10 présente les courbes de déplacement latéral du pieu en fonction de la profondeur pour un pieu de différents efforts verticaux ($N=0$ à 10000 KN).

-On remarque d'après la figure 3.10 que les déplacements latéraux de pieu augmentent faiblement avec l'augmentation du chargement verticale.

5.1.2. Étude paramétrique de l'influence du module de réaction E_{s0} du pieu :

On a fixé la fiche D, le diamètre B, la rigidité flexionnelle $E_p I_p$, on a augmenté le module de réaction de pieu jusqu'à 100000 KPa et on a calculé les déplacements horizontaux.

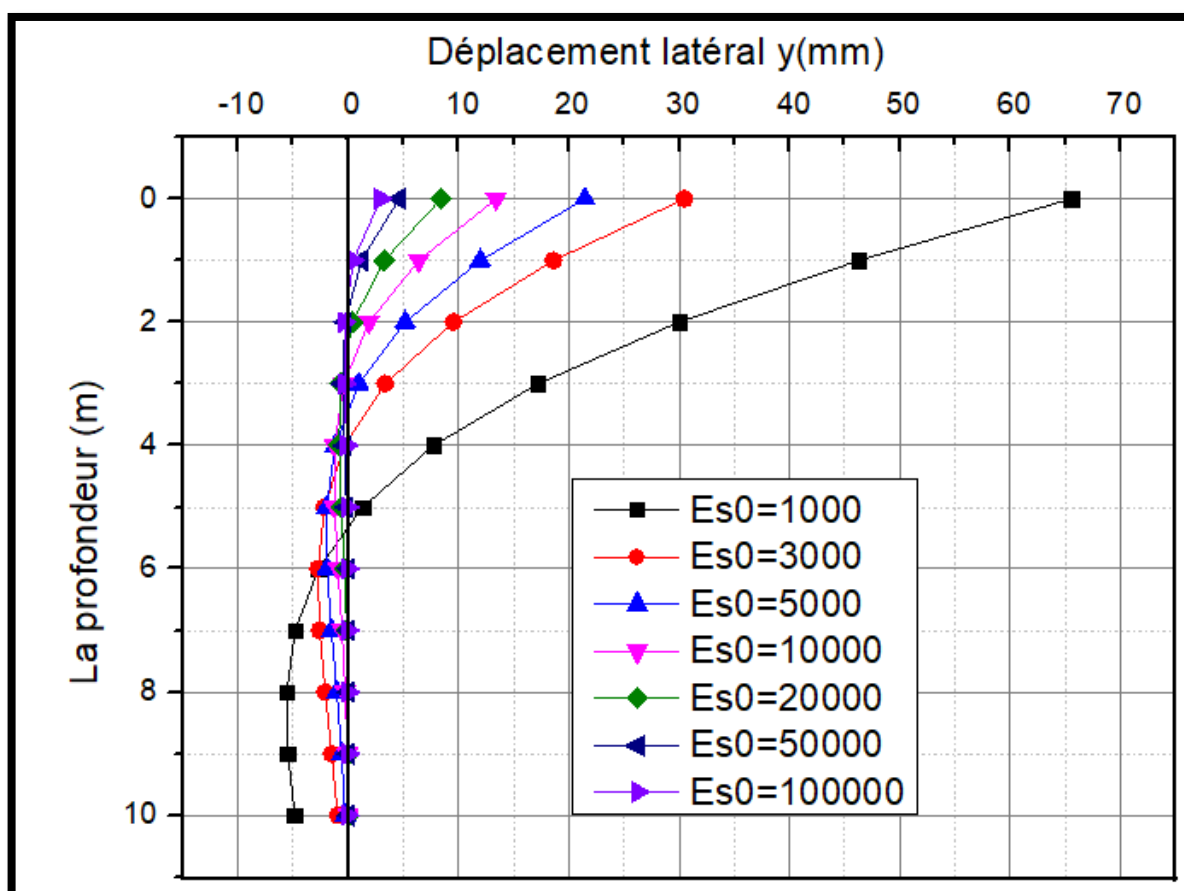


Figure 3.11 : Variation du déplacement horizontal en fonctions de module de réaction.

La figure 3.11 présente les courbes du déplacement horizontales en fonctions du module de réaction pour un pieu de différents modules de réaction. ($E_{s0} = 1000$ à 100000 KPa).

On remarque d'après la figure que le module de réaction de pieu a un effet réducteur important sur le déplacement d'un pieu sous un chargement combiné.

Lorsque le module de réaction augmente de 1000 à 3000 KPa, le déplacement y_0 en surface diminue de 65 à 30 mm, soit de 50% environ.

5.1.3. Étude paramétrique de l'influence de la fiche D du pieu :

Maintenant, on a fixé le diamètre, la rigidité flexionnelle $E_p I_p$, le module de réaction et on a augmenté la fiche D du pieu jusqu'à $D=15m$. (D doit être supérieur à $3 \cdot L_0$)

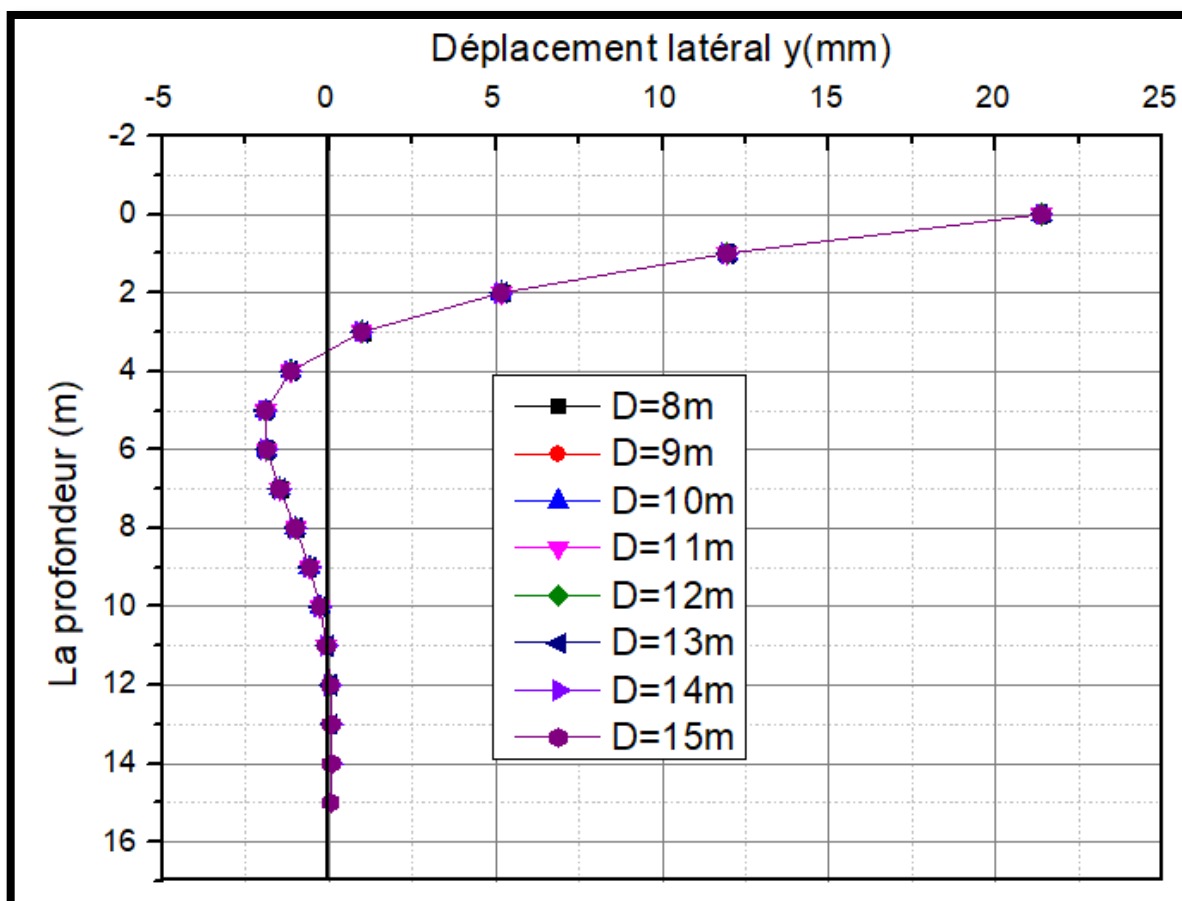


Figure 3.12 : Variation du déplacement horizontal en fonctions de la fiche de pieu.

La figure 3.12 présente les courbes du déplacement horizontal en fonctions du la fiche pour un pieu de différentes valeurs de fiche. ($D= 8$ à 15 m).

On remarque d'après la figure que la fiche de pieu n'a pas d'effet sur le déplacement d'un pieu sous un chargement combiné.

5.1.4. Étude paramétrique de déplacement en tête du pieu :

On a fixé tout le paramètre du pieu, on a augmenté l'effort vertical N et on a calculé le déplacement en tête seulement

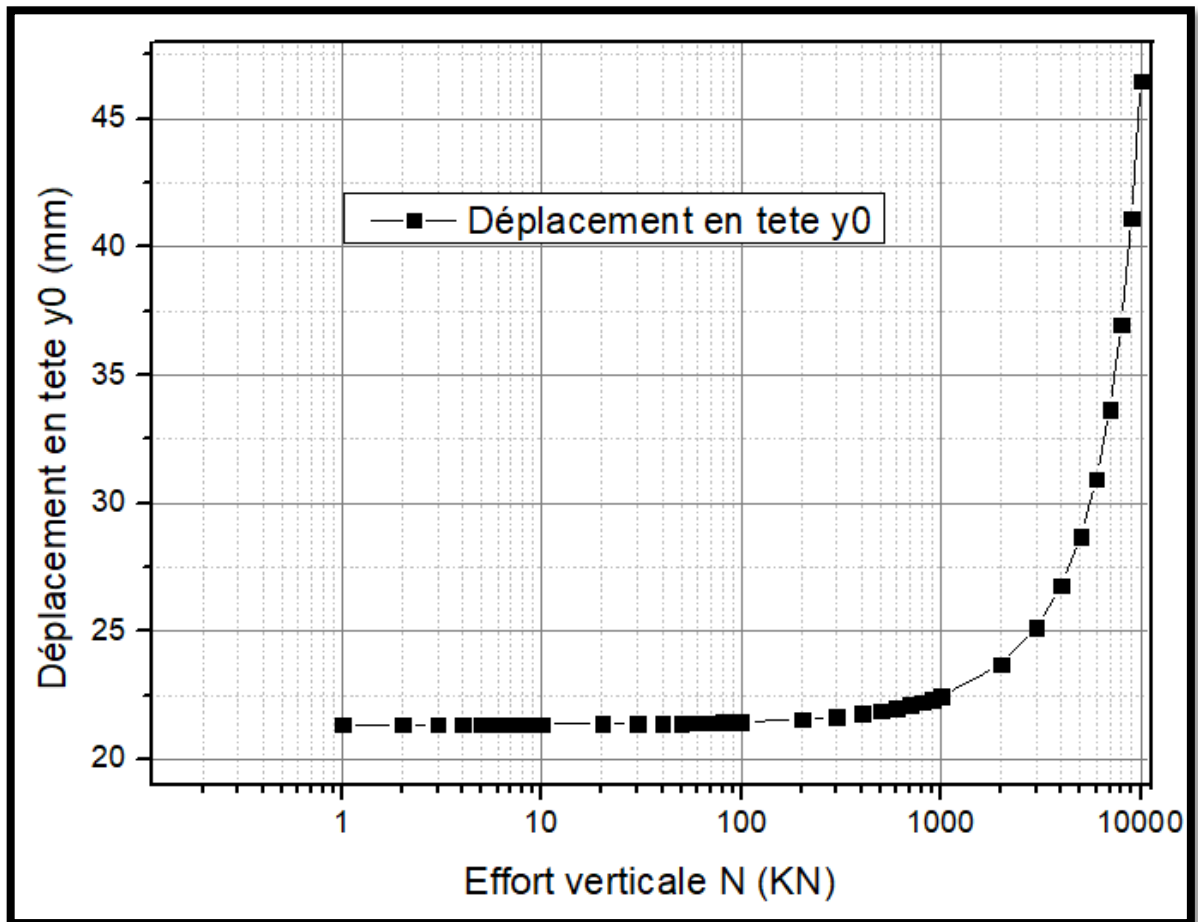


Figure 3.13 : variation du déplacement horizontal en tête en fonctions de l'effort vertical.

On remarque d'après la figure 3.13 que l'effort verticale de pieu a un effet amplificateur sur le déplacement d'un pieu sous un chargement combiné.

On pieu sous un chargement combiné avec une grande valeur de l'effort vertical N manifeste un déplacement plus grand que celui un pieu avec une valeur de N petite, on remarque aussi que l'augmentation des déplacements en tête est faible jusqu'à la valeur 10000 KN ou l'augmentation devient importante.

6. conclusion :

Dans ce chapitre, on a développé un programme de calcul du déplacement d'un pieu chargé latéralement et axialement. Ce programme constitue un outil de calcul, simple d'utilisation qui permet d'effectuer de calcul de déplacements latéraux du pieu.

Après la comparaison entre les résultats pour chaque effort vertical et à chaque profondeur, on remarque que les résultats de L-PULAL sont les mêmes qu'on a calculés manuellement. À travers ces résultats, on peut dire que le code de L-PULAL est valide et on peut l'utiliser dans une étude paramétrique.

On a fait un étude paramétrique simple et on a conclu que l'effort verticale, le module de réaction initial ont un effet sur le déplacement d'un pieu sous un chargement combiné, par contre la fiche de pieu n'a pas d'effet sur le déplacement.

**Etude de l'effet de
l'encastrement en tête
Sur un pieu chargé
latéralement**

1. Introduction :

En réalité, une fondation sur pieux comporte un groupe de pieux dont la tête est encadrée, dans une dalle de répartition des efforts, appelée aussi « semelle de coiffure des pieux ».

Ainsi, un pieu isolé de ce groupe se comporte en tant qu'encadré en tête. Or, l'étude d'un pieu libre en tête est plus facile à étudier et d'autre part donne des déplacements plus grands qu'un pieu encadré, ce qui est donc plus défavorable et sécuritaire.

On peut procéder à multiplier le déplacement Y_0 du pieu et le moment de flexion max M_{max} d'un pieu libre en tête par un coefficient C qui tient compte de l'encastrement en tête comme suit :

$$M_{C_{max}} = M_{max} * C_M$$

$$Y_{C_0} = Y_0 * C_Y$$

$$T_{C_{max}} = T_{max} * C_T$$

On étudiera C_M et C_Y à travers une étude paramétrique.

Ce chapitre expose une étude paramétrique de l'effet d'un encastrement en tête sur les efforts internes et les déplacements latéraux d'un pieu souple isolé.

Cette étude paramétrique est faite à l'aide programme SPULL-PARECT déjà présenté au 2ème chapitre. Elle consiste à étudier les effets de quelques paramètres géométriques et des différents cas de chargement latéral sur un pieu encadré en tête et on le compare au cas d'un pieu libre en tête.

Les résultats de cette étude sont présentés sous forme graphique et sous forme de tableau suivie d'une interprétation en vue de déterminer C_M et C_Y .

2. Étude de l'effet de l'encastrement en tête d'un pieu isolé chargé latéralement :

Nous allons lancer un calcul d'un pieu chargé latéralement dans deux cas : encasté en tête ou libre en tête pour les conditions aux limites suivantes :

Tableau 4.1: Les caractéristiques de pieu et de sol.

Les caractéristiques du pieu	Les caractéristiques du sol
D = 10 m B = 1 m Ep.Ip = 56650 KN. m ²	Pu = 150 KN/m Es = 5000 KPa

- Libre en tête :

$$H = 10 \text{ KN}, M = 10 \text{ KN.m.}$$

- Encastré en tête :

$$Y_0' = \frac{2.H}{Es.L^{02}} + \frac{4.M^0}{Es.L^{03}} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{2.H}{Es.L^{02}} = -\frac{4.M^0}{Es.L^{03}} \quad \rightarrow \quad H = -\frac{2.M^0}{L^0} \quad (4.1)$$

$$\rightarrow \boxed{Mc_0 = -\frac{1}{2} \cdot H \cdot L_0} \quad (4.2)$$

$$L_0 = \sqrt[4]{\frac{4.Ep.Ip}{Es}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 56650}{5000}} = 2.594 \text{ m}$$

$$Mc_0 = -\frac{1}{2} \cdot H \cdot 2.594$$

Pour H = 10 KN :

$$Mc_0 = -\frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 2.594 \rightarrow \boxed{Mc_0 = -12,97 \text{ KN. m}}$$

On obtient les résultats suivant :

- Pour un pieu libre en tête :

Déplacement et Rotation			
déplacement Yh en tete			3.266702
	Profondeur	Déplacement	Rotation
▶	0	2.143343	-1.057918
	1	1.202624	-0.8207409
	2	0.5202258	-0.5458899

Figure 4.1 : Le déplacement pour un pieu libre en tête.

$Y_0 = 2,15 \text{ mm}$.

Efforts internes					
	z	effort tranchant	moment fléchissant	Réaction latérale	Y(z)/Yr(z)
▶	0	10	10	10,55712	0,03583238
	1	1,800836	15,50898	5,952859	7,215745E-0
	2	-2,373244	14,93975	2,589853	3,121355E-0

Figure 4.2 : L'effort tranchant et le moment fléchissant pour un pieu libre en tête.

$T_{\max} = 10 \text{ KN}$ et $Z_{T_{\max}} = 0\text{m}$.

$M_{\max} = 15,51 \text{ KN.m}$ et $Z_{M_{\max}} = 1\text{m}$.

- Pour un pieu encasté en tête :

Déplacement et Rotation			
déplacement Yh en tete			0,6458555
	Profondeur	Déplacement	Rotation
▶	0	0,7748352	-0,0004620942
	1	0,6865107	-0,1523347

Figure 4.3 : Le déplacement pour un pieu encasté en tête.

$Y_{0c} = 0,77\text{mm}$.

Efforts internes					
	z	effort tranchant	moment fléchissant	Réaction latérale	Y(z)/Yr(z)
▶	0	10	-12,97	3,849161	0,01291392
	1	6,30499	-4,855082	3,412916	4,119064E-0

Figure 4.4 : L'effort tranchant et le moment fléchissant pour un pieu encasté en tête.

$T_{\max} = 10 \text{ KN}$ et $Z_{T_{\max}} = 0\text{m}$.

$M_{\max} = -12,97 \text{ KN.m}$ et $Z_{M_{\max}} = 0\text{m}$.

On étudie les rapports suivants :

$$Y_0/Y_{0c} = 2,79$$

$$T_{\max}/T_{c\max} = 1$$

$$M_{\max}/M_{c\max} = -1,19$$

Conclusion :

On remarque que le déplacement latéral en tête du pieu est réduit de deux fois lorsque le pieu est encasté en tête par rapport à un pieu libre.

L'effort tranchant maximal se trouve en surface et il reste le même dans le cas d'un pieu encasté.

La profondeur de moment maximale est différente dans les deux cas, quand le pieu est libre on trouve que le moment max se trouve à une profondeur de 1m, et quand le pieu est encasté le moment max se trouve en surface $z = 0m$.

3. Etude de l'effet de l'encastrement en tête d'un pieu isolé chargé latéralement à partir d'une étude paramétrique :

- Si la tête est encadrée la rotation est interdite.

$$Y'_0 = 0 \rightarrow \frac{2.H}{E_s.L^0^2} + \frac{4.M}{E_s.L^0^2} = 0 \quad (4.3)$$

On obtient M_{0c} le moment de l'encastrement :

$$M_{0c} = -\frac{1}{2}.H.L_0 \quad (4.4)$$

Pour un effort latéral : $H = 10 \text{ KN} \rightarrow M_{0c} = -12,97 \text{ KN.m.}$

3.1. Etude paramétrique de l'influence de l'effort latérale H :

On considère un pieu souple ($D > 3*L_0$) avec les propriétés suivantes :

$B = 1\text{m}$, $D = 10\text{m}$, $E_p I_p = 56650 \text{ KN. m}^2$ et $E_s = 5000 \text{ KPa}$

Nous allons charger ce pieu avec un effort latéral H et on augmente la charge jusqu'à $H_u = 300 \text{ KN}$ (résistance latérale).

- a) Sur les déplacements latéraux :

Nous allons calculer le rapport C_Y des déplacements latéraux d'un pieu encadré en tête sur les déplacements d'un pieu libre en tête $Y_c(z)/Y(z)$ (Y_c signifie le déplacement d'un pieu encadré en tête et Y signifie le déplacement d'un pieu libre en tête).

Tableau 4.2 : Rapport des déplacements latéraux $C_Y = Y_c(z)/Y(z)$.

Profondeur (m)	L'effort latéral H (KN)						
	H = 10 KN	H = 20 KN	H = 50 KN	H = 100 KN	H = 150 KN	H = 250 KN	H = 300 KN
0	0.3604	0.36009	0.35898	0.35621	0.35982	0.34067	0.32607
1	0.57084	0.56913	0.56364	0.55289	0.54232	0.50922	0.47426
2	0.9755	0.96948	0.95084	0.91695	0.88287	0.78681	0.71501
3	3.30307	3.22929	3.01698	2.68663	2.39179	1.79883	1.47959
4	-1.43967	-1.45483	-1.50369	-1.60243	-1.7365	-2.24642	-2.94289
5	-0.34272	-0.34348	-0.34581	-0.35005	-0.35563	-0.36821	-0.03766
6	-0.02533	-0.0252	-0.02483	-0.02428	-0.02349	-0.02154	-0.02021
7	0.18048	0.18038	0.17919	0.1789	0.17824	0.17366	0.16831
8	0.43613	0.4347	0.43062	0.42258	0.41474	0.38815	0.36657
9	1.35163	1.3377	1.29416	1.22107	1.14944	0.97484	0.85975
10	-1.66686	-1.94306	-2.04637	-2.26596	-2.58712	-4.20332	-8.41391

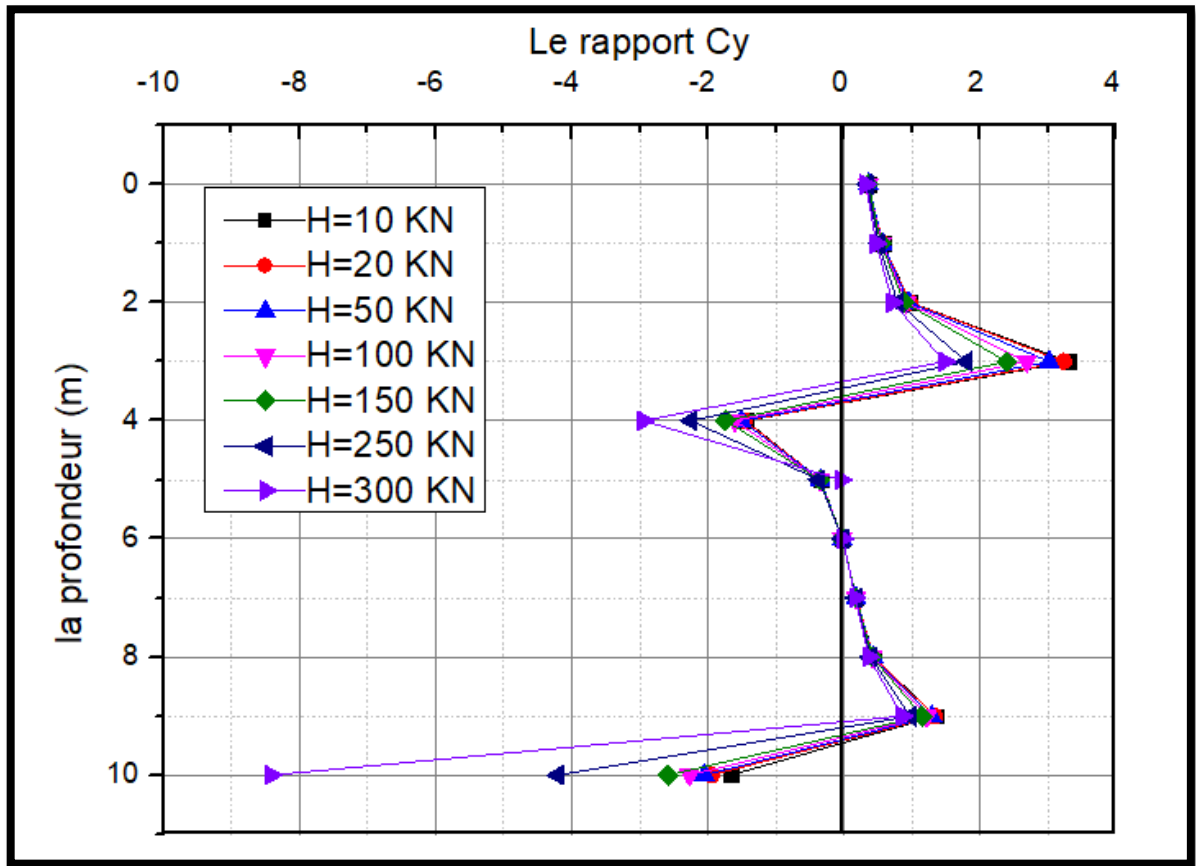


Figure 4.5 : Le Rapport $C_Y = Y_c(z)/Y(z)$ en fonction de profondeur.

- D'après ce graphe on constate que le coefficient C_Y varie peu avec l'effort latéral et prend la valeur C_Y en surface de 0.36 à 0.32. Ce qui nous intéresse dans un projet est le déplacement Y_0 en surface du pieu.

b) Sur l'effort tranchant :

Nous allons calculer le rapport C_T de l'effort tranchant d'un pieu encastré en tête sur l'effort tranchant d'un pieu libre en tête $T_c(z)/T(z)$ (soit T_c l'effort tranchant d'un pieu encastré en tête et T l'effort tranchant d'un pieu libre en tête).

Tableau 4.3 : Le rapport de l'effort tranchant $C_T = T_c(z)/T(z)$.

Profondeur (m)	L'effort latéral H (KN)						
	H = 10 KN	H = 20 KN	H = 50 KN	H = 100 KN	H = 150 KN	H = 250 KN	H = 300 KN
0	1	1	1	1	1	1	1
1	3.50115	3.44113	3.26582	2.98508	2.80507	2.17517	1.8715
2	-1.39747	-1.40956	-1.44845	-1.52636	-1.62843	-1.99863	-2.44849
3	-0.32886	-0.32939	-0.3309	-0.33363	-0.33708	-0.34452	-0.2786
4	-0.01041	-0.01025	-0.0097	-0.00885	-0.00766	-0.00509	-0.00358
5	0.19014	0.19017	0.19014	0.18975	0.18982	0.18656	0.18177
6	0.38386	0.3831	0.38059	0.37559	0.37095	0.35312	0.33641
7	0.66322	0.66009	0.65031	0.63244	0.61475	0.56248	0.5215

8	1.34004	1.3257	1.28286	1.21003	1.13937	0.96683	0.85388
9	11.16718	10.21249	8.10436	5.85591	4.45887	2.6367	1.96065
10	-2.74551	-0.59881	-14.46339	-2.68479	2.1981	-7.03458	-12.63034

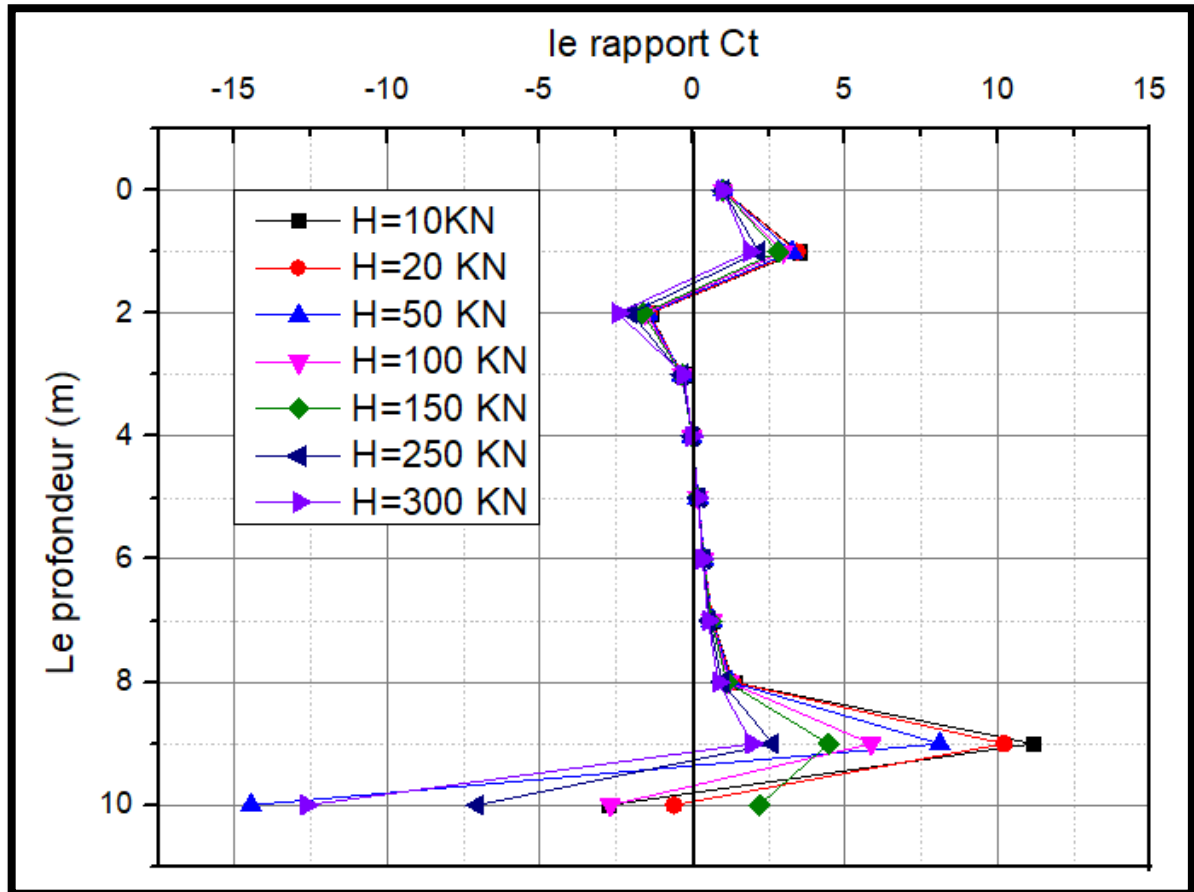


Figure 4.6 : Le rapport $C_T = T_c(z)/T(z)$ en fonction de profondeur.

- D'après le graphe en dessus on remarque que le coefficient C_T en surface reste constant avec l'augmentation de l'effort latéral H , le coefficient C_T en tête = 1.

c) Sur le moment de flexion :

Nous allons calculer le rapport C_M de moment de flexion d'un pieu encasté en tête sur l'effort tranchant d'un pieu libre en tête $M_c(z)/M(z)$ (soit M_c le moment d'un pieu encasté en tête et M e moment de flexion d'un pieu libre en tête).

Tableau 4.4 : Le rapport de moment de flexion $C_M = M_c(z)/M(z)$.

Profondeur (m)	L'effort latéral H (KN)						
	H = 10 KN	H = 20 KN	H = 50 KN	H = 100 KN	H = 150 KN	H = 250 KN	H = 300 KN
0	-1.297	-1.297	-1.297	-1.297	-1.297	-1.297	-1.297
1	-0.31305	-0.31254	-0.31095	-0.30808	-0.30474	-0.02962	-0.28994
2	-0.00798	-0.00753	-0.00609	-0.00366	6.7E-4	0.00541	0.00865
3	0.1791	0.17921	0.17944	0.17956	0.18015	0.17806	0.174
4	0.3418	0.34928	0.33947	0.33596	0.33269	0.31866	0.30477
5	0.52636	0.52458	0.51911	0.50866	0.49847	0.465	0.43662
6	0.38199	0.79112	0.77705	0.75148	0.72612	0.6544	0.60032
7	1.3315	1.31767	1.27636	1.20526	1.13616	0.96643	0.85453
8	3.3057	3.21568	2.97384	2.60684	2.29129	1.69115	1.38208
9	-8.43199	-9.06464	-11.8077	-26.7025	60.96899	5.91958	3.3745
10	-1.49292	-0.44373	0.07838	4.27793	4.85911	3.78127	8.13175

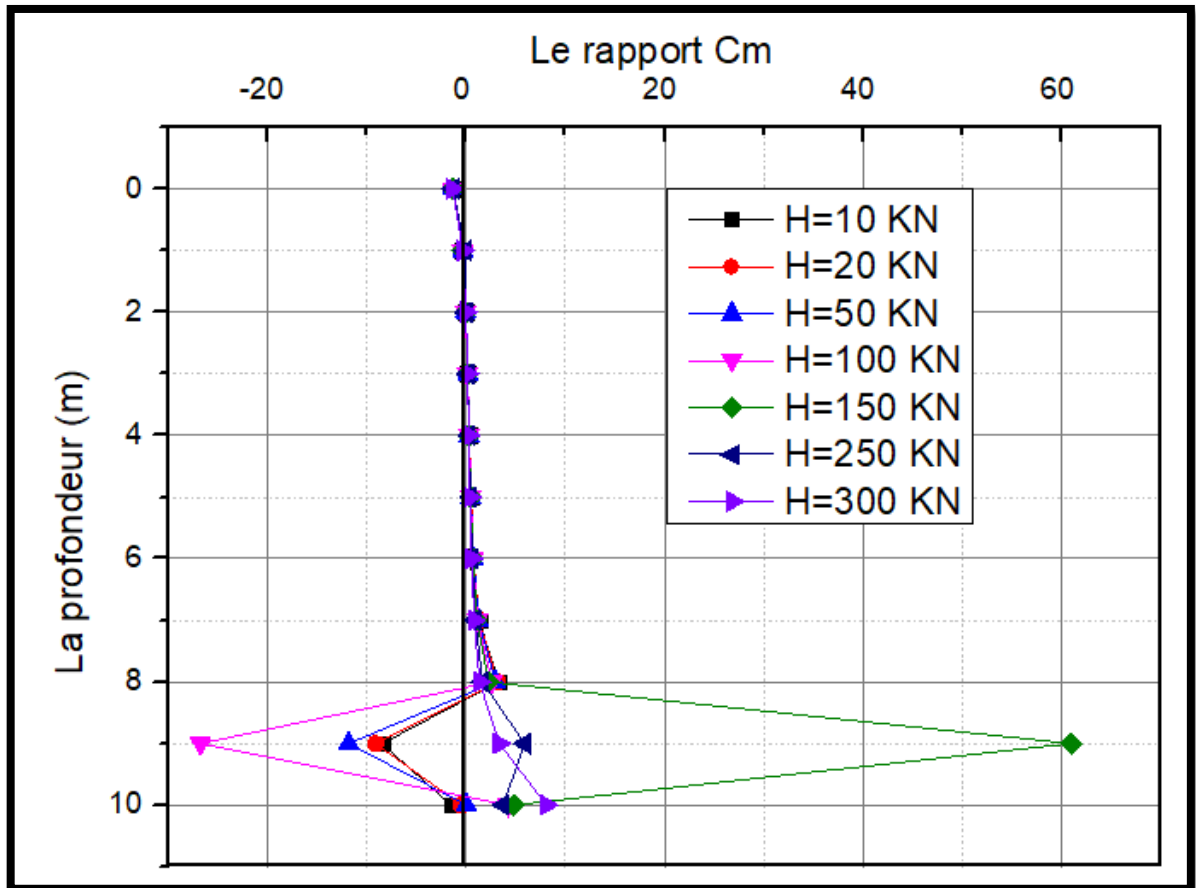


Figure 4.7 : Le rapport $C_M = M_c(z)/M(z)$ en fonction de profondeur.

- D'après les résultats obtenus on constate que le coefficient C_M de moment de flexion est constant en tête : $C_M = -1.297$.

3.2. Étude paramétrique de l'influence de la rigidité flexionnelle $E_p I_p$ du pieu :

On considère un pieu souple avec les mêmes caractéristiques que le précédent et on fixe la fiche D, le diamètre B, le module de réaction E_s , nous allons augmenter la rigidité flexionnelle de pieu et on calcule les déplacements latéraux et l'effort tranchant et le moment de flexion pour un pieu libre en tête et encasté en tête.

On prend : $E_p I_p = 150 \text{ MN. m}^2$, $E_p I_p = 500 \text{ MN. m}^2$, $E_p I_p = 1000 \text{ MN. m}^2$

a) Sur les déplacements latéraux :

Nous allons calculer le coefficient C_Y de déplacement latéral afin d'étudier l'effet de l'encastrement en tête sur le rapport de déplacement latéral, en surface

Tableau 4.5 : Le rapport $C_Y = Y_c(z)/Y(z)$.

Profondeur (m)	La rigidité flexionnelle $E_p I_p$ (MN. m ²)		
	$E_p I_p = 150$	$E_p I_p = 500$	$E_p I_p = 1000$
0	0.46902	0.58506	0.63226
1	0.60753	0.66172	0.68441
2	0.80871	0.75419	0.74564
3	1.21908	0.88472	0.8276
4	3.25197	1.11849	0.9632
5	-1.93637	1.87862	1.3063
6	-0.34872	-3.17639	9.21154
7	0.06629	-0.07109	-0.13747
8	0.33086	0.29867	0.29259
9	0.58002	0.4548	0.43291
10	0.85578	0.54432	0.50383

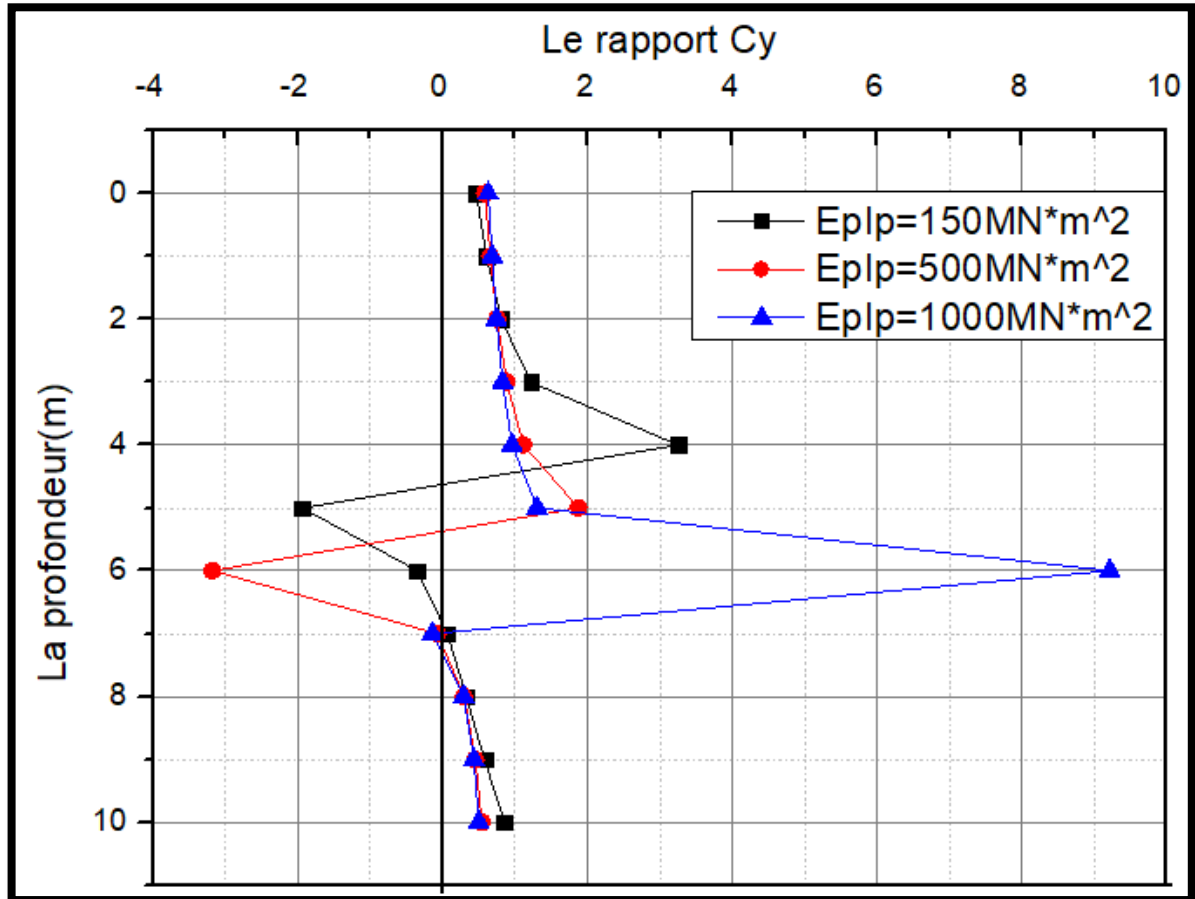


Figure 4.8 : Le rapport $C_Y = Y_c(z)/Y(z)$ en fonction de profondeur.

-On constate une faible influence de la rigidité flexionnelle E_{pI_p} lorsqu'elle augmente de 150 à 1000 MN.m², soit environ 6.5 fois, le coefficient C_Y du déplacement augmente de 0.47 à 0.63 soit de : 34 % seulement.

b) Sur l'effort tranchant :

Pour but d'étudier l'effet de la rigidité sur un pieu encasté en tête, nous allons un coefficient C_T de l'effort tranchant d'un pieu encasté sur l'effort tranchant d'un pieu libre ($T_c(z)/T(z)$).

Tableau4.6 : Le rapport $C_T = T_c(z)/T(z)$.

Profondeur (m)	La rigidité flexionnelle (MN. m ²)		
	$E_{pI_p} = 150$	$E_{pI_p} = 500$	$E_{pI_p} = 1000$
0	1	1	1
1	1.86201	1.3978	1.30451
2	-7.07099	3.73188	-1.72178
3	-0.62367	-1.41921	-2.08397
4	-0.08047	-0.17111	-0.20304

5	0.15713	0.14546	0.14139
6	0.31633	0.29631	0.291
7	0.45049	0.39156	0.37692
8	0.57973	0.45532	0.43359
9	0.71341	0.50548	0.47417
10	0.03174	-7.17719	0.08729

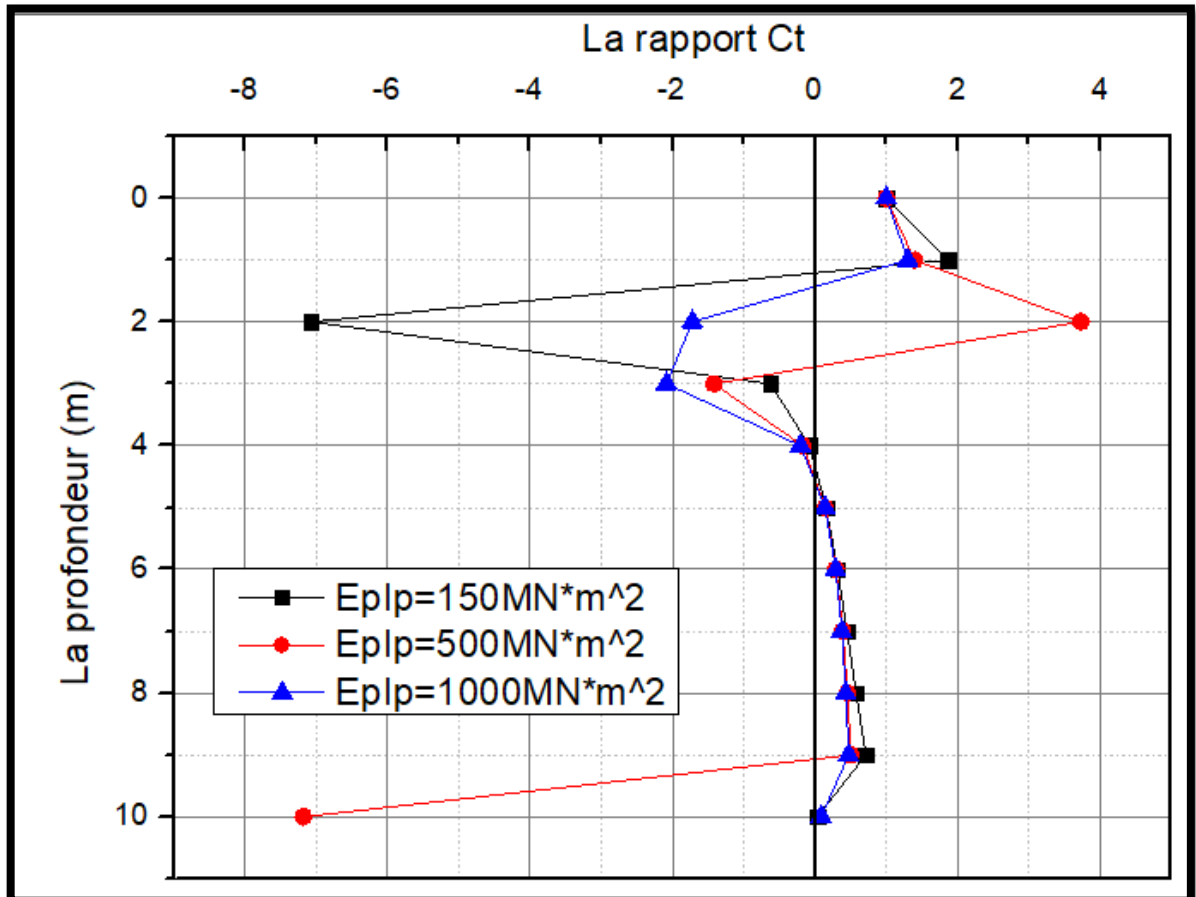


Figure 4.9 : Le rapport $C_T = T_c(z)/T(z)$ en fonction de profondeur.

- En conclusion, l'effet de la rigidité $E_p I_p$ n'intervient pas, le coefficient C_T est constant en surface.

c) Sur le moment de flexion :

Afin d'étudier l'influence de la rigidité flexionnelle du pieu sur le rapport du moment de flexion maximal $C_M = M_c(z)/M(z)$, on lance un calcul en augmentant à chaque fois la rigidité $E_p I_p$, on s'intéresse au moment de flexion en surface (c'est le cas le plus défavorable).

Tableau 4.7 : Le rapport $C_M = M_c(z)/M(z)$.

Profondeur (m)	La rigidité flexionnelle $E_p I_p$ (MN.m ²)		
	$E_p I_p = 150$	$E_p I_p = 500$	$E_p I_p = 1000$
0	-1.297	-1.297	-1.297

1	-0.28687	-0.26567	-0.25988
2	0.01939	0.04176	0.04737
3	0.18639	0.19628	0.1982
4	0.30469	0.29414	0.28969
5	0.40255	0.3597	0.35214
6	0.49207	0.41107	0.39806
7	0.57938	0.44809	0.43355
8	0.66802	0.49006	0.46196
9	0.75984	0.51971	0.4852
10	1.20429	-1.31712	-6.82572

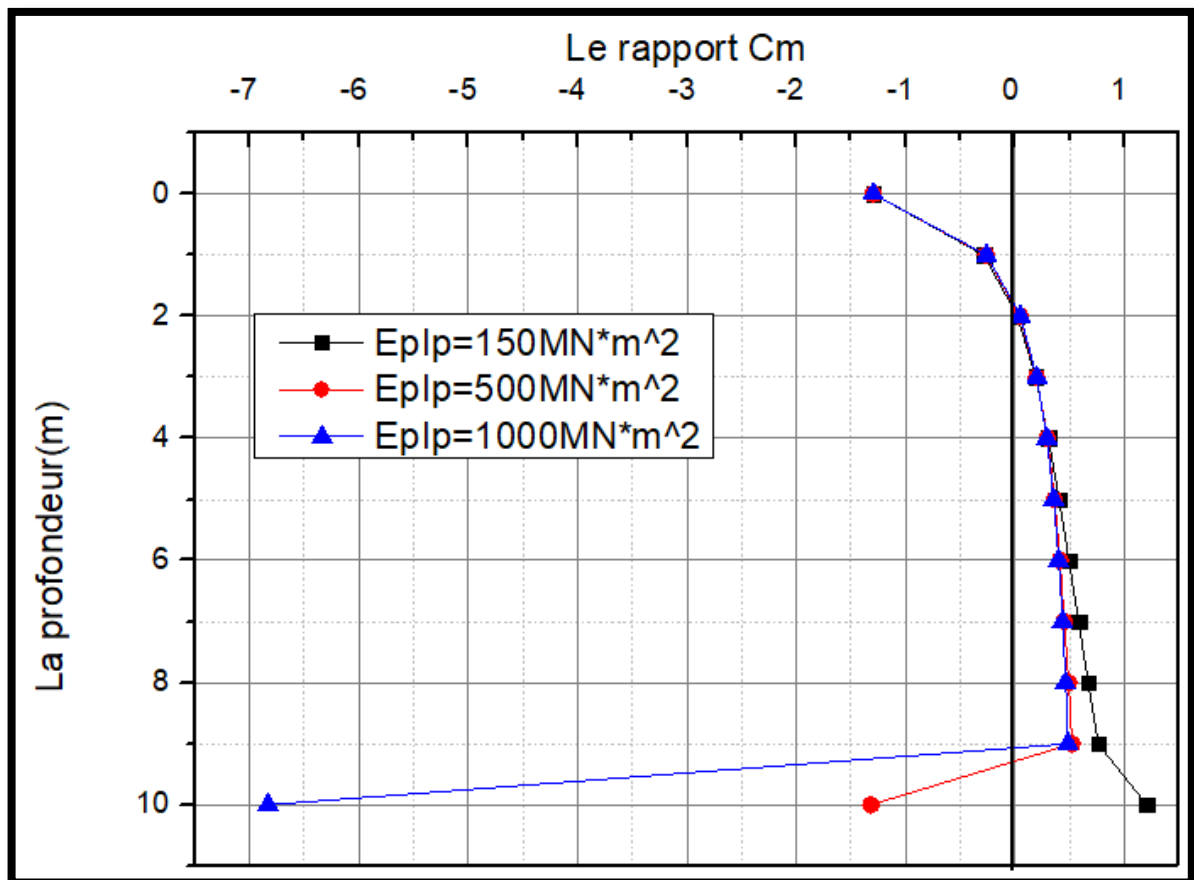


Figure 4.10 : Le rapport $C_M = M_c(z)/M(z)$ en fonction de profondeur.

- On constate que l'augmentation de la rigidité flexionnelle E_{pI_p} n'a pas d'influence, le coefficient C_M est constant

3.3. Étude paramétrique de l'influence de la fiche D du pieu :

Maintenant, on fixe le diamètre, la rigidité flexionnelle $E_p I_p$, et on fixe les conditions aux limites M et H, nous allons augmenter la fiche D de pieu

On prend : D=8m, D=9m, D=10m, D=11m.

a) Sur les déplacements latéraux :

Dans le but d'étudier l'influence de la géométrie sur un pieu encasté en tête, on calcule le coefficient $C_Y = Y_c(z)/Y(z)$. Nous allons augmenter le fiche D et on prend les valeurs de coefficient C_Y obtenus en surface.

Tableau 4.8 : Le rapport $C_Y = Y_c(z)/Y(z)$.

Profondeur (m)	La fiche D (m)			
	D= 8 m	D= 9 m	D= 10 m	D=11 m
0	0.36291	0.36093	0.3604	0.36048
1	0.57552	0.5726	0.57084	0.57025
2	0.98399	0.98123	0.9755	0.9715
3	3.24481	3.33731	3.30307	3.23128
4	-1.50634	-1.46818	-1.43967	-1.45028
5	-0.31118	-0.34927	-0.34272	-0.33781
6	0.09044	-0.00732	-0.02533	-0.02211
7	0.44041	0.26005	0.18048	0.16711
8	0.9001	0.69832	0.43613	0.34753
9		2.46068	1.34442	0.6922
10			-1.9113	-22.81436
11				-0.40678

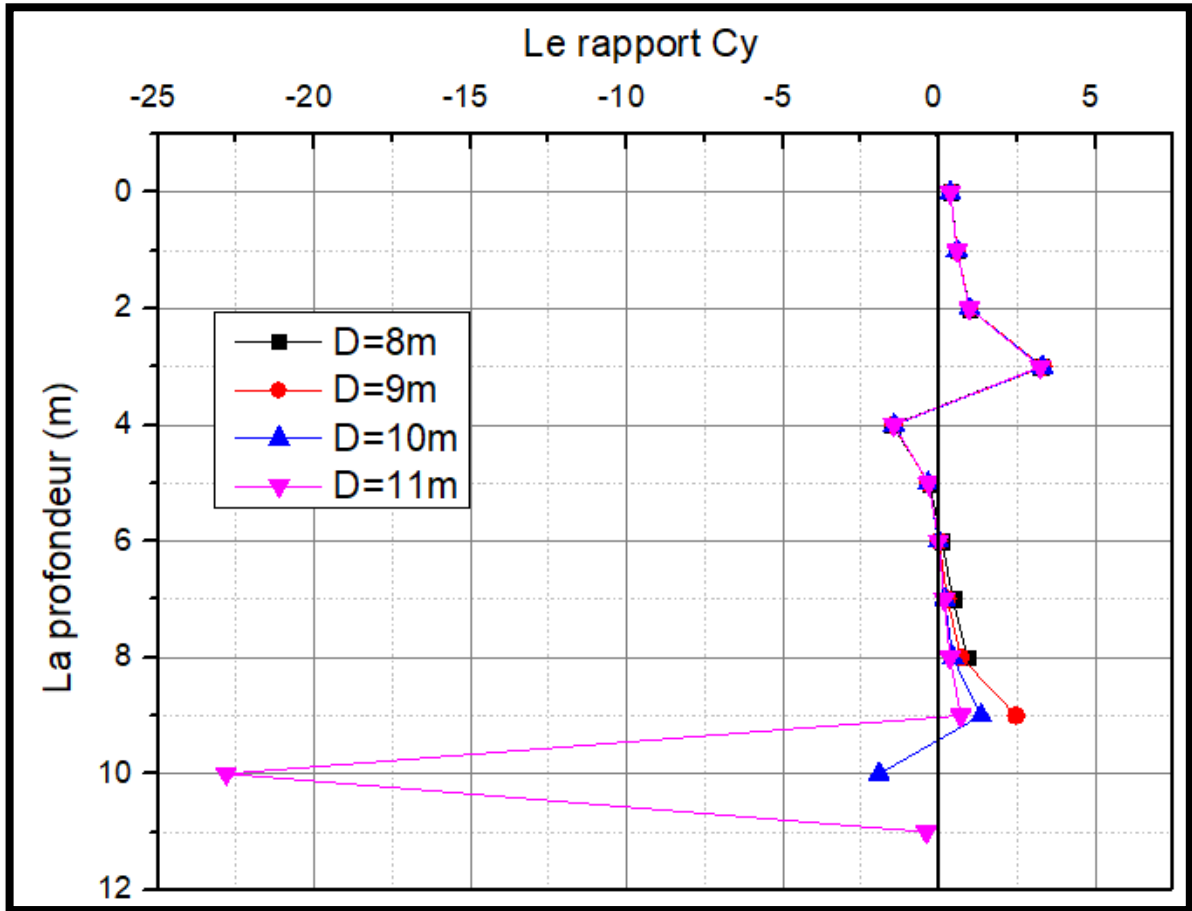


Figure 4.11 : Le rapport $C_Y=Y_c(z)/Y(z)$ en fonction de profondeur.

- D'après le graphe, on remarque que l'augmentation de la fiche D n'a pas d'effet sur le coefficient C_Y de déplacement latéral en tête, $C_Y=0.36$ et ne varie pas.

b) Sur l'effort tranchant :

Nous allons augmenter la valeur de la fiche D et on calcule le rapport $C_T=T_c(z)/T(z)$ pour but d'étudier l'influence de la fiche sur le coefficient C_T , ensuite on trace le graphe qui convient.

Tableau 4.9 : Le rapport $C_T=T_c(z)/T(z)$.

Profondeur (m)	La fiche D (m)			
	D=8m	D=9m	D=10m	D=11m
0	1	1	1	1
1	3.53205	3.49809	3.50115	3.50295
2	-1.32941	-1.38738	-1.39747	-1.39659
3	-0.28669	-0.31848	-0.32886	-0.33063
4	0.0367	0.00505	-0.01041	-0.01545

5	0.24674	0.26799	0.19014	0.17839
6	0.4387	0.41954	0.38386	0.3577
7	0.6492	0.69492	0.66321	0.60576
8	-4.45958	1.18588	1.34002	1.23191
9		5.02474	11.16718	28.76864
10			-2.74858	-0.93936
11				1.18969

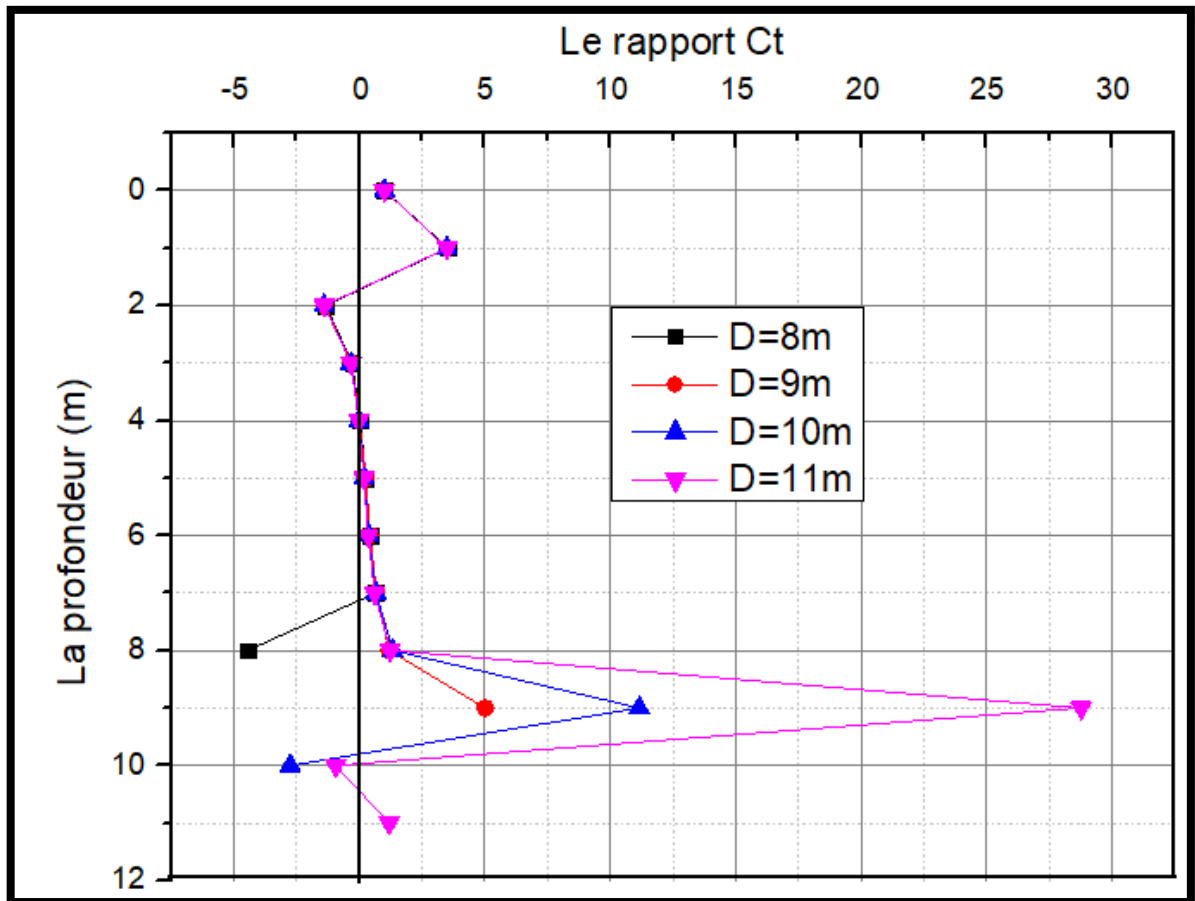


Figure 4.12 : Le rapport $C_T=T_c(z)/T(z)$ en fonction de profondeur.

- D'après les résultats obtenus de coefficient C_T en surface, on constate que la fiche n'a pas d'effet sur l'effort tranchant maximal en surface $C_T=1$, le coefficient est constant

c) Sur le moment de flexion :

Pour étudier l'effet de la fiche D , on calcule le rapport $C_M=Mc(z)/M(z)$ en augmentant la fiche D , on compare les résultats obtenus de coefficient C_M moment de flexion maximal en tête.

Tableau 4.10 : Le rapport $C_M=Mc(z)/M(z)$.

Profondeur (m)	La fiche D(m)			
	D=8m	D=9m	D=10m	D=11m
0	-1.297	-1.297	-1.297	-1.297
1	-0.31458	-0.3133	-0.31305	-0.31304
2	-0.01358	-0.00921	-0.00798	-0.00781
3	0.16409	0.17499	0.1791	0.1801
4	0.30492	0.32972	0.3418	0.34612
5	0.43732	0.49169	0.52637	0.5434
6	0.57531	0.69255	0.79569	0.86823
7	0.72745	0.98066	1.3315	1.77458
8	-0.29308	1.46161	3.30341	-3.51634
9		2.64864	-8.43197	-1.44986
10			-1.49246	-0.67741
11				0.26689

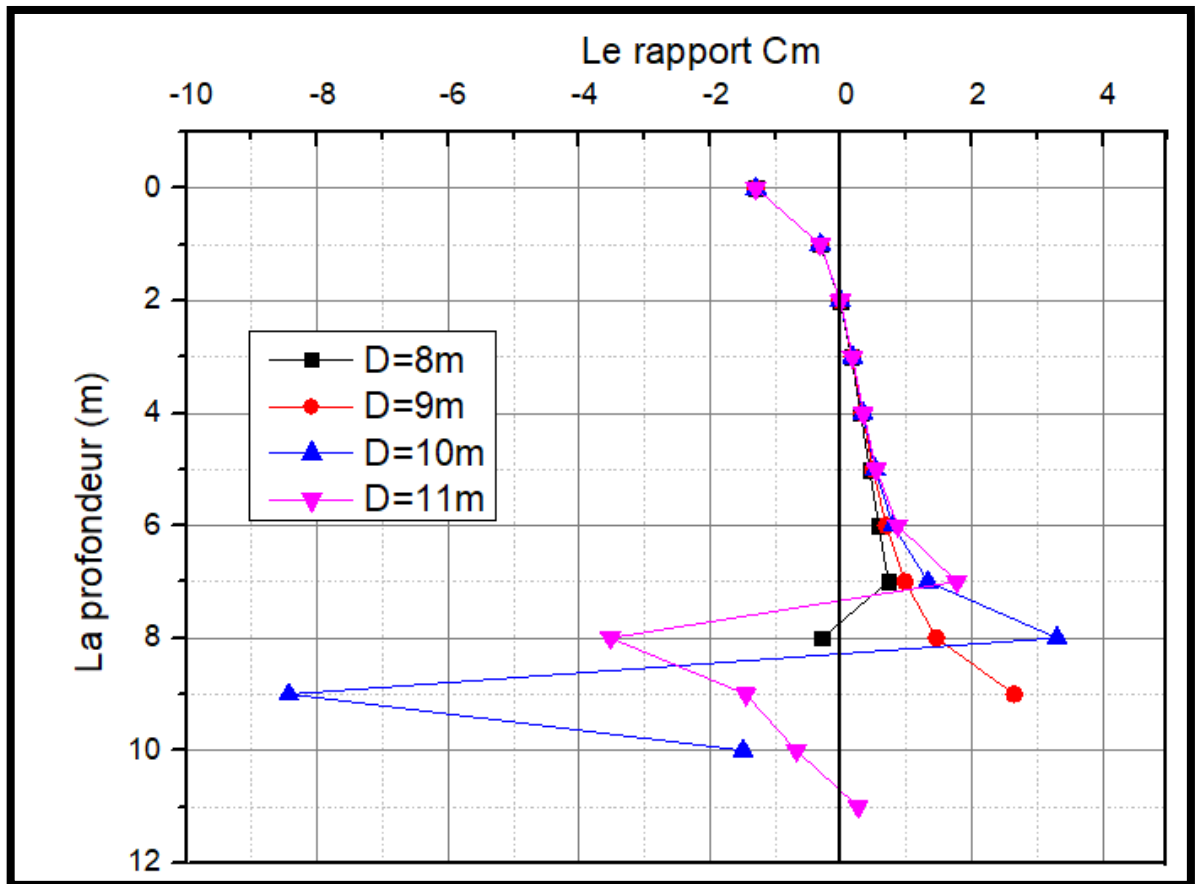


Figure 4.13 : Le rapport $C_M=Mc(z)/M(z)$ en fonction de profondeur.

- Pour conclusion, la fiche D n'a pas d'influence sur le coefficient de moment de flexion maximal en surface C_M , ce dernier ne varie pas $C_M=-1,297$.

4. Conclusion :

On a lancé un calcul avec le programme SPULL-PARECT pour étudier l'effet de l'encastrement en tête sur son comportement sous charge latéral.

On constate que l'encastrement en tête d'un pieu sous charge latéral à un effet réducteur sur le déplacement latéral en surface et le moment de flexion maximal.

La géométrie du pieu n'a pas d'influence sur le comportement du pieu, d'autre part la rigidité flexionnelle du pieu à une influence sur son comportement, car on remarque une diminution de déplacement latéral en surface parallèlement avec l'augmentation de la rigidité flexionnelle $E_p I_p$.

Conclusion générale :

On a présenté dans ce mémoire un travail de recherche appliqué sur le comportement d'un pieu isolé sous un chargement combiné et l'étude de l'effet de l'encastrement en utilisant la méthode des courbes de réactions (p-y). Ce travail présente une comparaison entre les résultats obtenus par SPULL-PARECT version DOS avec celles obtenues de SPULL-PARECT version VB.NET.

Le comportement du sol entourant d'un pieu chargé latéralement peut être décrit en termes de courbes P- y, qui relie la résistance du sol à la déflexion du pieu à différentes profondeurs sous la surface du sol.

On a développé aussi un programme "L-PULAL" pour le calcul de pieu sous un chargement combiné au cas d'un sol monocouche. "L-PULAL" a été validé par la confrontation des résultats avec ceux d'un autre calculé manuellement. Les résultats ont montré que le chargement vertical fait augmenter le déplacement latéral d'un pieu à partir d'un certain seuil.

Pour d'éventuels futurs travaux de recherches, on propose de :

- Amélioration du logiciel SPULL-PARECT, avec une meilleure interface, plus interactive, et lui rajouter d'autres modes de calculs, liés à la stabilité des pieux.
- Amélioration du programme "L-PULAL" pour le calcul de pieu sous un chargement combiné au cas d'un sol multicouche pour arriver à une méthode pratique de calcul de pieux sous un chargement combiné et la validation par la comparaison avec des essais de chargement combiné de pieu.
- Cette méthode de calcul d'un pieu sous chargement combiné doit être comparé avec des essais de chargement combiné d'un pieu, et amélioré par la suite.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] LUC SIBILLE., « Bases de la Géotechnique Module MXG4 IUT Génie Civil et Construction Durable ». (Licence. France. 2018).
- [2] FRANK, R., « Calcul des Fondations Superficielles et Profondes », Technique de l'ingénieur et presse de l'ENPC, (1999).
- [3] Plumelle.C., (2003), « Fondations profondes, Chapitre18 », Cnam-Paris-Géotechnique.
- [4] Omar Alsamman., « Ph.D., P.E, Axial Load Test Procedures for Pile Foundations, Continuing Education and Development, Inc ».
- [5] MCIF., « manuel canadien d'Ingénierie des fondation », 2006. Cité par (Bakour, 2008).
- [6] Lotfi Merabet, Omar Louahadj., « Modélisation Numérique D'un Pieu Isolé Sous Charge Axiale », université KasdiMerbah Ouargla.
- [7] Laouedj, A., « Pieux sous charges horizontales-développement d'un programme de calcul Etude comparative des méthodes de calcul a la base des courbes de réaction P-y », mémoire de master, Université Saad Dahleb Blida, (2011), 35-50.
- [8] Broms, B. B., « Lateral resistance of piles in cohesionless soils », Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol.90(SM 3), (1964),123-148.
- [9] J.A.T. Ruigrok., « Laterally Loaded Piles: Models and Measurements », master thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, Nederland, (2010),58-62.
- [10] Poulos, h.g.and Davis, e.h., « Pile foundation analysis and design », John Wiley Sons, New York, (1980),143-151.
- [11] Zhang, L et Silva, F et Grismala R., « Ultimate Lateral Resistance to Piles in Cohesionless Soils », Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE,

(JAN 2005),78-80.

[12] Cassan, M. (1978). « Les essais in-situ en Mécanique des sols », Tome II, Applications et méthodes de calcul. Edition Eyrolles, 331 p.

ANNEXE 01

1. L'effet de l'effort axial N :

Profondeur (m)	Effort axial N (KN)					
	N=0 KN	N=1 KN	N=2 KN	N=3 KN	N=4 KN	N=5 KN
0	21,35832	21,35937	21,3604	21,3604	21,36249	21,36352
1	11,94225	11,94277	11,94327	11,94327	11,94429	11,9448
2	5,17278	5,17288	5,17298	5,17298	5,17318	5,17327
3	0,99569	0,99554	0,99539	0,99539	0,99508	0,99493
4	-1,13796	-1,13823	-1,13849	-1,13849	-1,13901	-1,13927
5	-1,8951	-1,89536	-1,89563	-1,89563	-1,89617	-1,89644
6	-1,8624	-1,86262	-1,86284	-1,86284	-1,86328	-1,8635
7	-1,47092	-1,47107	-1,47122	-1,47122	-1,47152	-1,47167
8	-0,99256	-0,99264	-0,99273	-0,99273	-0,9929	-0,99298
9	-0,57068	-0,57071	-0,57074	-0,57074	-0,57081	-0,57085
10	-0,26018	-0,26018	-0,26018	-0,26018	-0,26018	-0,26018

Profondeur (m)	Effort axial N (KN)				
	N=6 KN	N=7 KN	N=8 KN	N=9 KN	N=10KN
0	21,36457	21,3656	21,36665	21,36768	21,36873
1	11,94531	11,94582	11,94633	11,94683	11,94735
2	5,17337	5,17347	5,17357	5,17366	5,17377
3	0,99478	0,99463	0,99447	0,99432	0,99417
4	-1,13953	-1,13979	-1,14005	-1,14032	-1,14058
5	-1,89671	-1,89697	-1,89724	-1,89751	-1,89778
6	-1,86372	-1,86394	-1,86416	-1,86438	-1,8646
7	-1,47182	-1,47197	-1,47213	-1,47228	-1,47243
8	-0,99307	-0,99315	-0,99324	-0,99332	-0,99341
9	-0,57088	-0,57091	-0,57095	-0,57098	-0,57101
10	-0,26018	-0,26018	-0,26018	-0,26018	-0,26018

Profondeur (m)	Effort axial N (KN)				
	N=20KN	N=30KN	N=40KN	N=50KN	N=60KN
0	21,37914	21,38958	21,40002	21,41047	21,42094
1	11,95244	11,95755	11,96266	11,96777	11,97289
2	5,17475	5,17574	5,17673	5,17771	5,1787
3	0,99264	0,99111	0,98958	0,98805	0,98651
4	-1,14319	-1,1458	-1,14842	-1,15105	-1,15367
5	-1,90047	-1,90316	-1,90586	-1,90856	-1,91126
6	-1,8668	-1,86901	-1,87121	-1,87342	-1,87564
7	-1,47394	-1,47545	-1,47696	-1,47848	-1,48
8	-0,99426	-0,99511	-0,99596	-0,99681	-0,99767

9	-0,57135	-0,57169	-0,57203	-0,57236	-0,5727
10	-0,26019	-0,26019	-0,26019	-0,26019	-0,2602

Profondeur (m)	Effort axial N(KN)				
	N=70 KN	N=80 KN	N=90KN	N=100KN	N=200KN
0	21,43142	21,44191	21,45242	21,46294	21,56877
1	11,97802	11,98315	11,98829	11,99344	12,04521
2	5,17969	5,18069	5,18168	5,18267	5,19266
3	0,98497	0,98343	0,98189	0,98035	0,96479
4	-1,1563	-1,15894	-1,16157	-1,16421	-1,19081
5	-1,91397	-1,91668	-1,91939	-1,9221	-1,94945
6	-1,87785	-1,88007	-1,88229	-1,88451	-1,90689
7	-1,48152	-1,48304	-1,48456	-1,48608	-1,50142
8	-0,99852	-0,99937	-1,00023	-1,00109	-1,00969
9	-0,57304	-0,57338	-0,57371	-0,57405	-0,57744
10	-0,2602	-0,2602	-0,2602	-0,2602	-0,2602

Profondeur (m)	Effort axial N(KN)				
	N=300 KN	N=400 KN	N=500 KN	N=600 KN	N=700 KN
0	21,67585	21,78419	21,89383	22,00478	22,11708
1	12,09758	12,15056	12,20417	12,2584	12,31328
2	5,20273	5,2129	5,22317	5,23354	5,24401
3	0,94901	0,93301	0,91678	0,90033	0,88364
4	-1,21775	-1,24504	-1,27269	-1,30072	-1,32911
5	-1,97715	-2,0052	-2,03361	-2,06239	-2,09154
6	-1,92954	-1,95247	-1,97568	-1,99918	-2,02297
7	-1,51693	-1,53261	-1,54847	-1,56451	-1,58074
8	-1,01838	-1,02714	-1,03599	-1,04492	-1,05393
9	-0,58083	-0,58424	-0,58765	-0,59108	-0,59452
10	-0,26016	-0,26009	-0,25999	-0,25986	-0,25969

Profondeur (m)	L'effort axial N(KN)				
	N=800KN	N=900KN	N=1000KN	N=2000KN	N=3000KN
0	22,23073	22,34578	22,46224	23,71101	25,13581
1	12,36882	12,42502	12,4819	13,0912	13,78508
2	5,254575	5,26525	5,276028	5,390088	5,51715
3	0,8667114	0,849542	0,8321217	0,6431568	0,4231281

4	-1,357891	-1,387057	-1,416623	-1,735871	-2,104664
5	-2,121075	-2,150995	-2,181311	-2,508002	-2,884032
6	-2,047057	-2,071451	-2,096155	-2,361619	-2,665653
7	-1,597157	-1,613765	-1,630569	-1,810193	-2,013985
8	-1,063036	-1,072225	-1,081504	-1,179545	-1,288424
9	-0,5979621	-0,6014196	-0,6048872	-0,6401268	-0,6763485
10	-0,2594888	-0,2592516	-0,2589777	-0,2540271	-0,2442583

Profondeur (m)	Effort axial N(KN)				
	N=4000 KN	N=5000 KN	N=6000 KN	N=7000 KN	N=8000 KN
0	26,77758	28,69107	30,95118	33,66332	36,98055
1	14,58313	15,51159	16,6063	17,91771	19,51906
2	5,66009	5,82275	6,01035	6,23022	6,493
3	0,16459	-0,14242	-0,51159	-0,96218	-1,52223
4	-2,53475	-3,04188	-3,64761	-4,38232	-5,29018
5	-3,32104	-3,8346	-4,44605	-5,18544	-6,09642
6	-3,01725	-3,42845	-3,91571	-4,50221	-5,22161
7	-2,24743	-2,51787	-2,8353	-3,2138	-3,67374
8	-1,41041	-1,54849	-1,70675	-1,89087	-2,10904
9	-0,71346	-0,75132	-0,78965	-0,82806	-0,86586
10	-0,22824	-0,20405	-0,16897	-0,11916	-0,04896

Profondeur (m)	Effort axial N(KN)	
	N=9000 KN	N=10000 KN
0	41,1341	46,49053
1	21,52098	24,09886
2	6,81471	7,22071
3	-2,23409	-3,16502
4	-6,43792	-7,93145
5	-7,24498	-8,73578
6	-6,12474	-7,29224
7	-4,2459	-4,979
8	-2,37357	-2,70389
9	-0,90195	-0,93447
10	0,05023	0,19221

2. L'effet du module sécant :

Profondeur(m)	Le module de réaction du sol E_s (KPa)		
	$E_s=1000$ KPa	$E_s=3000$ KPa	$E_s=5000$ KPa
0	65,53375	30,47497	21,46294
1	46,28814	18,62957	11,99344
2	30,0183	9,55542	5,18267
3	17,2005	3,37767	0,98035
4	7,76496	-0,31516	-1,16421
5	1,32237	-2,13972	-1,9221
6	-2,66771	-2,71578	-1,88451
7	-4,78059	-2,56301	-1,48608
8	-5,55336	-2,06499	-1,00109
9	-5,44501	-1,47324	-0,57405
10	-4,82069	-0,93094	-0,2602

Profondeur(m)	Le module de réaction du sol E_s (KPa)		
	$E_s=10000$ KPa	$E_s=20000$ KPa	$E_s=50000$ KPa
0	13,41493	8,44249	4,62785
1	6,42397	3,28858	1,20438
2	1,91839	0,42095	-0,23611
3	-0,39483	-0,68897	-0,49024
4	-1,2157	-0,82491	-0,32253
5	-1,22109	-0,58629	-0,12722
6	-0,89866	-0,30391	0,01885
7	-0,53074	-0,10414	0,01885
8	-0,24241	-0,00103	0,01909
9	-0,06257	0,03401	0,0101
10	0,02604	0,03408	0,00303

3. L'effet de la fiche D (m) :

Profondeur (m)	La fiche D(m)			
	D=8m	D=9m	D=10m	D=11m
0	21,36873	21,36873	21,36873	21,36873
1	11,94735	11,94735	11,94735	11,94735
2	5,173765	5,173765	5,173765	5,173765
3	0,994167	0,994167	0,994167	0,994167
4	-1,140575	-1,140575	-1,140575	-1,140575
5	-1,897782	-1,897782	-1,897782	-1,897782
6	-1,864601	-1,864601	-1,864601	-1,864601
7	-1,472427	-1,472427	-1,472427	-1,472427
8	-0,9934084	-0,9934084	-0,9934084	-0,9934084

9		-0,5710144	-0,5710144	-0,5710144
10			-0,2601822	-0,2601822
11				-0,06378465

Profondeur	La fiche D(m)			
	D=12m	D=13m	D=14m	D=15m
0	21,36873	21,36873	21,36873	21,36873
1	11,94735	11,94735	11,94735	11,94735
2	5,173765	5,173765	5,173765	5,173765
3	0,994167	0,994167	0,994167	0,994167
4	-1,140575	-1,140575	-1,140575	-1,140575
5	-1,897782	-1,897782	-1,897782	-1,897782
6	-1,864601	-1,864601	-1,864601	-1,864601
7	-1,472427	-1,472427	-1,472427	-1,472427
8	-0,9934084	-0,9934084	-0,9934084	-0,9934084
9	-0,5710144	-0,5710144	-0,5710144	-0,5710144
10	-0,2601822	-0,2601822	-0,2601822	-0,2601822
11	-0,06378465	-0,06378465	-0,06378465	-0,06378465
12	0,03997553	0,03997553	0,03997553	0,03997553
13		0,07990483	0,07990483	0,07990483
14			0,08223127	0,08223127
15				0,06668935

ANNEXE 02

1. L'effet de l'effort latéral :

a) Les déplacements latéraux y(mm) :

Profondeur (m)	L'effort latéral H(KN)					
	H=10 KN		H=20 KN		H=50 KN	
	libre	encastré	libre	encastré	libre	encastré
0	2,149943	0,7748352	4,324909	1,557364	11,00955	3,952183
1	1,202624	0,6865107	2,422736	1,378855	6,194791	3,491637
2	0,5202258	0,5074803	1,051077	1,019	2,711699	2,578399
3	0,0976748	0,322627	0,2005846	0,6477463	0,543039	1,638362
4	-0,1196711	0,1722874	-0,237744	0,3458769	-0,58157	0,8744997
5	-0,1980634	0,06788002	-0,396623	0,1362313	-0,995318	0,3441924
6	-0,1952537	0,004944862	-0,391932	0,00987510	-0,991021	0,02460914
7	-0,1527155	-0,02756149	-0,307055	-0,0553871	-0,780374	-0,1404399
8	-0,0953256	-0,04157405	-0,192056	-0,0835192	-0,491242	-0,2115376
9	-0,034669	-0,0468611	-0,070377	-0,0941439	-0,184164	-0,2383379
10	0,0259789	-0,04965326	0,0513341	-0,0997454	0,1233769	-0,2524742

Profondeur (m)	L'effort latéral H(KN)					
	H=100 KN		H=150 KN		H=250 KN	
	libre	Encastré	libre	encastré	libre	encastré
0	22,75913	8,107116	35,43766	12,54432	65,42889	22,28971
1	12,90816	7,13683	20,2747	10,99533	38,28681	19,37014
2	5,740011	5,263323	9,169687	8,095683	18,06623	14,21471
3	1,244095	3,34242	2,147748	5,136954	5,005648	9,004332
4	-1,11283	1,783237	-1,577029	2,738503	-2,13332	4,792336
5	-2,00285	0,7011027	-3,02236	1,074848	-5,089795	1,874134
6	-2,022666	0,04910105	-3,102877	0,07288385	-5,481877	0,1181088
7	-1,607775	-0,2876323	-2,492573	-0,4442815	-4,533966	-0,787362
8	-1,023884	-0,4326712	-1,607888	-0,6668618	-3,025557	-1,176383
9	-0,399131	-0,4873659	-0,653057	-0,75065	-1,356432	-1,322228
10	0,2277678	-0,5161366	0,3071625	-0,7946654	0,3327013	-1,398451

Annexe 02 : Etude paramétrique d'un pieu encastré en tête

profondeur (m)	L'effort latéral H(KN)	
	H=300 KN	
	libre	encastré
0	85,01257	27,71996
1	50,55914	23,97793
2	24,56485	17,564
3	7,51218	11,11497
4	-2,008189	5,909889
5	-6,122715	2,306104
6	-6,866577	0,1387392
7	-5,810559	-0,9779817
8	-3,975889	-1,457441
9	-1,903013	-1,63612
10	0,2055351	-1,729355

b) Sur l'effort tranchant :

Profondeur (m)	L'effort latéral H(KN)					
	H=10 KN		H=20 KN		H=50 KN	
	libre	encastré	libre	encastré	libre	encastré
0	10	10	20	20	50	50
1	1,800836	6,30499	3,667076	12,61888	9,680717	31,61547
2	-2,373244	3,316545	-4,712827	6,643004	-11,51685	16,68158
3	-3,817991	1,255581	-7,638496	2,516035	-19,11692	6,325826
4	-3,69157	0,0384276	-7,402322	0,0758942	-18,6556	0,1808992
5	-2,853781	-0,542617	-5,731761	-1,089996	-14,52061	-2,760916
6	-1,848274	-0,709483	-3,718935	-1,42471	-9,473411	-3,605496
7	-0,9692946	-0,64286	-1,955359	-1,290706	-5,020617	-3,264953
8	-0,3467262	-0,464628	-0,7036	-0,932764	-1,838873	-2,35901
9	-0,0216317	-0,241565	-0,0474661	-0,484747	-0,1513117	-1,226284
10	3,337262E-05	-9,1728E-05	5,061605E-05	-3,0282E-05	2,301955E-05	-0,0003327

Profondeur (m)	L'effort latéral H(KN)					
	H=100 KN		H=150 KN		H=250 KN	
	libre	Encastré	libre	encastré	libre	encastré
0	100	100	150	150	250	250
1	21,26215	63,46917	35,1734	95,66383	74,07026	161,115
2	-22,02833	33,62315	-31,27213	50,92452	-43,34963	86,6398
3	-38,29717	12,77694	-57,53512	19,39411	-96,02197	33,1431
4	-37,87787	0,3351613	-57,79602	0,4425111	-100,9964	0,51446
5	-29,75067	-5,645236	-45,86145	-8,705508	-82,38255	-15,369
6	-19,60193	-7,362264	-30,54484	-11,33069	-56,4109	-19,9196
7	-10,53478	-6,662607	-16,66551	-10,24514	-31,95996	-17,9768

Annexe 02 : Etude paramétrique d'un pieu encastré en tête

8	-3,976959	-4,812237	-6,492082	-7,396884	-13,40945	-12,9646
9	-0,426972	-2,50031	-0,8618219	-3,84275	-2,552505	-6,73019
10	-9,7003E-05	0,000260425	-0,00013681	-0,00030069	-6,1251E-05	0,0004312224

L'effort latéral H(KN)		
H=300 KN		
Profondeur (m)	libre	encastré
0	300	300
1	103,9471	194,5369
2	-42,96918	105,2098
3	-114,9651	40,33876
4	-125,8212	0,4509549
5	-104,8223	-19,05352
6	-73,22273	-24,63286
7	-42,58044	-22,20567
8	-18,74217	-16,00362
9	-4,236799	-8,306886
10	0,0001114	-0,001407019

c) Sur le moment de flexion :

L'effort latéral H(KN)						
Profondeur (m)	H=10 KN		H=20 KN		H= 50 KN	
	libre	Encastré	libre	encastré	libre	encastré
0	10	-12,97	20	-25,94	50	-64,85
1	15,5089	-4,855082	31,05565	-9,706052	77,93444	-24,2335
2	14,9398	-0,119202	29,96646	-0,224839	75,5976	-0,46066
3	11,6686	2,089802	23,43797	4,200303	59,38394	10,65594
4	7,82373	2,674146	15,73595	5,370579	40,03789	13,59162
5	4,51895	2,378635	9,103894	4,775727	23,27663	12,0838
6	2,16941	1,726185	4,380918	3,465833	11,28297	8,767437
7	0,77852	1,036596	1,579339	2,081053	4,124065	5,263791
8	0,14443	0,4771219	0,2978685	0,9578503	0,8146318	2,422587
9	-0,01445	0,1218718	-0,027009	0,2448304	-0,05242058	0,618965
10	4,24227E-05	-6,3314E-05	6,21967E-05	-2,7648E-05	-0,0003802	-2,97878E-05

Annexe 02 : Etude paramétrique d'un pieu encastré en tête

Profondeur (m)	L'effort latéral H (KN)					
	H=100 KN		H=150 KN		H=250 KN	
	libre	Encastré	libre	encastré	libre	encastré
0	100	-129,7	150	-194,55	250	-324,25
1	156,959	-48,3560	237,3123	-72,31816	404,2732	-119,7362
2	153,732	-0,56319	234,9828	-0,1595575	412,453	2,231827
3	121,718	21,8563	187,7093	33,81535	337,554	60,10619
4	82,6629	27,7715	128,5187	42,75737	236,1378	75,24827
5	48,4867	24,6632	76,11091	37,9389	143,2789	66,62479
6	23,8056	17,8895	37,87916	27,50488	73,73528	48,25211
7	8,90911	10,7378	14,52596	16,50385	29,93501	28,9302
8	1,89524	4,9406	3,313244	7,591596	7,86566	13,30202
9	-0,04726	1,26182	0,0317897	1,938189	0,5734714	3,394711
10	-9,646 E-05	-0,00041	-0,000167	-0,0008105	-0,000315	-0,0011911

Profondeur (m)	L'effort latéral H(KN)	
	H=300 KN	
	libre	Encastré
0	300	-389,1
1	493,5802	-143,1099
2	515,4188	4,459962
3	429,7896	74,78301
4	305,5138	93,11152
5	188,5799	82,33812
6	99,27412	59,59673
7	41,79797	35,71775
8	11,87975	16,41875
9	1,241782	4,190391
10	-0,00010738	-0,00087318

2. L'effet de la rigidité flexionnelle $E_p I_p$ (MN.m²):

a) Les déplacements latéraux :

Profondeur (m)	La rigidité flexionnelle $E_p I_p$ (MN.m ²)					
	$E_p I_p=150$		$E_p I_p=500$		$E_p I_p=1000$	
	libre	encastré	libre	encastré	libre	encastré
0	1.588741	0,7451485	1,18051	0,690669	1,061581	0,6711919
1	1.042633	0,6334296	0,888367	0,58785	0,8388728	0,5741296
2	0.603856	0,4883445	0,630125	0,475234	0,6333688	0,472268
3	0.282355	0,3442135	0,411784	0,364315	0,4485292	0,3712014
4	0.067384	0,2191311	0,232983	0,260591	0,2846448	0,2741708
5	-0.061786	0,1196407	0,089209	0,167592	0,1397563	0,1825634
6	-0.128606	0,0448471	-0,026436	0,083970	0,01046428	0,09639217
7	-0.154813	-0,010263	-0,121789	0,008658	-0,1073391	0,01475626
8	-0.158092	-0,052306	-0,204463	-0,061067	-0,2178249	-0,0637328
9	-0.1510935	-0,087637	-0,280869	-0,127739	-0,3246339	-0,1405388
10	-0.144127	-0,120896	-0,355396	-0,193449	-0,43032	-0,2168088

b) L'effort tranchant :

Profondeur (m)	La rigidité flexionnelle $E_p I_p$ (MN.m ²)					
	$E_p I_p=150$		$E_p I_p=500$		$E_p I_p=1000$	
	libre	encastré	libre	encastré	libre	encastré
0	10	10	10	10	10	10
1	3,516718	6,548155	4,877719	6,818098	5,287817	6,898035
2	-0,530307	3,749793	1,117102	4,168892	1,634657	4,291664
3	-2,693045	1,679562	-1,461985	2,074868	-1,051192	2,190652
4	-3,526433	0,2837632	-3,055053	0,5227351	-2,871347	0,5829909
5	-3,509568	-0,5514624	-3,846659	-0,5595245	-3,923859	-0,5547792
6	-3,012926	-0,9530851	-3,993314	-1,183254	-4,293701	-1,249466
7	-2,292423	-1,032703	-3,616416	-1,416044	-4,047838	-1,525697
8	-1,504678	-0,8723032	-2,79818	-1,274063	-3,234187	-1,402321
9	-0,730349	-0,5210353	-1,586191	-0,8017899	-1,880789	-0,8918113
10	1,103734 E-05	3,503674E -07	5,049077E -07	-3,62382E- 06	-1,35395E- 06	-1,1818E- 07

c) Sur le moment de flexion :

Profondeur (m)	La rigidité flexionnelle (MN.m ²)					
	EpIp=150		EpIp=500		EpIp=1000	
	libre	encastré	libre	encastré	libre	encastré
0	10	-12,97	10	-12,97	10	-12,97
1	16,5325	-4,742606	17,31797	-4,600814	17,55171	-4,5613
2	17,8437	0,34594	20,2082	0,843973	20,92773	0,991244
3	16,0985	3,000616	19,94497	3,91473	21,14274	4,190392
4	12,8993	3,930244	17,61215	5,180401	19,11339	5,53689
5	9,32774	3,754911	14,1014	5,07232	15,65547	5,512847
6	6,03886	2,971565	10,13387	4,165755	11,49287	4,574906
7	3,37539	1,955641	6,288911	2,81797	7,273061	3,15327
8	1,4756	0,985704	3,048302	1,49384	3,586095	1,656619
9	0,3610	0,274319	0,824019	0,42825	0,984332	0,477595
10	-3,7455 E-05	-4,51073 E-05	1,33305E -05	-1,7558 E-05	6,07144E -06	-4,1442 E-05

3. L'effet de la fiche D(m) :

a) Sur les déplacements latéraux y (mm) :

Profondeur(m)	La fiche D(m)			
	D= 8 m		D= 9 m	
	libre	encastré	libre	encastré
0	2,155349	0,7822061	2,150109	0,7760334
1	1,208325	0,6954197	1,202789	0,688718
2	0,5259463	0,5175278	0,520381	0,5106135
3	0,1023984	0,3322638	0,09778491	0,3263383
4	-0,1181644	0,1779959	-0,1196656	0,1756935
5	-0,2035991	0,06335677	-0,1982704	0,06924903
6	-0,2133326	-0,01929341	-0,1958205	0,001433287
7	-0,1577608	-0,08366004	-0,153819	-0,04000032
8	2,155349	-0,1420006	-0,09711079	-0,06781463
9			-0,03716165	-0,09144296

Profondeur(m)	Le fiche D(m)			
	D=10 m		D=11 m	
	libre	encastré	libre	encastré
0	2,149943	0,7748352	2,14976	0,7749372
1	1,202624	0,6865107	1,203093	0,6860609
2	0,5202258	0,5074803	0,5213473	0,5064867
3	0,09767479	0,322627	0,0993849	0,3211409
4	-0,1196711	0,1722874	-0,1175606	0,1704953
5	-0,1980634	0,06788002	-0,1960367	0,06622292
6	-0,1952537	0,004944862	-0,1942599	0,004295805
7	-0,1527155	-0,02756149	-0,1543586	-0,02579505

Annexe 02 : Etude paramétrique d'un pieu encastré en tête

8	-0,09532563	-0,04157405	-0,1018883	-0,03540898
9	-0,03466999	-0,0468611	-0,04898688	-0,03390849
10	0,02597885	-0,04965326	0,001214585	-0,02770998
11			0,049919	-0,02030587

b) Sur l'effort tranchant :

Profondeur (m)	La fiche D (m)			
	D=8m		D=9m	
	libre	encastré	libre	encastré
0	10	10	10	10
1	1,77369	6,264764	1,800006	6,296582
2	-2,428872	3,22896	-2,374882	3,294867
3	-3,900237	1,118168	-3,820243	1,216656
4	-3,790641	-0,1391304	-3,69418	-0,01867695
5	-2,944767	-0,7265881	-2,856008	-0,6126206
6	-1,883069	-0,8261187	-1,848638	-0,7755713
7	-0,8690716	-0,5642079	-0,9655616	-0,670984
8	5,28388E-06	-2,356386E-05	-0,3358278	-0,3982573
9			1,059021E-05	5,321309E-05

Profondeur(m)	Le fiche D (m)			
	D=10m		D=11m	
	libre	encastré	libre	Encastré
0	10	10	10	10
1	1,800836	6,30499	1,80015	6,305835
2	-2,373244	3,316545	-2,377902	3,320961
3	-3,817991	1,255581	-3,829664	1,266194
4	-3,69157	0,03842755	-3,712875	0,05736413
5	-2,853781	-0,5426167	-2,885751	-0,514803
6	-1,848274	-0,7094832	-1,888288	-0,6754583
7	-0,9692946	-0,6428598	-1,008482	-0,6109096
8	-0,3467262	-0,4646278	-0,366541	-0,451547
9	-0,0216317	-0,241565	0,009567014	-0,2752389
10	3,337262E-05	-9,172748E-05	0,1278962	-0,1201438
11			-5,70941E-05	-6,792421e-05

c) Sur le moment de flexion :

Profondeur (m)	Le fiche D (m)			
	D=8 m		D=9m	
	libre	Encastré	libre	encastré
0	10	-12,97	10	-12,97
1	15,49554	-4,87455	15,50855	-4,858867
2	14,88495	-0,2021575	14,93808	-0,1376058
3	11,54448	1,894297	11,66503	2,041286
4	7,607615	2,319717	7,817666	2,577659
5	4,204823	1,838846	4,510369	2,217723
6	1,787205	1,028189	2,159375	1,495475
7	0,4210474	0,3062907	0,7699418	0,7550548
8	-1,94781E-05	5,708674E-06	0,1429282	0,2089059

Annexe 02 : Etude paramétrique d'un pieu encastré en tête

9			-3,90108E-06	-1,033255E-05
---	--	--	--------------	---------------

Profondeur(m)	Le fiche D(m)			
	D=10m		D=11m	
	libre	Encastré	libre	encastré
0	10	-12,97	10	-12,97
1	15,50898	-4,855082	15,5089	-4,854889
2	14,93975	-0,1192017	14,93724	-0,1166088
3	11,66855	2,089802	11,65823	2,099699
4	7,823734	2,674146	7,797184	2,698774
5	4,51895	2,378635	4,465697	2,426641
6	2,169408	1,726185	2,07969	1,805659
7	0,7785194	1,036596	0,6480759	1,15006
8	0,1444333	0,4771219	-0,01748683	0,6148956
9	-0,01445354	0,1218718	-0,1739143	0,2521512
10	4,242272E-05	-6,33145E-05	-0,08433546	0,05713887
11			-0.000171532	-4.577974e-05