

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/329984187>

# Comportement des pieux sous forces horizontales– Behavior of laterally loaded piles

Chapter · December 2018

CITATIONS

0

READS

97

1 author:



Ali BOUAFIA

Saad Dahlab University

171 PUBLICATIONS 201 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Experimental study of the liquefaction susceptibility of Chlef and Algiers sands areas [View project](#)

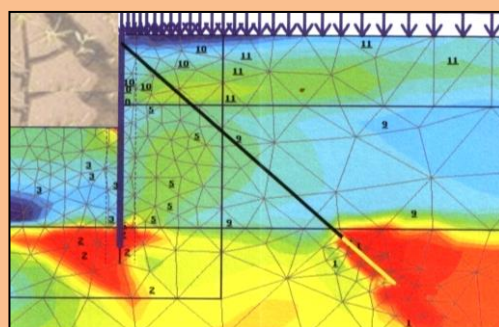


Analysis of full-scale loading of piles under lateral loads [View project](#)

**Ali BOUAFIA**  
Département de Génie Civil  
Faculté de Technologie  
Université Saâd Dahleb de Blida

## **CALCUL DES OUVRAGES GÉOTECHNIQUES**

### **PROBLEMES RÉSOLUS**



## Remerciements

Ce livre a fait l'objet de lectures critiques et vérifications auprès des collègues cités ci-après et dont l'auteur leur exprime sa profonde reconnaissance et ses sincères remerciements :

- Mme **TOUMI Ilhem**, Maître-Assistante au département de Génie Civil, Université de Blida1, Algérie,
- Dr. **AMMAR-BOUDJELLAL Amina**, Maître de conférences et Chercheure à l'Université de la Rochelle, France,
- Dr. **SAIL Yacine**, Maître de Conférences au département de Génie Civil, Université de Blida1, Algérie,
- Dr. **ABED Younes**, Maître de Conférences au département de Génie Civil, Université de Blida1, Algérie,
- Dr. **AMMAR-BOUZID Djilali**, Professeur au département de Génie Civil, Université de Blida1, Algérie.

## Note importante

Sous cette forme électronique, ce document est disponible gratuitement pour l'usage personnel et non commercial, et est à accès libre auprès du public intéressé tels que les étudiants, les enseignants, les ingénieurs, et les techniciens.

Toute reproduction intégrale ou partielle de ce document sur quelque support que ce soit, à usage commercial sans autorisation explicite de l'auteur, est strictement interdite et constitue une violation de la propriété intellectuelle protégée par l'ONDA (Office National des Droits d'Auteurs) et une contrefaçon sanctionnées par le code pénal.

Toute diffusion intégrale ou partielle de ce document, sur quelque support que ce soit, à usage commercial sans autorisation explicite de l'auteur, est strictement interdite et fera l'objet d'une poursuite par le code pénal, sous couvert de l'ONDA (Office National des Droits d'Auteurs).

Nous faisons appel aux lecteurs afin de les sensibiliser sur la menace que représente la contrefaçon pour l'avenir de l'écrit et de la production intellectuelle, particulièrement dans le domaine de l'édition scientifique et technique. Pour cela, nous les prions de nous signaler toute fraude en nous contactant par message électronique à l'adresse E-mail suivante : [resgeotech@gmail.com](mailto:resgeotech@gmail.com)

## Logiciels de calcul

La résolution de certains problèmes a nécessité l'utilisation des logiciels tels que : SETPIL, SPULL, DEEPSOIL, OPTUM, STB et SPW. Il s'agit des logiciels du type Freeware ou en version d'essai qui sont disponibles sur simple demande par message électronique adressé à l'auteur, à l'adresse : [resgeotech@gmail.com](mailto:resgeotech@gmail.com)

## Table de matières

Remerciements	2
Note importante	3
Logiciels de calcul	3
Avant-propos	7
<b><u>Partie 1. Bases de mécanique des sols</u></b>	
<b>Chapitre 1. Propriétés physiques du sol</b>	
1.1. Rappels du cours	9
1.2. Applications	13
1.3. Solutions	19
<b>Chapitre 2. Reconnaissance et classification des sols</b>	
2.1. Rappels du cours	25
2.2. Applications	35
2.3. Solutions	41
<b>Chapitre 3. Ecoulement de l'eau dans le sol</b>	
3.1. Rappels du cours	47
3.2. Applications	61
3.3. Solutions	67
<b>Chapitre 4. Calcul des contraintes dans le sol</b>	
4.1. Rappels du cours	75
4.2. Applications	86
4.3. Solutions	92
<b>Chapitre 5. Consolidation des sols fins</b>	
5.1. Rappels du cours	109
5.2. Applications	119
5.3. Solutions	125
<b>Chapitre 6. Résistance au cisaillement du sol</b>	
6.1. Rappels du cours	139
6.2. Applications	149
6.3. Solutions	156
<b><u>Partie 2. Calcul statique des ouvrages géotechniques</u></b>	
<b>Chapitre 7. Capacité portante des fondations à partir des essais de laboratoire</b>	
7.1. Rappels du cours	169
7.2. Applications	180
7.3. Solutions	184
<b>Chapitre 8. Capacité portante des fondations à partir des essais sur place</b>	
8.1. Rappels du cours	191
8.2. Applications	195
8.3. Solutions	203
<b>Chapitre 9. Tassement des fondations à partir des essais de laboratoire</b>	
9.1. Rappels du cours	215
9.2. Applications	220

9.3. Solutions	223
<b>Chapitre 10. Tassement des fondations à partir des essais sur place</b>	
10.1. Rappels du cours	229
10.2. Applications	236
10.3. Solutions	239
<b>Chapitre 11. Capacité portante des fondations sur pieux</b>	
11.1. Rappels du cours	251
11.2. Applications	280
11.3. Solutions	288
<b>Chapitre 12. Tassement des pieux isolés</b>	
12.1. Rappels du cours	303
12.2. Applications	311
12.3. Solutions	315
<b>Chapitre 13. Comportement d'un pieu isolé sous forces latérales</b>	
13.1. Rappels du cours	329
13.2. Applications	341
13.3. Solutions	344
<b>Chapitre 14. Stabilité des murs de soutènement</b>	
14.1. Rappels du cours	359
14.2. Applications	379
14.3. Solutions	387
<b>Chapitre 15. Dimensionnement des écrans de soutènement</b>	
15.1. Rappels du cours	411
15.2. Applications	427
15.3. Solutions	432
<b>Chapitre 16. Stabilité des terrains en pente</b>	
16.1. Rappels du cours	449
16.2. Applications	459
16.3. Solutions	464
<b>Chapitre 17. Modélisation du comportement statique du sol</b>	
17.1. Rappels du cours	479
17.2. Applications	491
17.3. Solutions	503
 <b><u>Partie 3. Calcul dynamique des ouvrages géotechniques</u></b>	
<b>Chapitre 18. Propagation des Ondes et essais dynamiques dans le sol</b>	
18.1. Rappels du cours	521
18.2. Applications	547
18.3. Solutions	554
<b>Chapitre 19. Réponse sismique et liquéfaction du sol</b>	
19.1. Rappels du cours	565
19.2. Applications	579
19.3. Solutions	587

Chapitre 20. <b>Comportement sismique des fondations, soutènements et talus</b>	
20.1. Rappels du cours	621
20.2. Applications	639
20.3. Solutions	648
Chapitre 21. <b>Vibration et battage des fondations</b>	
21.1. Rappels du cours	675
21.2. Applications	693
21.3. Solutions	698
<b>Ouvrages du même auteur</b>	709
<b>Références bibliographiques recommandées</b>	710
<b>Annexes</b>	
Annexe 1 : Liste des symboles et notations	712
Annexe 2 : Liste des abbréviations	728
Photos de couverture	729

## AVANT-PROPOS

Nombreux sont les livres traitant de l'aspect théorique du calcul des ouvrages géotechniques, mais peu sont ceux présentant des applications pratiques de cet aspect sous forme de problèmes résolus. Or, la nécessité pédagogique de telles applications pour l'étudiant au cours de sa formation académique n'est pas à démontrer. En outre, si ces applications sont issues des projets géotechniques, elles pourraient aussi intéresser les ingénieurs impliqués dans le dimensionnement des ouvrages géotechniques.

Dans cet état des choses, ce livre a pour mission de présenter l'application des méthodes de calcul en se référant dans bon nombre de cas à des exemples issus des projets géotechniques. Il va sans dire que la résolution de tels problèmes est très avantageuse car elle permet d'analyser des "cas d'étude" et d'apprécier la démarche entreprise pour appliquer telle ou telle méthode de calcul. Cependant, en fin de chaque chapitre, quelques problèmes ont été conçus en vue du développement de certains aspects théoriques, afin d'interpréter certains phénomènes ou d'expliquer la signification physique de certains paramètres de calcul.

Ce livre a été conçu sous sa forme électronique pour être largement diffusé au sein d'un public intéressé par le calcul des ouvrages géotechniques. Il est structuré en trois grandes parties, à savoir : Bases de mécanique des sols, Calcul statique des ouvrages géotechniques, et Calcul dynamique des ouvrages géotechniques. Bien que chaque chapitre commence par un bref rappel des notions requises pour la résolution des problèmes proposés, il est à préciser que ce rappel ne dispense pas du bagage théorique nécessaire, fourni par une formation didactique en géotechnique. Il est à noter que ce rappel est essentiellement extrait des livres de l'auteur, regroupés dans une liste à la fin du livre, et indiqués en tant que référence par leur numéro d'ordre entre crochets. Il est aussi important de noter dans ce contexte que le livre ne rappelle pas les définitions et la terminologie courante en géotechnique. Ainsi, sur le plan formel, les symboles des grandeurs ainsi que les notations ont été définis en quasi-totalité conformément aux recommandations de la SIMSG (Société Internationale de Mécanique des Sols et de Géotechnique) et regroupées dans une liste en annexe du livre. Ainsi, les grandeurs utilisées dans les formules sont directement définies dans cette liste et ne sont que citées dans le texte du rappel du cours. On trouve aussi en annexe une liste des abréviations utilisées dans le livre.

Le contenu de ce livre, bien qu'il traite d'une vingtaine de chapitres relatifs au calcul géotechnique, basés sur les méthodes les plus courantes de calcul des ouvrages géotechniques, ne prétend pas être exhaustif. Chaque chapitre commence par un bref rappel des méthodes de calcul, énonce les problèmes à résoudre, ensuite regroupe les solutions en fin de chapitre.

Malgré l'effort fourni, tant de fond que de forme pour mettre au point ce livre, la première édition ne prétend pas être parfaite et bon nombre d'erreurs aurait probablement échappé à la vigilance des relecteurs. Les lectures critiques seront les bienvenues pour des futures améliorations de ce livre, en les transmettant par message à l'adresse électronique ci-dessous.

Boumerdès, le 5 octobre 2018

Ali BOUAFIA  
Université Saâd Dahleb de Blida  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Civil  
E-mail : [resgeotech@gmail.com](mailto:resgeotech@gmail.com)





## 13.1. RAPPELS DU COURS [2], [3], [4], [7]

### 13.1.1. Classification des méthodes d'analyse

Le déplacement latéral d'un pieu peut se déterminer expérimentalement à partir d'un essai de chargement latéral du pieu, ou par calcul. On classe les méthodes de calcul en quatre grandes catégories, en l'occurrence:

- Méthodes de la théorie de l'élasticité,
- Méthodes du module de réaction (ou méthode des courbes de réaction P-Y),
- Méthodes numériques,
- Méthodes empiriques.

### 13.1.2. Analyse à partir d'un essai de chargement de pieu

L'essai de chargement latéral en vraie grandeur consiste à appliquer des incréments de charge latérale en tête du pieu, et à mesurer les déplacements et/ou les rotations correspondantes. Le paragraphe (11.1.5.2.1) du chapitre 11 décrit l'essai de chargement horizontal selon la norme française NF P94-151, et la figure 11.11 illustre d'une manière schématique la courbe de chargement expérimentale du pieu. L'expérience montre que cette courbe a une allure hyperbolique décrite par l'équation suivante :

$$H = \frac{y_0}{\frac{Y_0}{H_u} + \frac{1}{K_H}} \quad (13.1)$$

Ainsi, l'ajustement hyperbolique de la courbe de chargement permet de déterminer la raideur latérale du pieu, soit  $K_H$ , et en déduire le déplacement en tête du pieu sous une faible charge horizontale (négligeable devant l'effort horizontal limite  $H_u$ ):

$$Y_H = \frac{H}{K_H} \quad (13.2)$$

Une telle approche, aussi séduisante soit-elle, est par contre onéreuse et réservée aux grands projets, pour lesquels le comportement sous des efforts horizontaux est un facteur déterminant dans la conception des fondations sur pieux. Dans les projets courants, on évalue couramment par calcul la réponse du pieu à des efforts horizontaux.

### 13.1.3. Analyse à partir des méthodes de calcul

#### 13.1.3.1. Méthodes de la théorie d'élasticité

Les méthodes les plus connues sont celles de Banerjee et Davies (1978), Randolph (1981), Budhu et Davies (1987) et Poulos et Hull (1992).

Selon Poulos et Hull, sous un effort  $H$  et un moment de flexion  $M_0$  appliqués sur le pieu en surface du sol, le déplacement  $Y_0$  et la rotation  $Y'_0$  du pieu à la surface du sol sont donnés sous la forme suivante :

$$Y_0 = H \frac{I_{YH}}{E_s(D_e)D_e} + M_0 \frac{I_{YM}}{E_s(D_e)D_e^2} \quad (13.3)$$

$$Y'_0 = H \frac{I_{Y'H}}{E_s(D_e)D_e^2} + M_0 \frac{I_{Y'M}}{E_s(D_e)D_e^3} \quad (13.4)$$

Un pieu est dit *flexible* si sa fiche  $D$  est plus grande que  $D_c$ , *rigide* si  $D$  est inférieure à  $D_c/3$ , et *intermédiaire* ou *semi-rigide* si  $D$  est située entre les deux.

La *fiche effective* ou *fiche utile* du pieu, soit  $D_e$ , est égale à  $D_c$  en cas d'un pieu flexible et égale à  $D$  en cas d'un pieu rigide.

Au-delà d'une *fiche critique*  $D_c$ , fonction de la rigidité relative pieu/sol, le déplacement en tête du pieu ne dépend plus de la fiche. La fiche critique est définie dans tous les cas comme suit :

$$D_c = \begin{cases} 4.44 \left( \frac{E_p I_p}{E_s} \right)^{1/4} & \text{dans un sol homogène} \\ 3.30 \left( \frac{E_p I_p}{m} \right)^{1/5} & \text{dans un sol de Gibson} \end{cases} \quad (13.5)$$

$m$  est la pente du profil linéaire du module  $E_s(z)$  dans le sol de Gibson.

Les facteurs d'influence des déplacements ( $I_{YH}$  et  $I_{YM}$ ) et de rotation ( $I_{Y'H}$  et  $I_{Y'M}$ ) sont formulés et récapitulés au tableau 13.1 en fonction de la distribution de la rigidité du sol avec la profondeur, des conditions aux limites en tête du pieu, et de la rigidité relative pieu/sol.

Il a été démontré que le coefficient de Poisson  $\nu$  a une faible influence sur ces facteurs, ce qui permet d'utiliser ce tableau même pour des valeurs de  $\nu$  différentes de 0.5.

Tableau 13.1. Formules des facteurs d'influence selon la méthode de Poulos (sol homogène  $\nu=0.50$ )

	Sol homogène $E_s(z)=$ constante			
	Pieu flexible		Pieu rigide	
	Tête libre	Tête encastree	Tête libre	Tête encastree
$I_{YH}$	$1.646 + 3.395 \text{Log}_{10} \left( \frac{D_e}{B} \right)$	$1.326 + 1.641 \text{Log}_{10} \left( \frac{D_e}{B} \right)$	$0.976 + 2.196 \text{Log}_{10} \left( \frac{D}{B} \right)$	$0.539 + 0.545 \text{Log}_{10} \left( \frac{D}{B} \right)$
$I_{YM}$ $=I_{Y'H}$	$5.520 + 9.082 \text{Log}_{10} \left( \frac{D_e}{B} \right)$	0	$0.701 + 3.225 \text{Log}_{10} \left( \frac{D}{B} \right)$	0
$I_{Y'M}$	$64.98 + 37.95 \text{Log}_{10} \left( \frac{D_e}{B} \right)$	0	$1.086 + 6.292 \text{Log}_{10} \left( \frac{D}{B} \right)$	0

Tableau 13.1 (suite). Formules des facteurs d'influence selon la méthode de Poulos (sol de Gibson  $\nu=0.50$ )

	Sol de Gibson $E_s(z)= mz$			
	Pieu flexible		Pieu rigide	
	Tête libre	Tête encastrée	Tête libre	Tête encastrée
$I_{YH}$	$13.10+11.09\text{Log}_{10}\left(\frac{D_e}{B}\right)$	$5.659+4.139\text{Log}_{10}\left(\frac{D_e}{B}\right)$	$3.181+9.701\text{Log}_{10}\left(\frac{D}{B}\right)$	$0.773+1.081\text{Log}_{10}\left(\frac{D}{B}\right)$
$I_{YM} = I_{YH}$	$34.63+18.03\text{Log}_{10}\left(\frac{D_e}{B}\right)$	0	$2.409+12.71\text{Log}_{10}\left(\frac{D}{B}\right)$	0
$I_{YM}$	$156.1+37.14\text{Log}_{10}\left(\frac{D_e}{B}\right)$	0	$1.844+18.65\text{Log}_{10}\left(\frac{D}{B}\right)$	0

En cas d'un sol multicouche ou non homogène, Poulos (1980) recommande de calculer un module de déformation équivalent  $E_{eq}$  égal à la moyenne pondérée des valeurs de  $E_s$  le long du pieu :

$$E_{eq} = \frac{1}{D} \int_0^D E_s(z) dz \quad (13.6)$$

Le calcul d'intégrale peut être approché par la méthode de sommation des trapèzes.

Le module de déformation  $E_s$  du sol peut être estimé par corrélation avec les paramètres géotechniques couramment mesurés. On cite à ce titre les corrélations avec le module pressiométrique  $E_m$  (Frank et Christoulas, 1991):

$$E_s = 4E_m < 60 \text{ MPa pour les pieux travaillant en pointe,}$$

$$E_s = 5E_m < 50 \text{ MPa pour les pieux flottants.}$$

Il existe aussi des corrélations de  $E_s$  avec la résistance pénétrométrique  $q_c$ , et on peut adopter un rapport  $E_s/q_c$  égal à 2 pour les sables et 7 pour les argiles. De tels rapports sont à utiliser avec prudence et les limiter à une étude préliminaire des déformations des pieux.

On prend  $\nu=0.33$  pour un comportement drainé ou à long terme du sol, et  $\nu=0.5$  pour un comportement non drainé ou à court terme.

### 13.1.3.2. Méthodes du module de réaction (Courbes de réaction P-Y)

#### a) Principe du transfert de charges

Le sol est assimilé, comme le montre la figure 13.1, en une infinité de ressorts élastiques de raideur  $E_{ti}$  sur lesquels s'appuie le pieu au cours de son déplacement. Sous une faible charge latérale, une section du pieu à la profondeur  $z$  se déplace de  $Y$  et le sol réagit par une réaction  $P$  (force par unité de longueur) telle que :

$$P(z) = E_{ti}(z).Y(z) \quad (13.7)$$

$E_{ti}$  est le module de réaction latérale, défini d'ailleurs dans la figure 13.2 comme étant la pente de la courbe P-Y aux petits déplacements.

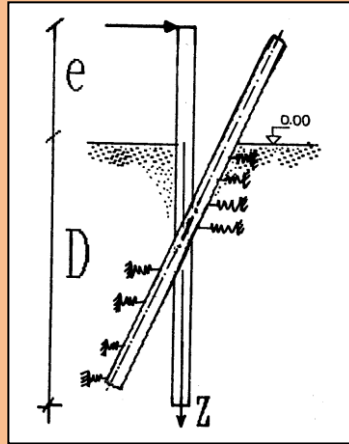


Figure 13.1. Schéma de transfert des charges du pieu au sol par des ressorts de Winkler

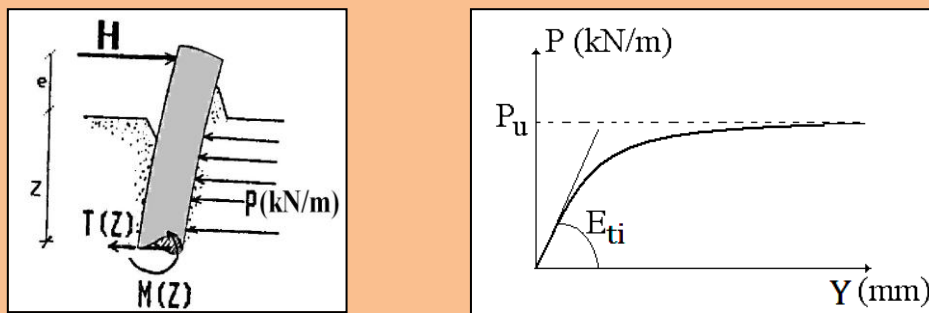


Figure 13.2. Flexion d'un pieu sous des efforts horizontaux

## b) Equation différentielle de déflexion d'un pieu long et flexible

L'équilibre d'une tranche d'épaisseur infinitésimale d'un pieu flexible se traduit par l'équation différentielle suivante, caractérisant la déformée d'une poutre fléchie :

$$E_p I_p \frac{d^4 y(z)}{dz^4} + E_{ti}(z) Y(z) = 0 \quad (13.8)$$

### b1) Solution en cas d'un sol homogène

La solution complète en fonction de la profondeur, en termes de déplacements et efforts dans le pieu, est regroupée en fonction des conditions aux limites en tête du pieu, comme suit:

- Pieu libre en tête chargé par un effort  $H$  :

$$Y(z) = \frac{2H}{E_{ti} L_0} A^*(z) \quad (13.9)$$

$$M(z) = H L_0 C^*(z) \quad (13.10)$$

$$T(z) = H D^*(z) \quad (13.11)$$

- Pieu libre en tête chargé par un moment  $M_0$  :

$$Y(z) = \frac{2M_0}{E_{ti} L_0^2} D^*(z) \quad (13.12)$$

$$M(z) = M_0 B^*(z) \quad (13.13)$$

$$T(z) = -\frac{2M_0}{L_0} C^*(z) \quad (13.14)$$

- *Pieu encasté en tête (rotation nulle) et chargé par un effort H :*

$$Y(z) = \frac{H}{E_{ti} L_0} B^*(z) \quad (13.15)$$

$$M(z) = -\frac{HL_0}{2} D^*(z) \quad (13.16)$$

$$T(z) = HA^*(z) \quad (13.17)$$

La longueur élastique ou longueur de transfert  $L_0$  est telle que :

$$L_0 = \sqrt[4]{\frac{4E_p I_p}{E_{ti}}} \quad (13.18)$$

$$A^* = \exp\left(-\frac{z}{L_0}\right) \cos\left(\frac{z}{L_0}\right) \quad (13.19)$$

$$B^* = \exp\left(-\frac{z}{L_0}\right) \left[ \cos\left(\frac{z}{L_0}\right) + \sin\left(\frac{z}{L_0}\right) \right] \quad (13.20)$$

$$C^* = \exp\left(-\frac{z}{L_0}\right) \sin\left(\frac{z}{L_0}\right) \quad (13.21)$$

$$D^* = \exp\left(-\frac{z}{L_0}\right) \left[ \cos\left(\frac{z}{L_0}\right) - \sin\left(\frac{z}{L_0}\right) \right] \quad (13.22)$$

Un pieu long et flexible correspond au comportement schématisé de la figure 13.3 et a une fiche D pratiquement supérieure à  $\pi L_0$ .

En surface, le déplacement latéral et la rotation d'un pieu libre sont :

$$Y_0 = 2 \frac{H}{E_{ti} L_0} + 2 \frac{M_0}{E_{ti} L_0^2} \quad (13.23)$$

$$Y_0' = 2 \frac{H}{E_{ti} L_0^2} + 4 \frac{M_0}{E_{ti} L_0^3} \quad (13.24)$$

En cas d'un pieu flexible encasté en tête et chargé par un effort :

$$Y_0 = \frac{H}{E_{ti} L_0} \quad (13.25)$$

$$Y_0' = 0 \quad (13.26)$$

## b2) Solution en cas d'un sol ayant un profil de module de réaction $E_{ti}$ variant en puissance

Reese et Matlock (1960) ont lancé une étude paramétrique poussée menant à une formulation analytique des déplacements et du moment fléchissant d'un pieu long et flexible en cas d'un sol ayant un profil du module de réaction variant en puissance :

$$E_{ti}(z) = aZ^n \quad (13.27)$$

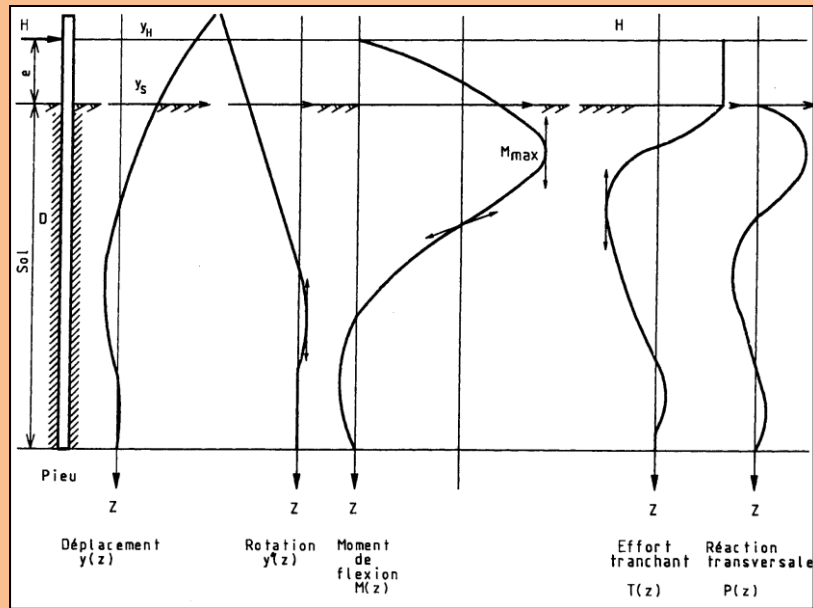


Figure 13.3. Comportement schématique d'un pieu long et flexible (Norme NF P94-151, 1993)

On retrouve le cas d'un sol homogène en posant  $n=0$ , et celui d'un sol de Gibson en posant  $n=1$ .

$$Y(z) = A_y(z) \frac{HL_0^3}{E_p I_p} + B_y(z) \frac{M_0 L_0^2}{E_p I_p} \quad (13.28)$$

$$M(z) = A_m(z) HL_0 + B_m(z) M_0 \quad (13.29)$$

Les fonctions  $A_y$ ,  $B_y$ ,  $A_m$  et  $B_m$  sont regroupées à la figure 13.4 et  $L_0$  est la longueur élastique du pieu, donnée par :

$$L_0 = \sqrt[n+4]{\frac{E_p I_p}{a}} \quad (13.30)$$

En cas d'un sol de Gibson ( $n=1$ ), un pieu est considéré comme souple si  $D$  est supérieure à  $4L_0$  et rigide si  $D < 0.5L_0$ . Le déplacement latéral et la rotation du pieu en surface du sol sont :

$$Y_0 = 2.4 \frac{H}{a^{3/5} (E_p I_p)^{2/5}} + 1.6 \frac{M_0}{a^{2/5} (E_p I_p)^{3/5}} \quad (13.31)$$

$$Y_0' = 1.6 \frac{H}{a^{2/5} (E_p I_p)^{3/5}} + 1.74 \frac{M_0}{a^{1/5} (E_p I_p)^{4/5}} \quad (13.32)$$

### c) Equation de comportement d'un pieu court et rigide

Un pieu court et infiniment rigide effectue un déplacement d'ensemble, décrit par un profil linéaire des déplacements :

$$Y(z) = Y_0 + Y_0' z \quad (13.33)$$

Les profils de rotation, du moment fléchissant, et de l'effort tranchant se déduisent par dérivations successives du profil de déplacements. Il suffit donc d'après l'équation (13.33) de déterminer  $Y_0$  et  $Y_0'$ .

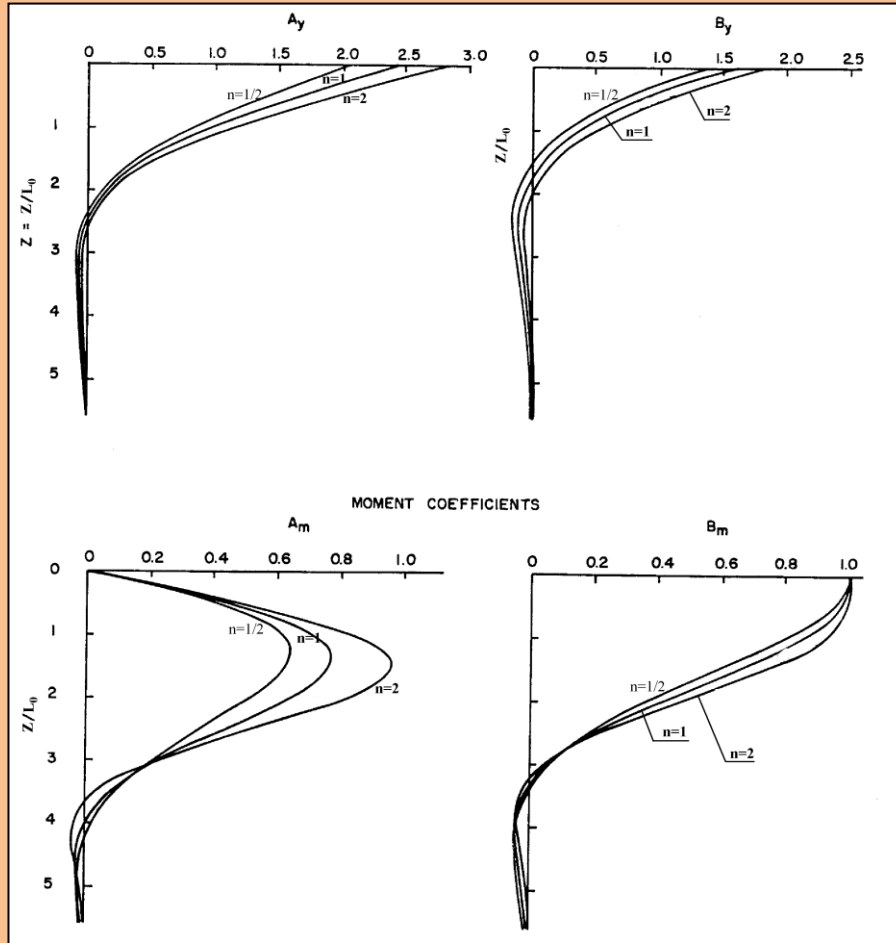


Figure 13.4. Courbes des coefficients A et B de la méthode de Reese et Matlock (1960)

### c1) Solution en cas d'un sol homogène

$$Y_0 = \frac{4H}{E_{ii}D} + \frac{6M_0}{E_{ii}D^2} \quad (13.34)$$

$$Y_0' = -\frac{6H}{E_{ii}D^2} - \frac{12M_0}{E_{ii}D^3} \quad (13.35)$$

Un pieu est considéré comme infiniment rigide si  $D < L_0/2$ .

### c2) Solution en cas d'un sol ayant un profil de module de réaction $E_{ii}$ variant en puissance

$$Y_0 = \frac{(H - T_p)(n+1)(n+2)^2}{aD^{n+1}} - \frac{(n+1)(n+2)(n+3)(M_p - M_0 - DT_p)}{aD^{n+2}} \quad (13.36)$$

$$Y_0' = -\frac{(H - T_p)(n+1)(n+2)(n+3)}{aD^{n+2}} + \frac{(n+2)^2(n+3)(M_p - M_0 - DT_p)}{aD^{n+3}} \quad (13.37)$$

$M_p$  et  $T_p$  sont respectivement le moment fléchissant et l'effort tranchant en pointe. On considère en général les pieux rigides comme étant libres en pointe ( $M_p$  et  $T_p$  nuls). On retrouve d'ailleurs les équations (13.34) et (13.35) relatives au sol homogène en imposant  $n=0$ .

## d) Equation de comportement d'un pieu semi-rigide

L'équation (13.8) décrit aussi le comportement en flexion d'un pieu semi-rigide. Ce dernier est caractérisé dans un sol homogène par une fiche située entre  $L_0/2$  et  $\pi L_0$ .

### d1) Solution en cas d'un sol homogène

Cassan (1978) a présentée une formulée détaillée des déplacements et des efforts internes en cas d'un pieu libre en pointe, comme suit [27]:

- *Pieu libre en tête chargé par un effort H:*

$$Y(z) = \frac{2H}{E_{ii}L_0} A^*(z) \quad (13.38)$$

$$M(z) = HL_0 C^*(z) \quad (13.39)$$

- *Pieu libre en tête chargé par un moment  $M_0$ :*

$$Y(z) = \frac{2M_0}{E_{ii}L_0^2} D^*(z) \quad (13.40)$$

$$M(z) = M_0 B^*(z) \quad (13.41)$$

Les fonctions  $A^*$ ,  $B^*$ ,  $C^*$  et  $D^*$  sont représentées graphiquement aux figures 13.A à 13.D en annexe 1 de ce chapitre.

### d2) Solution en cas d'un sol multicouche

La solution de l'équation (13.8) peut être approchée par différences finies (Reese & Matlock, 1960) ou par la méthode des tranches (Frank et al, 1977).

#### 13.1.3.3. Construction des courbes P-Y

La courbe P-Y a fait l'objet de formulations recommandées par des règlements de dimensionnement géotechnique. On se limite à titre illustratif à exposer les formulations de la courbe P-Y dans les règlements de l'API (American Petroleum Institute), du PHRI (Ports and Harbours research Institute) et du CCTG-93 (Cahier des Clauses Techniques Générales), fascicule-62, titre 5.

#### a) Règlement de l'API-87 :

Cette méthode a été proposée par Parker (1970) et reprise ensuite par O'Neill et Murchisson (1983). Pour les sables, la courbe P-Y est décrite par une tangente hyperbolique, formulée comme suit :

$$P(y, z) = \eta AP_u th \left( \frac{N_H zy}{\eta AP_u} \right) \quad (13.42)$$

Cette fonction a une asymptote correspondant à la résistance latérale du sol, soit  $P_u$ , calculée comme étant la plus faible des deux valeurs suivantes :

$$P_{u1} = \gamma.Z.(C_1 Z + C_2 D) \quad (13.43)$$

$$P_{u2} = \gamma.Z.C_3.D \quad (13.44)$$

$C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$  sont les coefficients de la résistance latérale, dépendant de l'angle de frottement du sable, et donnés par la figure 13.5.



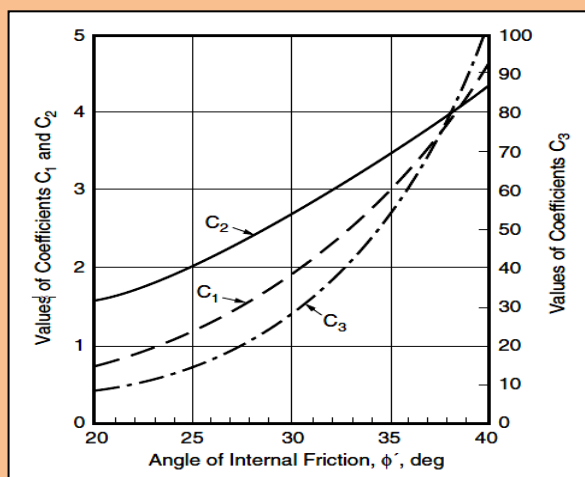


Figure 13.5. Coefficients de la résistance latérale selon l'API-87

$N_H$  est la pente du profil supposé linéaire du module de réaction latéral  $E_{ti}$ , et donné à la figure 13.6 en fonction de la densité relative du sable.

$\eta$  est un coefficient de forme, prenant la valeur de 1 pour les pieux circulaires. Enfin, le paramètre  $A$  est un coefficient empirique adimensionnel tel que :

$$A = \max \left\{ 3 - \frac{8Z}{10B}, 0.9 \right\} \quad (13.45)$$

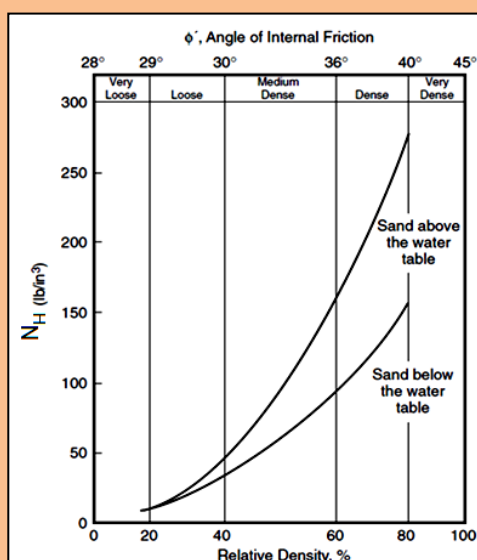


Figure 13.6. Pente  $N_H$  du module de réaction ( $1\text{lb}/\text{in}^2 = 271.28 \text{ kN}/\text{m}^2$ )

### b) Règlement japonais PHRI :

L'institut japonais des recherches portuaires PHRI a mis au point une formulation simple de la courbe P-Y pour les sables comme suit :

$$P = K_s B Z \sqrt{y} \quad (13.46)$$

La formule est due à Kubo (1965), qui a proposé de déduire la valeur du coefficient  $K_s$  à partir de

l'essai SPT. Suite à des essais en centrifugeuse sur du sable sec et dense de Toyoura (Japon), Terashi et Kitazume (1989) ont proposé une loi simple qui permet de déterminer ce coefficient à partir seulement du diamètre du pieu.

### c) Règlement français CCTG-93, fascicule, titre 5 :

Selon Ménard, une analogie a été constatée entre le phénomène d'expansion d'une sonde pressiométrique et celui de la réaction latérale du pieu. Cependant, il faut noter qu'une telle analogie est approximativement correcte pour la réaction frontale, où les contraintes à l'interface sont essentiellement normales. En outre, dans la zone arrière, le sol ne participe pas à la réaction latérale.

La courbe P-Y, schématisée à la figure 13.7, est applicable pour tous les sols. Il s'agit d'une courbe bi-linéaire ou tri-linéaire, en fonction de la nature du chargement. En cas de sollicitation de courte durée (freinage d'un véhicule, etc) ou permanente, les courbes P-Y sont caractérisées par un palier de résistance latérale du sol, limité seulement à la pression de fluage pressiométrique multipliée par la largeur ou diamètre B du pieu.

L'expérience de l'essai PMT montre que couramment la pression de fluage  $P_f$  est environ la moitié de la pression limite  $P_l$ .

En cas de sollicitation latérale induite par des poussées du sol, comme c'est le cas du déplacement latéral d'une couche molle en consolidation, ou en cas d'un chargement accidentel très bref en tête (choc, etc), le palier de la résistance latérale sol est étendu jusqu'à la pression limite multipliée par B.

Le module  $E_{ti}$  est à déterminer à partir du module pressiométrique  $E_m$ , mesuré à l'essai pressiométrique normal PMT, conformément à la méthode de Ménard. Pour un pieu de petit diamètre ( $B < B_0 = 0.60$  m), le module  $E_{ti}$  est donné par :

$$E_{ti} = \frac{18E_m}{4(2.65)^\alpha + 3\alpha} \quad (13.47)$$

Pour un pieu de gros diamètre ( $B > B_0 = 0.60$  m) :

$$E_{ti} = \frac{18E_m B}{4B_0(2.65B/B_0)^\alpha + 3B\alpha} \quad (13.48)$$

Le coefficient de structure *du sol*  $\alpha$  est déterminé à partir du tableau 10.1 du chapitre 10 en fonction de la nature du sol et du rapport  $E_m/P_l$ .

En deçà d'une certaine profondeur critique  $D_c$  relative au chargement horizontal, les caractéristiques pressiométriques sont à réduire par un facteur  $\lambda$  afin de tenir compte d'un certain *effet de surface* sur les caractéristiques pressiométriques, tel que:

$$\lambda = 0.5 \left( 1 + \frac{z}{D_c} \right) \quad (13.49)$$

Ménard recommande de prendre une profondeur critique égale à 2 diamètres pour un sol cohérent et 4 diamètres pour un sol pulvérulent.

#### 13.1.3.4. Calcul d'un pieu à partir des courbes P-Y - Cas général

Dans le cas d'un sol multicouche ou d'un sol monocouche non homogène, où les profils  $E_{ti}(z)$  et  $P_u(z)$  sont quelconques, le sol est décomposé en un ensemble de tranches suffisamment minces telles qu'on peut supposer que  $E_{ti}(z)$  est pratiquement constant dans un segment donné du pieu et l'équation (13.8) peut être intégrée soit par la méthode des différences finies, soit en exploitant la solution analytique (équations 13.9-13.22) en imposant la continuité aux interfaces des tranches.

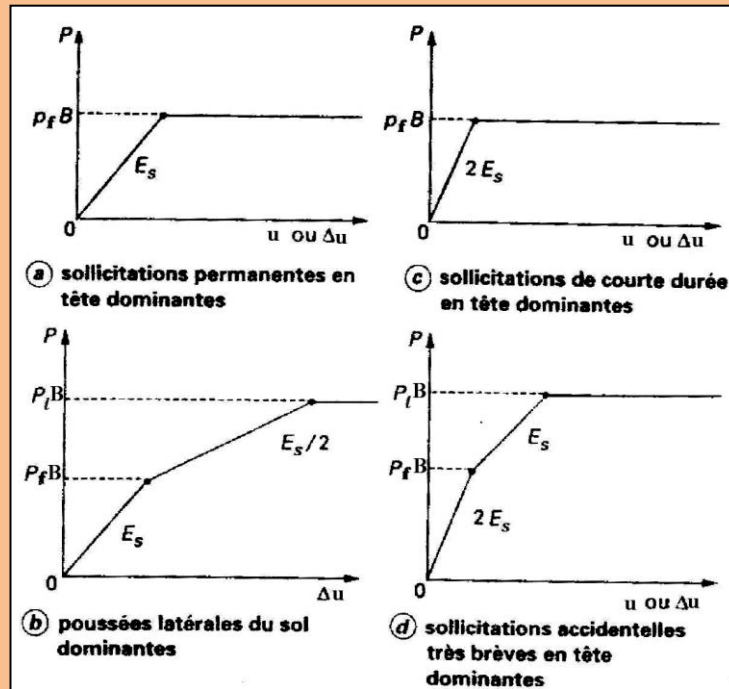


Figure 13.7. Courbes P-Y du CCTG-93 selon la nature du chargement latéral d'un pieu isolé

Cette dernière procédure a été la base de plusieurs programmes sur ordinateur tels que PILATE et SPULL\*.

Les courbes P-Y, illustrées en figure 13.2, étant non linéaires, il est nécessaire d'effectuer un calcul itératif d'équilibre du pieu pour effort vertical donné. Les logiciels cités ci-dessus tiennent compte de la non-linéarité du comportement de l'interface sol/pieu ainsi que d'une éventuelle hétérogénéité du sol.

### 13.1.3.5. Méthodes numériques

Vu la nature tridimensionnelle du problème de chargement latéral d'un pieu, la modélisation numérique par éléments finis a été un outil très utilisé, aussi bien dans les recherches sur ce problème que dans le calcul pratique.

Du fait qu'elle nécessite un logiciel puissant, et chaque fois que l'ampleur du projet la justifie, la modélisation par éléments finis est actuellement réservée aux projets nécessitant une investigation la plus réaliste possible de la réponse d'une fondation sur pieux soumise à une sollicitation latérale.

Certains aspects particuliers du problème, par ailleurs non encore élucidés par les méthodes de calcul, nécessitent le recours à un logiciel d'éléments finis, tel que le cas d'un groupe de pieux à proximité d'un terrain en pente.

### 13.1.3.6. Méthodes empiriques

La compilation des résultats d'essais de chargement latéral de pieux en vraie grandeur permet de dégager des conclusions très intéressantes quant à la prévision du comportement des pieux dans des configurations simples du système pieu/sol. Actuellement, ce type de méthodes est un thème de recherche prometteur et le futur proche verra la naissance des méthodes très pratiques d'analyse des déplacements et des efforts d'un pieu sous un effort horizontal.

\* Le logiciel SPULL a été développé à l'université de Blida par Bouafia et al (1999). Une copie gratuite peut être acquise sur simple demande adressée à l'auteur par messagerie électronique à l'adresse : [geoblida@gmail.com](mailto:geoblida@gmail.com)

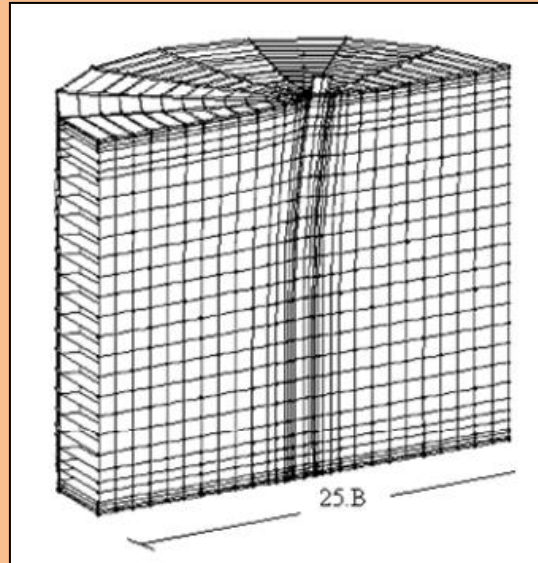


Figure 13.8. Maillage d'éléments finis avec Sap-2000 [41]

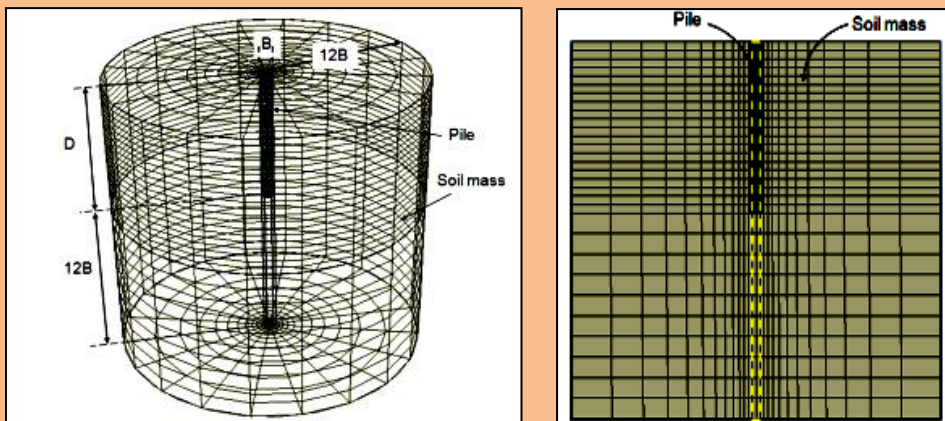


Figure 13.9. Maillage d'éléments finis avec Abaqus [42]

## 13.2. APPLICATIONS

oo

### Problème 13.1. Déplacement d'un pieu tubulaire dans un massif sableux-Méthode du module de réaction

Un pieu tubulaire en acier placé en forage simple, ayant un diamètre de 0.5 m, une fiche de 6 m et une rigidité à la flexion de 56 MNm<sup>2</sup> est soumis à une force horizontale statique appliquée à 0.5 m au dessus de la surface du sol. Le site est formé d'un sol sableux mal gradué ( $S_M$ ), humide, moyennement dense, et de grande épaisseur. Des essais au pressiomètre normal ont montré que le module pressiométrique augmente linéairement avec la profondeur tel que :  $E_M=3xz$  ( $E_M$  en MPa,  $z$  en m).

En considérant que la tête du pieu libre, on demande de :

- 1) Calculer le module de réaction latérale selon règlement français CCTG-93, fascicule, titre 5, sachant que le rapport  $E_M/p_l$  est de 10,
- 2) Calculer le déplacement et la rotation du pieu en surface du sol sous un effort de 30 kN, à la base de la méthode du module de réaction,
- 3) Tracer le profil du moment fléchissant pour cet effort et en déduire le moment maximum ainsi que profondeur,
- 4) Déduire les raideurs globales  $K_H$  et  $K_M$  qui sont respectivement le rapport  $H/Y_0$  et  $M_0/Y_0'$ . La raideur  $K_H$  représente la pente initiale de la courbe de chargement (voir figure 11.11) et  $K_M$  celle de la courbe  $M_0$  en fonction de la rotation  $Y_0'$ .

oo

### Problème 13.2. Déplacement d'un pieu tubulaire dans un massif sableux-Méthode d'élasticité de Poulos & Hull

On reprend les données du pieu étudié au problème 13.1 pour appliquer la méthode d'élasticité de Poulos et Hull (1992).

- 1) Estimer le module de déformation élastique du sol étudié en fonction du module pressiométrique. On considère que ce pieu ait un comportement intermédiaire sous charge verticale, c'est à dire que  $Q_s$  et  $Q_p$  sont comparables, et que ce pieu se situe ainsi entre le cas du pieu flottant ( $Q_p \ll Q_s$ ) et celui du pieu travaillant en pointe ( $Q_s \ll Q_p$ ). On mènera alors un calcul du déplacement et la rotation du pieu en surface du sol sous un effort de 30 kN, en envisageant séparément les deux hypothèses extrêmes : pieu flottant et pieu travaillant en pointe.
- 2) Comparer les résultats de calcul des déplacements et rotations à ceux du problème 13.1. Que concluez-vous pour ce cas d'étude ?

oo

### Problème 13.3. Déplacement d'un pieu semi-rigide dans un sol argileux surconsolidé-Méthode du module de réaction

Un site à Sallèdes (Clermont-Ferrand, France) est constitué sur les 6.5 premiers mètres d'une argile plastique bleue et surconsolidée appartenant au dépôt sédimentaire Stampien, surmontant un horizon de marne. Les caractéristiques pressiométriques varient peu avec la profondeur et peuvent être représentées par les valeurs moyennes suivantes :  $E_M=5.30$  MPa et  $P_l^*=295$  kPa.

Le pieu expérimental est un tube en acier ayant un diamètre extérieur de 0.915 m, une fiche de 5 m et une rigidité à la flexion de 1074 MN.m<sup>2</sup>. Il a été installé par battage et soumis à une force horizontale agissant à une cote de 0.5 m par rapport à la surface du sol.

En considérant que la tête et la pointe du pieu sont libres, on demande de :

- 1) Calculer le module de réaction latérale selon règlement français CCTG-93, fascicule, titre 5,
- 2) Calculer le déplacement et la rotation du pieu en surface du sol sous un effort de 110 kN, à la base de la méthode du module de réaction,

oo

### **Problème 13.4. Déflexion d'un pieu isolé sous une pile du Viaduc d'El-Harrach- Calcul par la méthode d'élasticité de Poulos & Hull**

Reprendre les données du problème 11.3 traitant des fondations du viaduc d'El-Harrach et calculer le déplacement horizontal  $Y_0$  et la rotation  $Y_0'$  du pieu en surface du sol, sur la base de la méthode d'élasticité de Poulos et Hull, sous un effort horizontal  $H$  égal à 384.5 kN. On rappelle que le pieu est en béton armé, ayant un diamètre de 1.2 m, une fiche de 20 m, un module d'élasticité de 31000 MPa, et encasté en tête dans une dalle coiffant les têtes du groupe de pieux.

Le tableau 11.15 montre que les caractéristiques pressiométriques du sol de fondation ne sont pas homogènes en fonction de la profondeur, ce qui nécessite de définir un module d'élasticité équivalent correspondant à un sol homogène équivalent conformément à l'équation (13.6) et en adoptant la corrélation entre  $E_s$  et  $E_M$  recommandée par Frank et Christoulas (1991).

Un calcul préalable de la capacité portante du pieu a montré qu'il s'agit d'un pieu à comportement intermédiaire, c'est à dire que  $Q_s$  et  $Q_p$  sont comparables, et que ce pieu se situe ainsi entre le cas du pieu flottant ( $Q_p \ll Q_s$ ) et celui du pieu travaillant en pointe ( $Q_s \ll Q_p$ ). On mènera alors un calcul en envisageant séparément les deux hypothèses extrêmes : pieu flottant et pieu travaillant en pointe.

oo

### **Problème 13.5. Déflexion d'un pieu isolé sous une pile du Viaduc d'El-Harrach- Calcul par la méthode du module de réaction**

Dans le cadre du même projet étudié au problème 13.4, il est demandé de calculer le déplacement horizontal  $Y_0$  et la rotation  $Y_0'$  du pieu en surface du sol, à la base de la méthode du module de réaction, en considérant un sol homogène équivalent caractérisé par un module de réaction équivalent égal à la moyenne analytique de  $E_{ti}$  en fonction de la profondeur (voir équation 13.6).

En comparant les résultats de calcul à ceux de la méthode d'élasticité de Poulos et Hull, que concluez vous ?

oo

### **Problème 13.6. Prédiction du comportement d'un pieu expérimental au site de Plancoët-Calcul par les courbes de réaction P-Y**

Un site à Plancoët (Côtes-du-Nord, France), siège à une campagne expérimentale de chargement horizontal des pieux, est constitué d'un sol bicouche composé d'une couche d'argile peu plastique saturée épaisse de 4 m, surmontant un horizon de sable limoneux épais de 4 m. L'essai pressiométrique normal a été effectué tous les 0.5 m et les valeurs moyennes des caractéristiques de chaque couche sont comme suit :

Couche d'argile :  $E_M = 1.25$  MPa, et  $P_i^* = 197.8$  kPa,

Couche de sable:  $E_M = 2.98$  MPa, et  $P_i^* = 401.4$  kPa.

Le pieu, de section rectangulaire, a une largeur  $B$  (perpendiculaire à la direction de l'effort horizontal appliqué) de 0.284 m, une fiche de 6.5 m, un élanement  $D/B = 22.88$ , et une rigidité à la

flexion de 30 MNm<sup>2</sup>. Il est installé par battage, et est soumis à un effort latéral appliqué à 1 m par rapport à la surface.

1) On demande de déterminer la courbe de chargement sachant que les efforts appliqués en tête du pieu sont 5, 10, 15 et 20 kN. On utilisera pour cela un programme de calcul des pieux chargés latéralement à la base des courbes P-Y, tel que SPULL\*. Les courbes P-Y sont à construire selon la méthode pressiométrique du règlement français CCTG-93, fascicule 62, conformément à la courbe (a) de la figure 13.7. Du fait de l'élançement important du pieu (D/B=22.9), on suppose que la pointe du pieu est encastrée dans le sol.

2) L'essai de chargement latéral du le pieu a permis de mesurer les déplacements en surface comme le montre le tableau 13.2. Il est demandé de tracer sur un même graphique les courbes de chargement H=f(Y<sub>0</sub>) obtenues par essai et par calcul. Conclusions ?

Tableau 13.2. Valeurs expérimentales du déplacement en surface

H (kN)	5.0	10.0	15.0	20.0
Y <sub>0</sub> (mm)	1.04	3.11	6.23	9.60

oo

### Problème 13.7. Déplacement d'un pieu tubulaire dans un massif sableux-Méthode des courbes P-Y

Le pieu tubulaire, étudié au problème 13.1, est analysé ici à la base des courbes P-Y. Le profil de pression limite nette est linéaire, tel que :  $P_l^*(z)=300.z$  (z : m,  $P_l^*$  : kPa).

1) On demande de tracer les courbes de chargement en tête du pieu, en l'occurrence H=f(Y<sub>0</sub>) et M<sub>0</sub>=f(Y<sub>0</sub>'), sachant que les efforts appliqués en tête du pieu, à une cote de 0.5 m par rapport au terrain naturel, sont 10, 20, 30, 50, 100, 150 et 200 kN. On utilisera pour cela un programme de calcul des pieux chargés latéralement à la base des courbes P-Y, tel que SPULL\*. Les courbes P-Y sont à construire selon la méthode pressiométrique du règlement français CCTG-93, fascicule 62, conformément à la courbe (a) de la figure 13.7.

2) Tracer les profils du moment fléchissant, de l'effort tranchant, de la réaction latérale pour l'effort de 200 kN et en déduire le moment maximum et l'effort tranchant maximum ainsi que leurs profondeurs. Commentez les résultats obtenus sachant que le moment fléchissant à la limite élastique du pieu est de 4420 kN.m,

3) Tracer et interpréter les profils du déplacement latéral et de la rotation pour l'effort de 200 kN,

4) Comparer les résultats obtenus à ceux des problèmes 13.1 et 13.2. Quelles sont vos conclusions ?

oo

\* Le logiciel SPULL a été développé à l'université de Blida par Bouafia et al (1999). Une copie gratuite peut être acquise sur simple demande adressée à l'auteur par messagerie électronique à l'adresse : [geoblida@gmail.com](mailto:geoblida@gmail.com)

### 13.3. SOLUTIONS

oo

#### Problème 13.1

1) Le rapport  $E_M/p_i$  étant égal à 10, correspond selon le tableau 10.1 du chapitre 10 au coefficient de structure du sol  $\alpha=1/3$ . Le module de réaction selon la théorie pressiométrique est calculé en fonction du module pressiométrique comme suit :

$$E_{ti} = \frac{18E_m}{4(2.65)^\alpha + 3\alpha} = \frac{18 \times 3z}{4(2.65)^{1/3} + 3/3} = 8.26z$$

2) La longueur élastique  $L_0$  du pieu est donnée par :  $L_0 = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{a}} = \sqrt[5]{\frac{56}{8.26}} = 1.466 \text{ m}$

Du fait que  $D=6 \text{ m}$  est supérieure à  $4L_0=5.84 \text{ m}$ , le pieu est souple, et le déplacement latéral et la rotation du pieu en surface du sol sont :

$$Y_0 = 2.4 \frac{H}{a^{3/5} (E_p I_p)^{2/5}} + 1.6 \frac{M_0}{a^{2/5} (E_p I_p)^{3/5}} = 2.4 \frac{30}{8260^{3/5} (56000)^{2/5}} + 1.6 \frac{30 \times 0.5}{8260^{2/5} (56000)^{3/5}} = 5.0 \text{ mm}$$

$$Y_0' = 1.6 \frac{H}{a^{2/5} (E_p I_p)^{3/5}} + 1.74 \frac{M_0}{a^{1/5} (E_p I_p)^{4/5}} = 1.6 \frac{30}{8260^{2/5} 56000^{3/5}} + 1.74 \frac{30 \times 0.5}{8260^{1/5} 56000^{4/5}} = 2.52 \text{ mRad}$$

3) Le moment fléchissant le long du pieu se calcule comme suit (voir équation 13.29) :

$$M(z) = A_m(z)HL_0 + B_m(z)M_0 = A_m(z) \times 43.98 + B_m(z) \times 15.$$

Les coefficients adimensionnels  $A_m$  et  $B_m$  sont donnés par la figure 13.4 en considérant l'exposant  $n=1$  (sol de Gibson). La figure 13.10 illustre le profil du moment de flexion et fait dégager un maximum de 45.4 kN.m à la profondeur de 1.76 m par rapport à la surface.

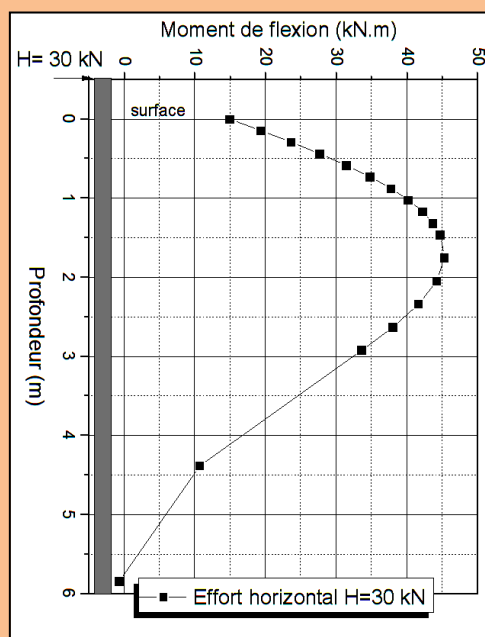


Figure 13.10. Profil de moment fléchissant



4)  $K_H=30/(4.97 \times 10^{-3})=6036.2$  kN/m et  $K_M=15/(2.52 \times 10^{-3})=5952.4$  kN.m/Rad. Ces deux grandeurs permettent un calcul direct du déplacement et de la rotation du pieu sous un effort latéral donné (voir par exemple l'équation 13.2), à condition que l'effort appliqué soit faible ( $H \ll H_u$ ), ce qui correspond au domaine des petits déplacements et par conséquent au comportement linéaire du sol, c'est à dire à une relation linéaire entre l'effort appliqué et le déplacement du pieu (voir figure 11.11).

oo

### Problème 13.2

1) Le module de déformation  $E_s(z)$  peut être estimé par corrélation avec le module pressiométrique  $E_M(z)$ , conformément à proposition de Frank et Christoulas (1991). On envisage les deux hypothèses extrêmes de comportement du pieu.

#### 1a) Cas d'un pieu flottant : $E_s(z)=5E_M(z)=15z$ .

La fiche critique  $D_c$  est la profondeur au delà de laquelle le pieu reste au repos. Elle est déterminée comme suit :  $D_c = 3.3 \left( \frac{E_p I_p}{a} \right)^{1/5} = 3.3 \left( \frac{56}{15} \right)^{1/5} = 4.29$  m.

La fiche du pieu étant supérieure à la fiche critique, le pieu est donc souple. Les coefficients d'influence du déplacement et de la rotation sont calculés comme suit :

$$I_{YH} = 13.10 + 11.09 \text{Log}_{10} \left( \frac{D_e}{B} \right) = 13.10 + 11.09 \text{Log}_{10} \left( \frac{4.29}{0.5} \right) = 23.45$$

$$I_{YM} = I_{YH} = 34.63 + 18.03 \text{Log}_{10} \left( \frac{D_e}{B} \right) = 34.63 + 18.03 \text{Log}_{10} \left( \frac{4.29}{0.5} \right) = 51.47$$

$$I_{Y'M} = 156.1 + 37.14 \text{Log}_{10} \left( \frac{D_e}{B} \right) = 156.1 + 37.14 \text{Log}_{10} \left( \frac{4.29}{0.5} \right) = 190.77$$

$$Y_0 = H \frac{I_{YH}}{E_s(D_e)D_e} + M_0 \frac{I_{YM}}{E_s(D_e)D_e^2} = 30 \frac{23.45}{(15 \times 4.29) \times 4.29} + 15 \frac{51.47}{(15 \times 4.29) \times (4.29)^2} = 3.2 \text{ mm}$$

$$Y_0' = H \frac{I_{YH}}{E_s(D_e)D_e^2} + M_0 \frac{I_{Y'M}}{E_s(D_e)D_e^3} = 30 \frac{51.47}{(15 \times 4.29) \times 4.29^2} + 15 \frac{190.77}{(15 \times 4.29) \times (4.29)^3} = 1.86 \text{ mRad}$$

#### 1b) Cas d'un pieu travaillant en pointe : $E_s(z)=4E_M(z)=12z$ .

La même démarche de calculs mène aux résultats suivants :  $D_c = 4.49$  m,  $I_{YH}=23.67$ ,  $I_{YM}=I_{Y'H}=51.82$  et  $I_{Y'M}=191.5$ . Enfin, on aboutit à  $Y_0=2.92$  mm et  $Y_0'=1.62$  mRad.

Le déplacement du pieu en surface se situe ainsi entre 2.9 et 3.2 mm, soit en moyenne de 3 mm, et la rotation est encadrée par 1.6 et 1.9 mRad, avec une valeur moyenne de 1.75 mRad.

2) On constate que les déplacements et rotations prévus par les deux méthodes sont du même ordre de grandeur, ceux donnés par la théorie du module de réaction étant légèrement plus élevés.

oo

### Problème 13.3

1) Le rapport  $E_M/p_i$  est égal à 17.9, ce qui correspond selon le tableau 10.1 au coefficient de structure du sol  $\alpha=1$ . Ce tableau confirme qu'il s'agit d'une argile surconsolidée. Le module de réaction latérale est calculé comme suit :

$$E_{ti} = \frac{18E_m B}{4B_0(2.65B/B_0)^\alpha + 3B\alpha} = \frac{18 \times 5.3 \times 0.915}{4 \times 0.6(2.65 \times 0.915/0.6)^1 + 3 \times 0.915 \times 1} = 7.00 \text{ MPa}$$

2) La longueur élastique  $L_0$  du pieu est donnée par :

$$L_0 = \sqrt[4]{\frac{4E_p I_p}{E_{ti}}} = \sqrt[5]{\frac{4 \times 1074}{7.0}} = 4.97 \text{ m}$$

Du fait que  $L_0/2=2.48 < D=5 \text{ m} < \pi L_0=15.6 \text{ m}$ , le pieu est plutôt semi-rigide, et le déplacement latéral peut se calculer selon la formule de Cassan comme suit :

$$Y(z) = \frac{2H}{E_{ti} L_0} A^*(z) + \frac{2M_0}{E_{ti} L_0^2} D^*(z)$$

En surface ( $z=0$ ), les figure 13.A et 13.D donnent pour  $z=0$ :  $A^*=2.10$  et  $D^*=3.10$ , ce qui donne :

$$Y_0 = \frac{2 \times 110}{7000 \times 4.97} 2.1 + \frac{2 \times 55}{7000 \times 4.97^2} 3.1 = 15.25 \text{ mm.}$$

La rotation est obtenue par dérivation des déplacements en fonction de la profondeur, c'est à dire :

$$Y'(z) = \frac{dY}{dz} = \frac{2H}{E_{ti} L_0} \frac{dA^*}{dz} + \frac{2M_0}{E_{ti} L_0^2} \frac{dD^*}{dz}$$

A partir des figure 13.6 et 13.7, on constate que les courbes de  $A^*$  et  $D^*$  en fonction de  $z/L_0$  sont pratiquement linéaires, ce qui permet de déduire leur pente, soit  $dA^*/dz=3.1/L_0$  et  $dD^*/dz=6.2/L_0$ , ce qui aboutit à :

$$Y_0' = \frac{2 \times 110}{7000 \times 4.97^2} 3.1 + \frac{2 \times 55}{7000 \times 4.97^3} 6.2 = 4.73 \text{ mRad.}$$

oo

### Problème 13.4

Le pieu étudié est caractérisé par un un élancement  $D/B=20/1.2=16.7$  et une rigidité à la flexion  $E_p I_p$  égale à :  $E_p I_p = \frac{\pi B^4}{64} E_p = \frac{3.14 \times 1.2^4}{64} 31000 = 3153.82 \text{ MNm}^2$ .

On en visage les deux hypothèses extrêmes de comportement du pieu.

**a) Cas d'un pieu flottant :**  $E_s(z)=5E_M(z)$ . L'équation (13.6) permet de déterminer un module d'élasticité du sol homogène équivalent comme suit :

$$E_{eq} = \frac{1}{D} \int_0^D E_s(z) dz = \frac{1}{20} \int_0^{20} 5E_M(z) dz = 6.422 \text{ MPa.}$$

Cette intégrale a été approchée par la somme des trapèzes et en extrapolant la première valeur à la surface, c'est à dire  $E_M(0)=852 \text{ kPa}$ .

La fiche critique  $D_c$  est la profondeur au delà de laquelle le pieu reste au repos. Elle est déterminée comme suit :  $D_c = 4.44 \left( \frac{E_p I_p}{E_s} \right)^{1/4} = 20.9 \text{ m}$ . On voit que  $D_c/3=6.9 \text{ m} < D=20 < D_c=20.9 \text{ m}$ . Il s'agit ainsi d'un

pieu semi-rigide dont le comportement se situe entre celui du pieu flexible et du pieu rigide. Le déplacement et la rotation en tête du pieu se situent ainsi entre ceux des ces deux cas extrêmes.

**a1) Cas d'un pieu flexible encastré en tête :**  $I_{YH} = 1.326 + 1.641 \text{Log}_{10} \left( \frac{20.9}{1.2} \right) = 3.362$

$$Y_0 = H \frac{I_{YH}}{E_s(D_e)D_e} + M_0 \frac{I_{YM}}{E_s(D_e)D_e^2} = 384.5 \frac{3.362}{6422 \times 20.9} = 9.6 \text{ mm}$$

$$Y_0' = H \frac{I_{Y'H}}{E_s(D_e)D_e^2} + M_0 \frac{I_{Y'M}}{E_s(D_e)D_e^3} = 0$$

**a2) Cas d'un pieu rigide encastré en tête :**  $I_{YH} = 0.539 + 0.545 \text{Log}_{10} \left( \frac{20}{1.2} \right) = 1.205$

$$Y_0 = H \frac{I_{YH}}{E_s(D_e)D_e} + M_0 \frac{I_{YM}}{E_s(D_e)D_e^2} = 384.5 \frac{1.205}{6422 \times 20} = 3.6 \text{ mm}$$

$$Y_0' = H \frac{I_{Y'H}}{E_s(D_e)D_e^2} + M_0 \frac{I_{Y'M}}{E_s(D_e)D_e^3} = 0$$

**b) Cas d'un pieu travaillant en pointe :**  $E_s(z) = 4E_M(z)$ . L'équation (12.11) donne :

$$E_{eq} = \frac{1}{D} \int_0^D E_s(z) dz = \frac{1}{20} \int_0^{20} 4E_M(z) dz = 5.138 \text{ MPa} \cdot D_c = 4.44 \left( \frac{E_p I_p}{E_s} \right)^{1/4} = 22.1 \text{ m}$$

Il s'agit ainsi d'un pieu semi-rigide. Le déplacement et la rotation en tête du pieu sont encadrés par ceux des ces deux cas extrêmes.

**b1) Cas d'un pieu flexible encastré en tête :**  $I_{YH} = 1.326 + 1.641 \times \text{Log}_{10} \left( \frac{22.1}{1.2} \right) = 3.402$

$$Y_0 = H \frac{I_{YH}}{E_s(D_e)D_e} + M_0 \frac{I_{YM}}{E_s(D_e)D_e^2} = 384.5 \frac{3.402}{5138 \times 22.1} = 11.5 \text{ mm}$$

$$Y_0' = H \frac{I_{Y'H}}{E_s(D_e)D_e^2} + M_0 \frac{I_{Y'M}}{E_s(D_e)D_e^3} = 0$$

**b2) Cas d'un pieu rigide encastré en tête :**  $I_{YH} = 0.539 + 0.545 \text{Log}_{10} \left( \frac{20}{1.2} \right) = 1.205$

$$Y_0 = H \frac{I_{YH}}{E_s(D_e)D_e} + M_0 \frac{I_{YM}}{E_s(D_e)D_e^2} = 384.5 \frac{1.205}{5138 \times 20} = 4.5 \text{ mm}$$

$$Y_0' = H \frac{I_{Y'H}}{E_s(D_e)D_e^2} + M_0 \frac{I_{Y'M}}{E_s(D_e)D_e^3} = 0$$

On conclut de ce calcul que le déplacement  $Y_0$  est encadré par les valeurs 3.6 et 11.5 mm, la rotation étant évidemment nulle du fait de l'encastrement du pieu dans la dalle coiffant le groupe de pieux.

oo

### Problème 13.5

Le module de réaction latérale  $E_{ti}$  peut être déterminé à partir du module pressiométrique:

$$E_{ti} = \frac{18E_M B}{4B_0(2.65B/B_0)^\alpha + 3B\alpha} = \frac{18E_M \times 1.2}{4 \times 0.6(2.65 \times 1.2/0.6)^{1/2} + 3 \times 1.2 \times 0.5} = 2.948E_M$$

Le rapport  $E_M/P_i$  le long du pieu étant inférieur à 7, le tableau 10.1 au chapitre 10 donne un coefficient  $\alpha$  de "structure du sol" égal à 0.5.

La figure 13.11 illustre la profil du module de réaction et montre une hétérogénéité remarquable le long du pieu. En fait d'après le tableau 11.15, le module pressiométrique augmente régulièrement jusqu'à une profondeur de 10 m et chute par la suite considérablement jusqu'à 20 m, ensuite il s'améliore à cause de la proximité du substratum gréseux à 24 m.

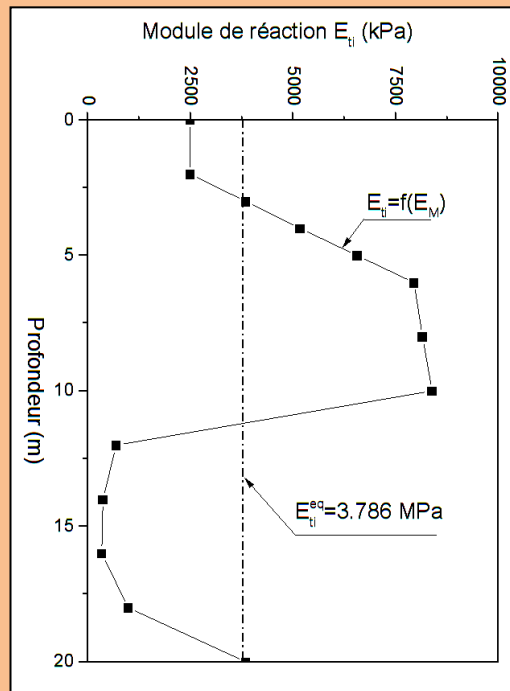


Figure 13.11. Profil du module de réaction latéral

La valeur moyenne du module de réaction est calculée comme suit :

$$E_{ti}^{eq} = \frac{1}{D} \int_0^D E_{ti}(z) dz = \frac{1}{20} \int_0^{20} 2.948 E_M(z) dz = 3.786 \text{ MPa}$$

La longueur élastique ou longueur de transfert  $L_0$  est telle que :

$$L_0 = \sqrt[4]{\frac{4E_p I_p}{E_{ti}}} = \sqrt[4]{\frac{4 \times 3153.82}{3.786}} = 7.60 \text{ m.}$$

Du fait que  $0.5 < D/L_0 = 2.63 < \pi$ , le comportement du pieu est semi-rigide. On propose d'encadrer le résultat cherché par ceux des cas extrêmes du pieu flexible encastré et du pieu rigide encastré.

#### a) cas d'un pieu flexible encastré en tête dans un sol homogène :

A partir de l'équation 13.24 donnant la rotation  $Y_0'$  en surface, si on impose que  $Y_0' = 0$ , on trouve que le moment fléchissant  $M_0$  à l'encastrement est égal à  $-HL_0/2$ . En remplaçant l'expression de  $M_0$  dans l'équation 13.23, on retrouve d'ailleurs l'équation 13.25 du déplacement en surface en cas d'un pieu flexible encastré en tête :

$$Y_0 = \frac{H}{E_{ti} L_0} = \frac{384.5}{3786 \times 7.6} = 13.4 \text{ mm}$$

#### b) cas d'un pieu rigide encastré en tête dans un sol homogène :

Selon la même démarche, en imposant une rotation  $Y_0'$  nulle au niveau de l'équation 13.35, on aboutit à un moment correspondant  $M_0 = -HD/2$ . En remplaçant l'expression de  $M_0$  dans l'équation 13.34, le déplacement en surface d'un pieu rigide encastré en tête est tel que :

$$Y_0 = \frac{H}{E_{ti}D} = \frac{384.5}{3786 \times 20} = 5.1 \text{ mm}$$

Ainsi, le déplacement  $Y_0$  est encadré par les valeurs 5.0 et 13.5 mm. On retrouve d'ailleurs le même ordre de grandeur des valeurs extrêmes calculés par la méthode d'élasticité de Poulos et Hull.

On remarque que les deux méthodes de calcul, à savoir la méthode d'élasticité et celle du module de réaction ne prévoient pas le cas d'un pieu encasté en tête ayant un comportement intermédiaire. En outre, le modèle du sol homogène équivalent adopté dans les deux méthodes est assez grossier. Sur le plan statistique, la population du module de réaction le long du pieu est caractérisée par une grande marge de valeurs, allant de 0.35 à 8.4 MPa, et un coefficient de variation COV égal à 76.8%, indiquant une très large dispersion des valeurs, la valeurs moyenne n'est ainsi pas représentative de la population. Le calcul mené du déplacement est ainsi entaché d'une incertitude non négligeable et ne sert qu'à indiquer un ordre de grandeur.

En pratique, le calcul d'encadrement, tel que mené pour ce pieu semi-rigide, est utile seulement en phase préliminaire du projet dans laquelle on évalue un ordre de grandeur du déplacement du pieu. Par la suite, il est nécessaire de mener un calcul plus précis sur la base des courbes P-Y introduites dans un logiciel de calcul selon la théorie de transfert de charges.

oo

### Problème 13.6

1) Le sol autour du pieu est composé de deux couches, l'une est une argile peu plastique saturée épaisse de 4 m, et l'autre est un sable limoneux moyennement dense et saturé épais de 2.5 m.

On propose de découper le sol en deux tranches, la tranche supérieure représentant l'argile, et celle inférieure représentant le sable.

Selon la figure 13.7 schématisant les courbes P-Y recommandées par le règlement français, en fonction de la nature du chargement latéral d'un pieu, la courbe (a) est bilinéaire. La portion initiale a une pente égale au module  $E_{ti}$  et la deuxième est caractérisé par un palier horizontal égal à  $P_f^* \cdot B$ . Du fait qu'on adopte souvent la corrélation  $P_f/P_i \approx 2$ , la résistance latérale  $P_u$  du sol est donc estimée par  $P_f^* \cdot B/2$ . Enfin, la courbe P-Y bilinéaire peut aussi être schématisée par une fonction hyperbolique ayant l'allure décrite par la figure 13.2

La courbe P-Y de l'argile est caractérisée par un module de réaction calculé comme suit :

$$E_{ti} = \frac{18E_m}{4(2.65)^\alpha + 3\alpha} = \frac{18 \times 1.25}{4(2.65)^{1/2} + 3/2} = 2.81 \text{ MPa}, \text{ et la résistance latérale } P_u = P_f^* \cdot B/2 = 26.6 \text{ kN/m}.$$

La courbe P-Y du sable est définie par un module de réaction égal à :

$$E_{ti} = \frac{18E_m}{4(2.65)^\alpha + 3\alpha} = \frac{18 \times 2.98}{4(2.65)^{1/3} + 3/3} = 8.21 \text{ MPa}, \text{ et la résistance latérale } P_u = P_f^* \cdot B/2 = 56.9 \text{ kN/m}.$$

Du fait du fort élancement du pieu ( $D/B=22.9$ ), la pointe du pieu est supposée faiblement sollicitée et peut ainsi être considérée encastée (déplacement et rotation nuls).

Le programme SPULL (Single Pile Under Lateral Loads)\* est un outil de calcul d'un pieu isolé chargé latéralement, basé sur la théorie des courbes P-Y. Le calcul prend en compte le comportement non linéaire de l'interface sol/pieu (courbes P-Y non linéaires) ainsi que la variabilité en profondeur des paramètres de la courbe P-Y, ce qui permet une analyse réaliste du comportement en déplacements du pieu.

Dans le cas d'un sol multicouche ou d'un sol monocouche non homogène, où les profils de  $E_{ti}(z)$  et de  $P_u(z)$  sont quelconques, le sol est décomposé en un ensemble de tranches suffisamment minces de telle façon qu'on puisse assimiler  $E_{ti}(z)$  et  $P_u(z)$  dans chaque tranche à une droite. On montre d'ailleurs que la moyenne analytique de  $E_{ti}(z)$  et  $P_u(z)$  dans une tranche très mince est la valeur de  $E_{ti}$  et  $P_u$  au milieu de cette tranche. Autrement dit, les profils de  $E_{ti}(z)$  et de  $P_u(z)$  peuvent être approchés par un

ensemble de paliers, chacun étant caractérisé par la valeur au milieu de cette tranche. L'équation (13.8) peut ainsi être intégrée en exploitant la solution analytique de l'équation (équations 13.9 à 13.14) et en imposant la continuité aux interfaces des tranches, ainsi que les conditions aux limites en tête et en pointe du pieu.

Les courbes de réaction P-Y, telles que schématisées aux figures 13.2 et 13.7, sont non linéaires, ce qui nécessite un processus de résolution itératif des équations jusqu'à la convergence en termes de déplacements  $y(z)$  ou de réactions latérales  $P(z)$ , en satisfaisant une tolérance  $\epsilon$  fixée par l'utilisateur.

Les données de calcul doivent être introduites en format libre dans un fichier se trouvant au même répertoire où SPULL est installé. Au préalable, un fichier de données du type texte (\*.txt) est à créer selon un format de rédaction précise en annexe 2 de ce chapitre.

Le logiciel crée un fichier des résultats de calculs retenus pour chaque incrément d'effort après convergence des itérations. Après un rappel des données introduites, le listing fait sortir pour chaque profondeur le long du pieu le déplacement latéral et la rotation du pieu, le moment fléchissant, l'effort tranchant et enfin la réaction latérale. A titre indicatif, la figure 13.12 illustre un spécimen de sortie des résultats pour le premier incrément d'effort latéral.

Le tableau 13.3 regroupe les valeurs du déplacement et de rotation en surface sous les différents incréments de charge horizontale.

Tableau 13.3. Comparaison des calculs par SPULL et des mesures en essai de chargement

H (kN)	5.0	10.0	15.0	20.0
$Y_0$ (mm) calculé	1.89	3.79	5.69	7.58
$Y_0$ (mm) mesuré	1.04	3.11	6.23	9.60
$Y_0'$ (mRad) calculé	0.934	1.870	2.805	3.740

2) Le tableau comparatif 13.3 et la figure 13.11 montrent que le calcul par la méthode des courbes P-Y permet une bonne estimation des déplacements mesurés lors de l'essai de chargement. L'écart relatif entre les déplacements calculés et mesurés pour un effort de 20 kN est de 21%, ce qui est acceptable vu les approximations faites sur les paramètres de courbes P-Y ( $E_{ti}$  et  $P_u$ ) et le nombre réduit des tranches le long du pieu. Un calcul plus rigoureux, en augmentant le nombre de tranches le long du pieu, permettra d'obtenir une meilleure précision des résultats.

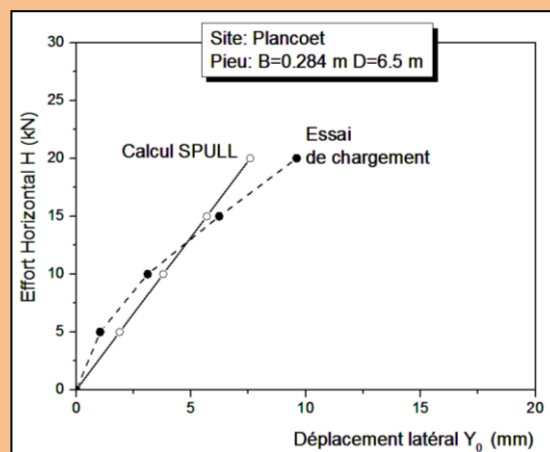


Figure 13.11. Comparaison des déplacements calculés et mesurés du pieu.



## Problème 13.7

1) Le sol autour du pieu est composé d'un sol sableux ayant des caractéristiques pressiométriques augmentant linéairement avec la profondeur comme suit :  $E_{ti}(z)=8.26xz$  (MPa) et  $P_i^*(z)=300.z$  (kPa).

La longueur élastique est  $L_0=1.466$  m. Du fait que  $D/L_0=4.10 > 4$ , le pieu est souple, et la pointe peut être considérée comme au repos (déplacement et rotation nuls).

On propose de découper le sol en 10 tranches de 0.6 m d'épaisseur chacune et on définira la courbe P-Y au milieu de chaque tranche. La portion initiale de la courbe a une pente égale au module  $E_{ti}$  et la deuxième est caractérisé par un palier horizontal égal à  $P_i^*.B \approx P_i^*.B/2$ . Enfin, la courbe P-Y bilinéaire peut aussi être schématisée par une fonction hyperbolique ayant l'allure décrite par la figure 13.2.

Les courbes P-Y ont été introduites dans le fichier des données de SPULL, ce qui a permis de déterminer les efforts et déplacements du pieu pour tous les incréments de charge latérale appliqués en tête. Le tableau 13.4 regroupe les valeurs du déplacement et de rotation en surface sous les différents incréments de charge horizontale et la figure 13.13 illustre les courbes de chargement requises. Il se dégage de ces courbes que le pieu manifeste un comportement non linéaire caractérisé par une raideur latérale  $K_H$  (rapport  $H/Y_0$ ) diminuant sensiblement avec la charge appliquée.

Tableau 13.4. Déplacements et rotations calculés à partir des courbes P-Y

H (kN)	10	20	30	50	100	150	200
$Y_0$ (mm)	1.67	3.50	5.46	9.84	23.70	42.24	66.10
$Y_0'$ (mRad)	0.84	1.73	2.67	4.70	10.66	17.92	26.55

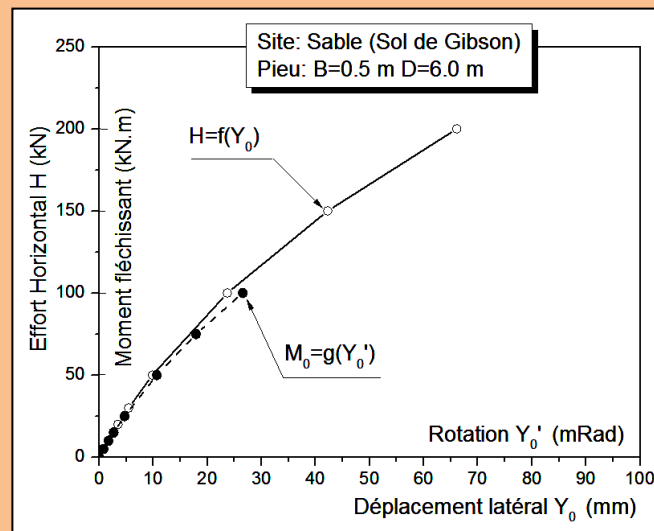


Figure 13.13. Courbes de chargement en tête du pieu

2) La figure 13.14 regroupe les profils de la réaction latérale  $P(z)$ , de l'effort tranchant  $T(z)$  et du moment de flexion  $M(z)$ . La réaction du sol est composée d'une butée mobilisée le long du pieu jusqu'à une profondeur de 4.8 m dite "centre de pression", et d'une contre-butée au delà.

Le moment maximum s'est manifesté à une profondeur de 2.40 m et a atteint une valeur de 410.6 kN.m, soit environ 4 fois le moment  $M_0$  appliqué en surface ( $M_0=100$  kN.m). Il est à noter que sous cette valeur maximale du moment, le pieu est sollicité à cette profondeur à  $410.6/4420=9.3\%$  de la limite du comportement élastique, ce qui dégage un comportement pratiquement linéaire du matériau du pieu.

Le profil d'effort tranchant a par contre mobilisé une valeur maximale située en tête du pieu, soit de 200 kN.



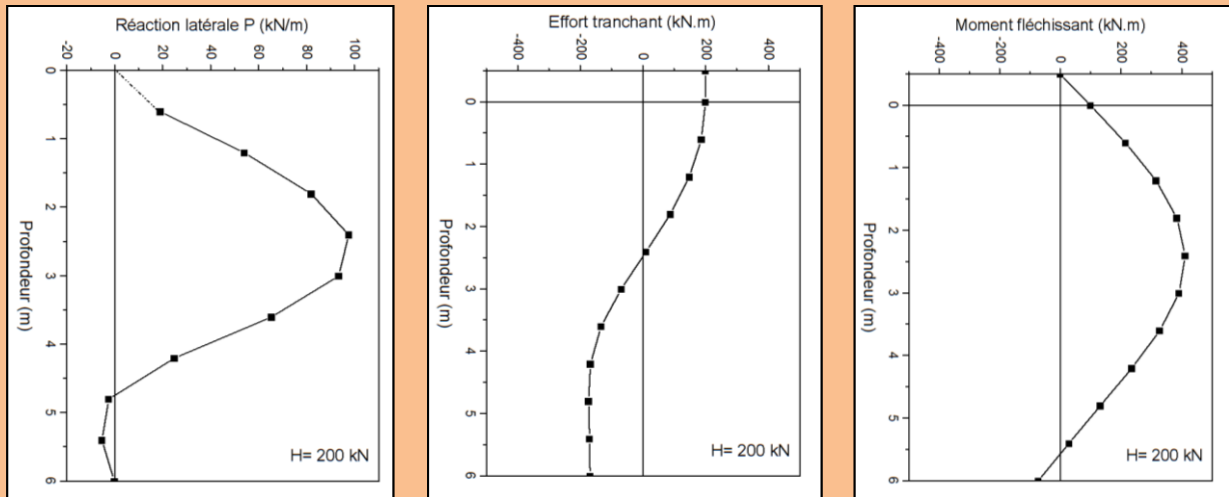


Figure 13.14. Profils des efforts le long du pieu

3) La figure 13.15 illustre les profils de déplacement et de rotation du pieu. On remarque d'ailleurs que le profil de déplacement passe à la profondeur de 4.8 m par une valeur nulle, dite "centre de rotation", et qui coïncide avec le centre de pression, ce qui confirme l'hypothèse de Winkler, décrite par l'équation 13.7, selon laquelle le déplacement  $Y$  et la réaction  $P$  s'annulent simultanément.

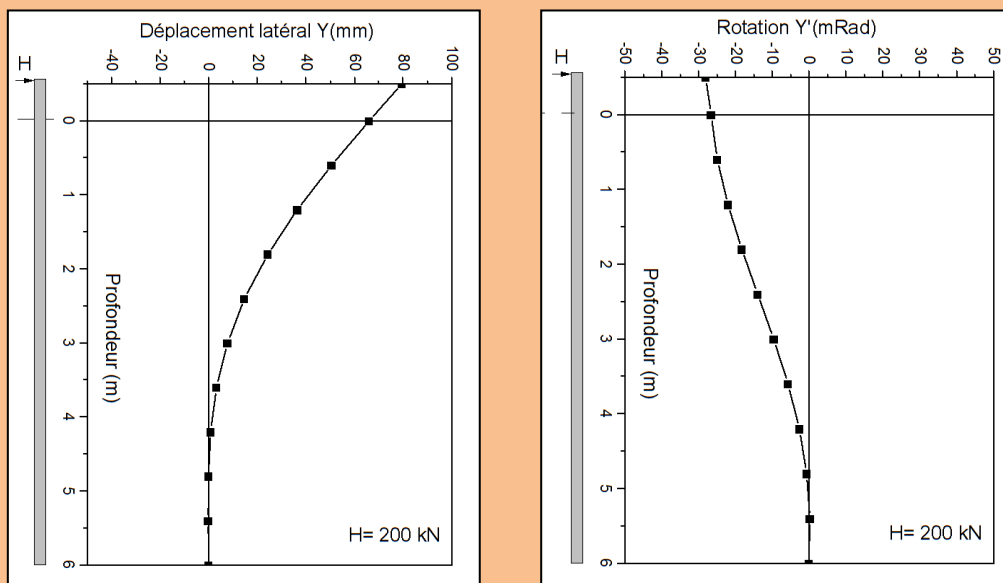


Figure 13.15. Profils de déplacement et de rotation du pieu

4) Selon le tableau 13.5, regroupant les résultats de calculs selon les trois méthodes : module de réaction, courbes P-Y et élasticité, il se dégage que les deux premières méthodes aboutissent au même résultat, ce qui est évident puisque la méthode des courbes P-Y est la généralisation de la méthode du module de réaction en considérant l'interface pieu/sol composé de ressorts non linéaires (voir figure 13.1). Sous un effort de 30 kN, ce qui correspond à une faible charge, le comportement du pieu est plutôt linéaire (voir figure 13.2) et les ressorts à l'interface sont plutôt linéaires. L'écart entre les deux méthodes est par contre important si la charge est importante. A titre d'exemple, sous un effort en tête de 200 kN, les équations (13.31) et (13.32) de la méthode du module de réaction donnent respectivement un déplacement  $Y_0$  égal à 33.13 mm et une rotation de 16.8 mRad, soit environ la

moitié de ceux donnés par la méthode des courbes P-Y. Cette comparaison dégage clairement l'important effet du comportement non linéaire du pieu qui doit être pris en compte dans les calculs de déplacements, particulièrement sous un chargement latéral important.

Comparées à ces deux méthodes, celle de l'élasticité proposée par Poulos et Hull donne des valeurs plus petites, mais ayant le même ordre de grandeur.

La méthode des courbes P-Y, bien qu'elle nécessite le recours à un calcul avec un logiciel, a le mérite de tenir compte du comportement non linéaire, ainsi que de la non homogénéité du sol. Les deux autres méthodes sont d'ailleurs limitées à l'étude comportement linéaire du pieu dans un sol à configuration géotechniques simple, tel que le cas d'un sol à propriétés homogènes ou variant linéairement avec la profondeur (Sol de Gibson).

Tableau 13.5. Comparaison des déplacements et rotations pour un effort de 30 kN

Méthode	Y <sub>0</sub> (mm)	Y <sub>0</sub> ' (mRad)	M <sub>max</sub> (kN.m)	Z <sub>max</sub> (m)
Module de réaction	5.0	2.5	45.4	1.76
Elasticité (Poulos)	3.2-3.9	1.9-2.2	---	---
Courbes P-Y	5.46	2.67	47.0	1.80

oo

**ANNEXE 1: Courbes des fonction  $A^*$ ,  $B^*$ ,  $C^*$  et  $D^*$  pour un pieu semi-rigide  
(Méthode de Cassan)**

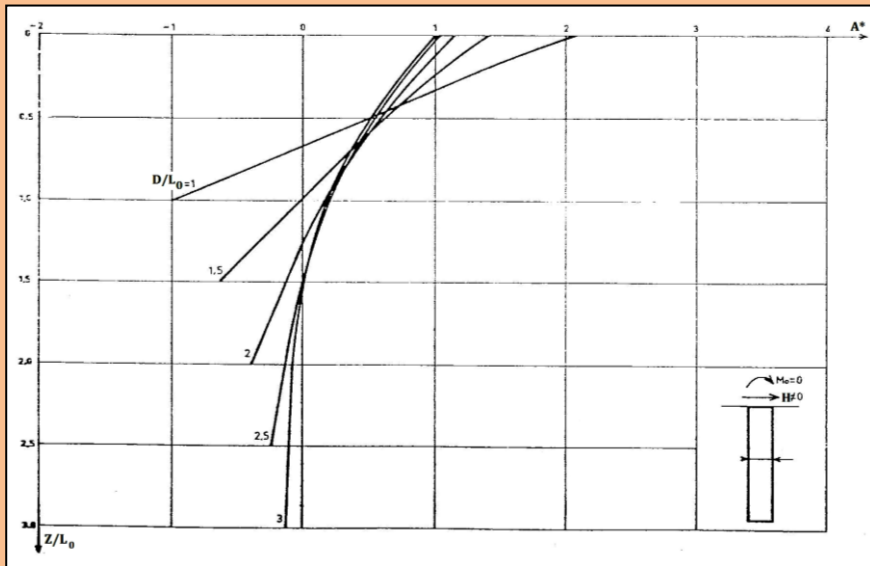


Figure 13.A. Graphiques de la fonction  $A^*$  [27]

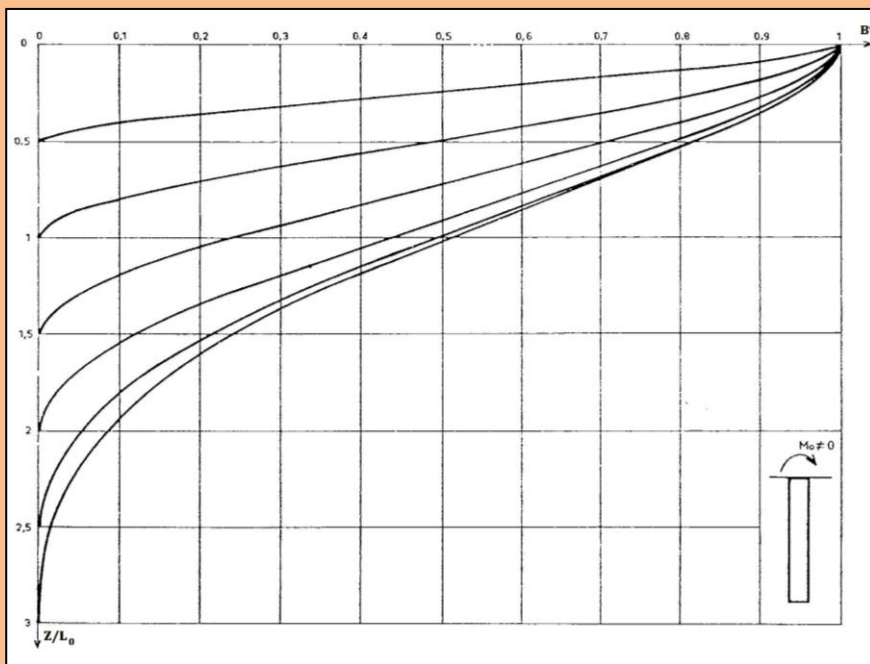


Figure 13.B. Graphiques de la fonction  $B^*$  [27]

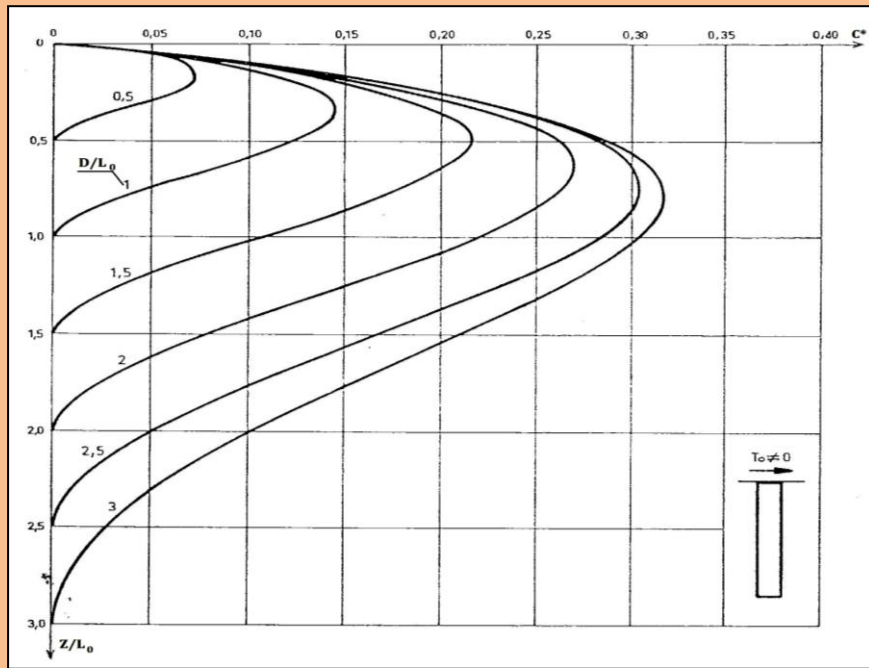


Figure 13.C. Graphiques de la fonction  $C^*$  [27]

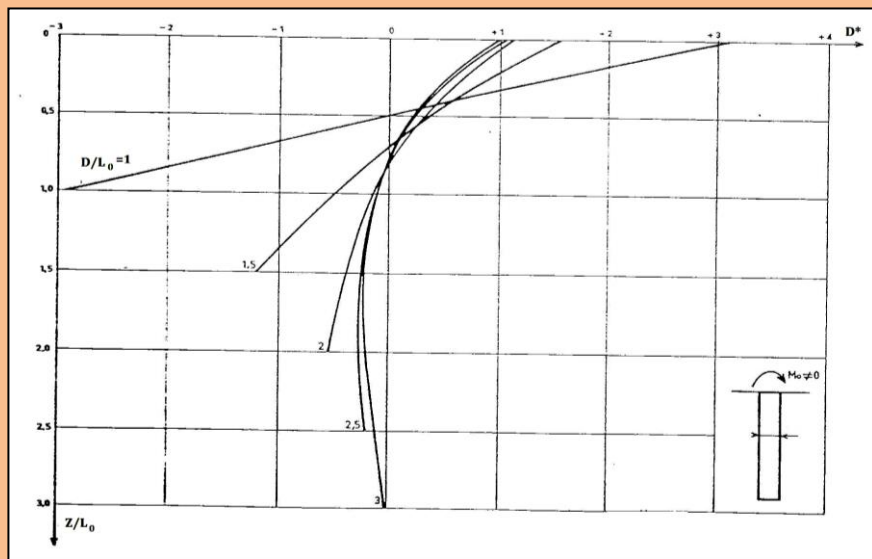


Figure 13.D. Graphiques de la fonction  $D^*$  [27]

## ANNEXE 2: Format de rédaction du fichier de données de SPULL

- 1<sup>e</sup> ligne : Title
- 2<sup>e</sup> ligne : Location
- 3<sup>e</sup> ligne : Date
- 4<sup>e</sup> ligne : Username
- 5<sup>e</sup> ligne: Mode
- 6<sup>e</sup> ligne: Espilon pour mode=1 ou ( $E_{ct1}$ ,  $E_{ct2}$ ) pour mode=2
- 7<sup>e</sup> ligne: B D Ep Ip Ntt
- 8<sup>e</sup> ligne: z(j) j=1, Ntt
- 9<sup>e</sup> ligne: Eti(j) j=1, Ntt
- 10<sup>e</sup> ligne: Pu(j) j=1, Ntt
- 11<sup>e</sup> ligne: ICONDP Ninc
- 12<sup>e</sup> ligne: H Mo
- 13<sup>e</sup> ligne: BC(1) BC(2)

### Répéter les lignes 12 et 13 Ninc fois

#### Nomenclature:

- **Title** : titre du projet
- **Location** : localisation du site du pieu
- **Date** : date de session de calcul du pieu
- **Username** : Nom de l'utilisateur de SPULL
- **Mode** : Mode= 1 pour un contrôle de convergence par différences relatives  
Mode= 2 pour un contrôle de convergence par différences absolues
- **Epsilon**: Ecart relatif maximum (par rapport à 1) pour les déplacements et les réactions
- **$E_{ct1}$ ,  $E_{ct2}$**  :Ecart absolu maximum pour les déplacements et les réactions respectivement
- **B** : Diamètre ou dimension perpendiculaire à l'effort en tête du pieu
- **D** : Fiche du pieu dans le sol
- **$E_p$** : Module d'élasticité du pieu
- **$I_p$** : Moment d'inertie par rapport à l'axe horizontal perpendiculaire à l'effort en tête
- **$N_{tt}$** : Nombre de tranches du pieu à partir de la surface du sol.
- **$E_{ti}$** : Module de réaction initial du sol
- **$P_u$** : Réaction latérale limite du sol à une profondeur donnée.
- **H**: Effort latéral appliqué en tête du pieu
- **Mo**: Moment de flexion appliqué en tête du pieu
- **ICONDP**: paramètre de définition des conditions aux limites en pointe du pieu.

ICONDP=1 moment $M_p$ et effort tranchant $T_p$	(BC(1)= $T_p$ , BC(2)= $M_p$ )
ICONDP=2 moment $M_p$ et déplacement $Y_p$	(BC(1)= $M_p$ , BC(2)= $Y_p$ )
ICONDP=3 moment $M_p$ et rotation $Y'_p$	(BC(1)= $M_p$ , BC(2)= $Y'_p$ )
ICONDP=4 effort tranchant $T_p$ et déplacement $Y_p$	(BC(1)= $T_p$ , BC(2)= $Y_p$ )
ICONDP=5 effort tranchant $T_p$ et rotation $Y'_p$	(BC(1)= $T_p$ , BC(2)= $Y'_p$ )
ICONDP=6 Déplacement $Y_p$ et rotation $Y'_p$	(BC(1)= $Y_p$ , BC(2)= $Y'_p$ )

- **Ninc** : Nombre de chargements en tête du pieu.