

DEFORMEE D'UN PIEU SOLLICITE LATERALEMENT POUR LE CAS D'UN BICOUCHE ET D'UNE PLASTIFICATION

DEFORMATION OF A PILE UNDER LATERAL LOADING FOR A TWO-LAYER MODEL AND A YIELDING MODEL

Olivier DAVID¹, Mathieu FEREGOTTO²

¹ Fondouest, Granville, France

² Cerema Méditerranée, Aix-en-Provence, France

RÉSUMÉ – Le Cerema publiera prochainement un guide méthodologique consacré aux micropieux. Il traitera de l'exécution et de certaines problématiques de dimensionnement. Dans ce cadre, des développements théoriques ont été réalisés sur le sujet des calculs de la déformée des micropieux sollicités horizontalement en tête. Deux cas courants et non traités par les formules usuelles sont présentés : modèle bi-couche et plastification.

ABSTRACT – Theoretical developments on pile deformations under lateral loading have been realised as part of the future Cerema's guideline on micropiles. Two typical situations are presented : two-layer model and the coverage of soil yielding.

1. Introduction

Le Cerema publiera prochainement un guide méthodologique consacré aux micropieux. Ce guide traitera de l'ensemble des sujets qui concernent l'exécution (foration, injection et scellement, matériaux et armatures, essais de chargement, etc.) mais consacrera aussi le chapitre intitulé « Comportement et justification des micropieux » à certaines problématiques de dimensionnement. Ce chapitre apportera aux concepteurs des éléments méthodologiques et des recommandations sur ces sujets.

Nous présentons ici les développements théoriques d'un de ces sujets, qui concerne les calculs de la déformation des pieux sollicités horizontalement en tête. Ces développements aboutissent à différentes formulations analytiques, rassemblées dans des matrices de souplesse. Ce type de formulation présente l'intérêt d'être directement applicable à tous les cas respectant le domaine d'application concerné.

Dans un premier temps, la présentation de la méthode de calcul sur le cas simple d'un modèle monocouche avec un module de réaction constant est l'occasion de retrouver les formules usuelles rencontrées dans la littérature (par exemple le Cahier Technique n°38 de l'AFPS – Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal). Nous développons ensuite deux cas plus généraux et couramment rencontrés dans la pratique : modèle de terrain bi-couche, et plastification d'une partie du terrain.

2. Hypothèses et méthodes de calcul

Le pieu est considéré comme une poutre caractérisée par un comportement élastique linéaire et un produit d'inertie, noté EI , constant. Il est sollicité en tête par un effort horizontal noté « H_d » et un moment noté « M_d ». Dans ce contexte, on peut considérer un pieu comme « infiniment long » (efforts et déplacements négligeables en pointe) lorsque

le rapport entre la longueur totale du pieu et sa longueur de transfert $L/l_0 > 3$, soit $L > 6B$ à $10B$, condition généralement vérifiée pour les micropieux.

L'interaction sol-structure est modélisée par une loi de réaction frontale « p-y » basée sur un modèle de Winkler. En notant « r » la réaction frontale et « K » le module de mobilisation de la pression frontale (ou module de réaction), la phase élastique s'écrit :

$$r(z) = Ky(z) \quad (1)$$

La déformation du pieu s'obtient par résolution de l'équation d'équilibre d'une poutre sur fondation élastique :

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} = r(z) \quad (2)$$

La solution générale de cette équation différentielle est donnée par :

$$y(z) = e^{-\frac{z}{l_0}} \left(C_1 \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) + C_2 \cos\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) + e^{\frac{z}{l_0}} \left(C_3 \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) + C_4 \cos\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \quad (3)$$

où $l_0 = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K}}$ est la longueur de transfert, et les constantes C_i sont données par les conditions aux limites.

Pour le cas simple d'un modèle de terrain monocouche avec un module de réaction constant, la résolution est simplifiée en envisageant la possibilité d'un pieu infiniment long, qui implique $C_3 = C_4 = 0$. On obtient :

$$y(z) = \frac{2}{l_0^2 K} e^{-\frac{z}{l_0}} \left(H_d l_0 \cos\left(\frac{z}{l_0}\right) + M_d \left(\cos\left(\frac{z}{l_0}\right) - \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \right) \quad (4)$$

$$\frac{dy}{dz} = -\frac{2}{l_0^3 K} e^{-\frac{z}{l_0}} \left(2 M_d \cos\left(\frac{z}{l_0}\right) + H_d l_0 \left(\cos\left(\frac{z}{l_0}\right) + \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \right) \quad (5)$$

$$M(z) = EI \cdot \frac{d^2 y}{dz^2} = e^{-\frac{z}{l_0}} \left(H_d l_0 \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) + M_d \left(\cos\left(\frac{z}{l_0}\right) + \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \right) \quad (6)$$

$$T(z) = \frac{dM}{dz} = e^{-\frac{z}{l_0}} \left(H_d \left(\cos\left(\frac{z}{l_0}\right) - \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) - 2 \cdot \frac{M_d}{l_0} \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \quad (7)$$

Ces formulations permettent de retrouver les matrices de souplesse généralement données dans la littérature. Elles sont cependant très limitées dans la pratique puisqu'elles supposent d'une part un module de réaction constant, et d'autre part l'absence de plastification.

3. Modèle bicouche avec modules de réaction constants sur chaque couche

L'hypothèse monocouche homogène est évidemment très restrictive, notamment si l'on applique la réduction du module de réaction en surface qui est préconisée par la norme NF P94-262 ($K' = 0,5K$ en statique, et $K' = 0,7K$ en sismique, sur une hauteur de $2B$ à $4B$ en fonction de la nature du sol). Nous proposons donc ici la résolution du problème pour un modèle bicouche.

3.1. Résolution

L'écriture de la solution générale (3) pour chacune des deux couches conduit à définir, pour un pieu infiniment long, un système de six équations à six inconnues.

Les notations suivantes sont adoptées pour simplifier l'écriture :

$$\begin{aligned} l_0 &= \sqrt[4]{\frac{4.EI}{K}} & ; & \quad a = \sqrt[4]{\frac{K'}{K}} \\ \lambda_H &= \frac{H_d.l_0^3}{2EI a^3} = \frac{2.H_d}{l_0 K a^3} & ; & \quad \lambda_M = \frac{M_d.l_0^2}{2EI a^2} = \frac{2.M_d}{l_0^2 K a^2} \\ c &= \cos\left(\frac{z_c}{l_0}\right) & ; & \quad s = \sin\left(\frac{z_c}{l_0}\right) \\ c' &= \cos\left(a\frac{z_c}{l_0}\right) & ; & \quad s' = \sin\left(a\frac{z_c}{l_0}\right) \end{aligned}$$

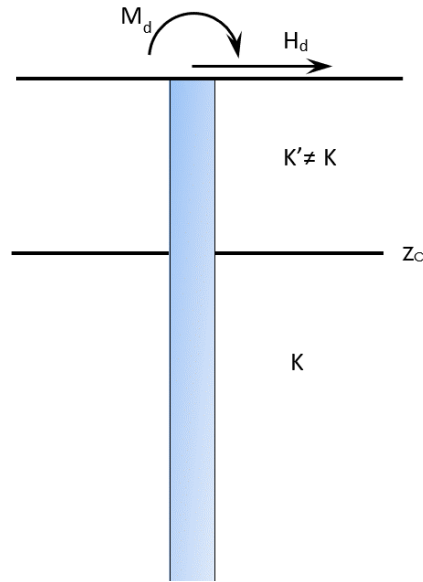


Figure 1. Schéma et notation pour le modèle bicouche avec module de réaction constants

Cela donne, dans la première couche ($z \leq z_c$) :

$$y(z) = e^{-a\frac{z}{l_0}} \left(C_1 \cdot \sin\left(a\frac{z}{l_0}\right) + C_2 \cdot \cos\left(a\frac{z}{l_0}\right) \right) + e^{a\frac{z}{l_0}} \left(C_3 \cdot \sin\left(a\frac{z}{l_0}\right) + C_4 \cdot \cos\left(a\frac{z}{l_0}\right) \right) \quad (8)$$

$$\frac{dy}{dz} = \frac{a}{l_0} \left[e^{-a\frac{z}{l_0}} \left(-(C_1 + C_2) \cdot \sin\left(a\frac{z}{l_0}\right) + (C_1 - C_2) \cdot \cos\left(a\frac{z}{l_0}\right) \right) + e^{a\frac{z}{l_0}} \left((C_3 - C_4) \cdot \sin\left(a\frac{z}{l_0}\right) + C_3 + C_4 \cdot \cos\left(a\frac{z}{l_0}\right) \right) \right] \quad (9)$$

$$M(z) = \frac{2EI.a^2}{l_0^2} \left[e^{-a\frac{z}{l_0}} \left(C_2 \cdot \sin\left(a\frac{z}{l_0}\right) - C_1 \cdot \cos\left(a\frac{z}{l_0}\right) \right) + e^{a\frac{z}{l_0}} \left(-C_4 \cdot \sin\left(a\frac{z}{l_0}\right) + C_3 \cdot \cos\left(a\frac{z}{l_0}\right) \right) \right] \quad (10)$$

$$T(z) = \frac{2EI.a^3}{l_0^3} \left[e^{-a\frac{z}{l_0}} \left((C_1 - C_2) \cdot \sin\left(a\frac{z}{l_0}\right) + (C_1 + C_2) \cdot \cos\left(a\frac{z}{l_0}\right) \right) + e^{a\frac{z}{l_0}} \left((C_3 - C_4) \cdot \sin\left(a\frac{z}{l_0}\right) + C_3 - C_4 \cdot \cos\left(a\frac{z}{l_0}\right) \right) \right] \quad (11)$$

Pour la seconde couche ($z \geq z_c$) :

$$y(z) = e^{-\frac{z}{l_0}} \left(C_5 \cdot \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) + C_6 \cdot \cos\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \quad (12)$$

$$\frac{dy}{dz} = \frac{1}{l_0} e^{-\frac{z}{l_0}} \left(-(C_5 + C_6) \cdot \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) + (C_5 - C_6) \cdot \cos\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \quad (13)$$

$$M(z) = \frac{2EI}{l_0^2} e^{-\frac{z}{l_0}} \left(C_6 \cdot \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) - C_5 \cdot \cos\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \quad (14)$$

$$T(z) = \frac{2EI}{l_0^3} e^{-\frac{z}{l_0}} \left((C_5 - C_6) \cdot \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) + (C_5 + C_6) \cdot \cos\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \quad (15)$$

La résolution de ce système à l'aide des conditions en tête Hd et Md aboutit aux expressions suivantes pour les six inconnues Ci :

$$C_1 = \frac{\mu_1 \lambda_H - (\mu_2 + \mu_3) \lambda_M}{\mu_3 + \mu_4}$$

$$C_2 = \frac{(\mu_5 + \mu_3) \lambda_H + (\mu_2 - 2\mu_1 + \mu_3) \lambda_M}{\mu_3 + \mu_4}$$

$$C_3 = C_1 + \lambda_M$$

$$C_4 = C_1 + C_2 + C_3 - \lambda_H$$

$$C_5 = e^{(1-a)\frac{z_c}{l_0}} [C_1 \cdot (a^2 c \cdot c' + s \cdot s') - C_2 \cdot (a^2 c \cdot s' - s \cdot c')] \\ + e^{(1+a)\frac{z_c}{l_0}} [C_3 \cdot (-a^2 c \cdot c' + s \cdot s') + C_4 \cdot (a^2 c \cdot s' + s \cdot c')]$$

$$C_6 = e^{(1-a)\frac{z_c}{l_0}} [C_1 \cdot (-a^2 s \cdot c' + c \cdot s') + C_2 \cdot (a^2 s \cdot s' + c \cdot c')] \\ + e^{(1+a)\frac{z_c}{l_0}} [C_3 \cdot (a^2 s \cdot c' + c \cdot s') - C_4 \cdot (a^2 s \cdot s' - c \cdot c')]$$

$$\mu_1 = (1 + a^2) + (1 - a^2) \cdot \cos\left(2a \frac{z_c}{l_0}\right) - 2a \cdot \sin\left(2a \frac{z_c}{l_0}\right)$$

$$\mu_2 = 2(1 + a^2) + (1 + 2a - a^2) \cdot \cos\left(2a \frac{z_c}{l_0}\right) + (1 - 2a - a^2) \cdot \sin\left(2a \frac{z_c}{l_0}\right)$$

$$\mu_3 = e^{2a\frac{z_c}{l_0}} \left[\frac{1+a}{1-a} (1+a^2) \right]$$

$$\mu_4 = e^{-2a\frac{z_c}{l_0}} \left[\frac{1-a}{1+a} (1+a^2) \right] + 2 \left[2(1+a^2) + (1-a^2) \cdot \cos\left(2a \frac{z_c}{l_0}\right) - 2a \cdot \sin\left(2a \frac{z_c}{l_0}\right) \right]$$

$$\mu_5 = (1 + a^2) - 2a \cdot \cos\left(2a \frac{z_c}{l_0}\right) - (1 - a^2) \cdot \sin\left(2a \frac{z_c}{l_0}\right)$$

3.6. Tableau récapitulatif et matrice de rigidité

Le tableau 1 rassemble les résultats établis pour les différents cas caractéristiques pour le modèle bicouche. Les expressions des fonctions F_i sont données par (16) à (25).

Tableau 1. Valeurs pour le modèle bi-couche

Condition en tête	Déformation en tête y	Moment maximum	Position z du moment max	Rotation en tête y' = -θ
Encastré (y' = 0)	$\frac{H_d}{l_0 K} F_6 \left\{ \leq \frac{H_d}{a^3 l_0 K} \right\}$	$-\frac{l_0 H_d}{2} \cdot F_5$	0	0
$M_d = 0$, $H_d \neq 0$	$\frac{2 \cdot H_d}{l_0 K} F_1 \left\{ \leq \frac{2 \cdot H_d}{a^3 l_0 K} \right\}$	$0,32 \cdot l_0 H_d F_3$ $\left\{ \leq 0,32 \cdot l_0 H_d \left[1 + \frac{\sqrt{2}}{2} (1-a) \right] \right\}$	$0,8 \cdot l_0 \leq z$ $\leq \frac{l_0}{a} \cdot \text{atg}\left(\frac{1}{a}\right)$	$-\frac{l_0^2 \cdot H_d}{2EI} F_2$
$M_d \neq 0$, $H_d = 0$	$\frac{2 \cdot M_d}{l_0^2 K} F_2 \left\{ \leq \frac{2 \cdot M_d}{a^2 l_0 K} \right\}$	M_d	0	$-\frac{l_0 \cdot M_d}{EI} F_4$
$M_d \neq 0$, $H_d \neq 0$	$F_1 \frac{2 \cdot H_d}{l_0 K} + F_2 \frac{2 \cdot M_d}{l_0^2 K}$			$-F_2 \frac{l_0^2 \cdot H_d}{2EI} - F_4 \frac{l_0 \cdot M_d}{EI}$

Les termes de la matrice de rigidité sont donnés par :

$$\begin{pmatrix} H \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{HH} & K_{HM} \\ K_{HM} & K_{MM} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ \theta \end{pmatrix}$$

$$K_{HH} = l_0 K \frac{F_4}{2F_1 F_4 - F_2^2} = \frac{l_0 K}{F_6} \quad ; \quad K_{MM} = \frac{l_0^3 K}{2} \frac{F_1}{2F_1 F_4 - F_2^2} \quad ; \quad K_{HM} = -\frac{l_0^2 K}{2} \frac{F_2}{2F_1 F_4 - F_2^2}$$

Expressions exactes des fonctions F_1 à F_6 :

$$F_1 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right) = \frac{1}{a^3} \left(1 + 2 \frac{\mu_1 + \mu_5 - \mu_4}{\mu_3 + \mu_4} \right) \quad (16)$$

$$F_2 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right) = \frac{1}{a^2} \left(1 - 4 \frac{\mu_1}{\mu_3 + \mu_4} \right) \quad (17)$$

$$F_4 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right) = \frac{1}{a} \frac{2\mu_2 + \mu_3 - \mu_4}{\mu_3 + \mu_4} \quad (18)$$

$$F_5 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right) = \frac{1}{a} \cdot \frac{(-4 \cdot \mu_1 + \mu_3 + \mu_4)}{2 \cdot \mu_2 + \mu_3 - \mu_4} = \frac{F_2 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right)}{F_4 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right)} \quad (19)$$

$$F_6 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right) = 2 \cdot F_1 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right) - F_2 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right) F_5 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right) = \frac{2 \cdot F_1 F_4 - F_2^2}{F_4} \quad (20)$$

Valeurs approchées des fonctions F_1 à F_6 pour $\frac{K'}{K} \in [0,5 ; 1]$ (intervalle correspondant à la prise en compte des effets de surface) :

$$F_1 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right) \approx \frac{1}{a^3} - \left(\frac{1}{a^3} - 1 \right) e^{-2\frac{z_c}{l_0}} \quad (21)$$

$$F_2 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right) \approx \frac{1}{a^2} - \left(\frac{1}{a^2} - 1 \right) e^{-4a\frac{z_c}{l_0}} \quad (22)$$

$$F_3 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right) \approx \frac{1}{a} \left(1 - e^{-4\frac{z_c}{l_0}} \right) + \left(1 + 25 \cdot (1-a) \left(\frac{z_c}{l_0} \right)^2 \right) e^{-4\frac{z_c}{l_0}} \quad (23)$$

$$F_4 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right) \approx \frac{1}{a^{0,9}} - \left(\frac{1}{a^{0,9}} - 1 \right) e^{-4a\frac{z_c}{l_0}} \quad (24)$$

$$F_6 \left(a, \frac{z_c}{l_0} \right) \approx \frac{1}{a^3} - \left(\frac{1}{a^3} - 1 \right) \left(2 \cdot e^{-2\frac{z_c}{l_0}} - e^{-4a\frac{z_c}{l_0}} \right) \quad (25)$$

4. Modèle avec possibilité de plastification

Les calculs précédents sont valables à condition de vérifier que le palier plastique n'est jamais atteint. Nous donnons ici les solutions prenant en compte une zone plastifiée en surface sur une hauteur $h_p > 0$ à déterminer.

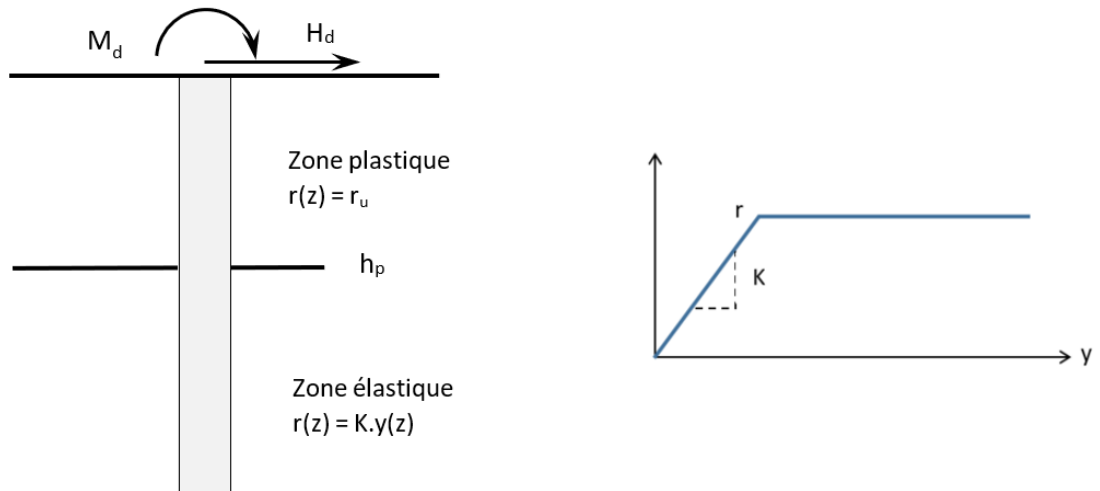


Figure 2. Zone de plastification et loi de réaction frontale

4.1. Résolution

La solution de l'équation différentielle (2) s'obtient dans la zone plastique par intégrations successives et l'équation (3) s'applique dans la zone élastique (avec $C_3 = C_4 = 0$ pour un pieu infiniment long) :

Pour $z \leq h_p$:

$$y(z) = \frac{1}{EI} \left(-r \frac{z^4}{24} + H_d \cdot \frac{z^3}{6} + M_d \cdot \frac{z^2}{2} \right) + y'_0 z + y_0 \quad (26)$$

$$\frac{dy}{dz} = \frac{1}{EI} \left(-r \frac{z^3}{6} + H_d \cdot \frac{z^2}{2} + M_d \cdot z \right) + y'_0 \quad (27)$$

$$M(z) = -r \frac{z^2}{2} + H_d \cdot z + M_d \quad (28)$$

$$T(z) = -rz + H_d \quad (29)$$

Pour $z > h_p$:

$$y(z) = e^{-\frac{z}{l_0}} \left(C_1 \cdot \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) + C_2 \cdot \cos\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \quad (30)$$

$$\frac{dy}{dz} = \frac{1}{l_0} e^{-\frac{z}{l_0}} \left(-(C_1 + C_2) \cdot \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) + (C_1 - C_2) \cdot \cos\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \quad (31)$$

$$M(z) = \frac{2EI}{l_0^2} e^{-\frac{z}{l_0}} \left(C_2 \cdot \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) - C_1 \cdot \cos\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \quad (32)$$

$$T(z) = \frac{2EI}{l_0^3} e^{-\frac{z}{l_0}} \left((C_1 - C_2) \cdot \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) + (C_1 + C_2) \cdot \cos\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \quad (33)$$

Avec :

$$l_0 = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot EI}{K}}$$

$$r = \text{signe}(H_d l_0 + M_d) \times r_u$$

$$\tau_H = \frac{H_d}{r \cdot l_0}$$

$$\tau_M = \frac{2M_d}{r \cdot l_0^2}$$

$$h_p = l_0 \left(\tau_H - 1 + \sqrt{\tau_H^2 + \tau_M} \right)$$

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \frac{r}{K} \\ \lambda_2 &= \frac{r}{K} \left(-\left(\frac{h_p}{l_0}\right)^2 + 2 \cdot \tau_H \cdot \frac{h_p}{l_0} + \tau_M \right) \\ C_1 &= e^{\frac{h_p}{l_0}} \left(\lambda_1 \cdot \sin\left(\frac{h_p}{l_0}\right) - \lambda_2 \cdot \cos\left(\frac{h_p}{l_0}\right) \right) \\ C_2 &= e^{\frac{h_p}{l_0}} \left(\lambda_1 \cdot \cos\left(\frac{h_p}{l_0}\right) + \lambda_2 \cdot \sin\left(\frac{h_p}{l_0}\right) \right) \\ y'_0 &= -\frac{1}{l_0} (\lambda_1 + \lambda_2) + \frac{2r}{Kl_0} \left(\frac{1}{3} \left(\frac{h_p}{l_0}\right)^3 - \left(\frac{h_p}{l_0}\right)^2 \tau_H - \frac{h_p}{l_0} \tau_M \right) \\ y_0 &= \lambda_1 + \frac{h_p}{l_0} (\lambda_1 + \lambda_2) + \frac{r}{K} \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{h_p}{l_0}\right)^4 + \frac{4}{3} \left(\frac{h_p}{l_0}\right)^3 \tau_H + \left(\frac{h_p}{l_0}\right)^2 \tau_M \right)\end{aligned}\quad (34)$$

$$(35)$$

4.2. Tableau récapitulatif

Le 2 rassemble les résultats établis pour les différents cas caractéristiques pour le modèle avec plastification. Les expressions des fonctions F_i sont données par (36) à (39).

Tableau 2. Valeurs pour le modèle avec plastification

Condition en tête	Encasté ($y' = 0$)	Md = 0, Hd ≠ 0	Md ≠ 0, Hd = 0	Md ≠ 0, Hd ≠ 0
Condition de plastification	$\tau_H > 1$	$\tau_H > 0,5$	$\tau_M > 1$	$\tau_M > 1 - 2\tau_H$
Hauteur plastifiée	$l_0 \left(\tau_H - 1 + \sqrt{\frac{\tau_H^2}{4} + \tau_H - 2} \right)$	$h_p = l_0(2\tau_H - 1)$	$l_0(\sqrt{\tau_M} - 1)$	$l_0(\tau_H - 1 + \sqrt{\tau_H^2 + \tau_M})$
Déformation en tête	$\frac{H_d}{Kl_0} \cdot F_{11}(\tau_H)$	$\frac{2H_d}{Kl_0} \cdot F_7(\tau_H)$	$\frac{2M_d}{Kl_0^2} \cdot F_8(\tau_M)$	cf. (35)
Moment maximum	$\sim -\frac{l_0 H_d}{2} F_{10}(\tau_H)$	$\sim 0,35 l_0 H_d$ pour $\tau_H \leq 0,7$ $\sim l_0 H_d 0,5 \cdot \tau_H$ pour $\tau_H > 0,7$	M_d	
Position z du moment max	0	$\sim 0,8 l_0$ pour $\tau_H \leq 0,8$ $\sim \tau_H l_0$ pour $\tau_H > 0,8$.	0	
Rotation en tête	0		$-\frac{M_d l_0}{EI} \cdot F_9(\tau_M)$	cf. (34)

Expressions des fonctions F_7 à F_{10} :

$$F_7(\tau_H) = \frac{16 \tau_H^4 + 4 \tau_H + 3}{12 \tau_H} \quad (36)$$

$$F_8(\tau_M) = \frac{1 + \tau_M^2}{2 \cdot \tau_M} \quad (37)$$

$$F_9(\tau_M) = \frac{1 + 2 \cdot \tau_M^{3/2}}{3 \cdot \tau_M} \quad (38)$$

$$F_{10}(\tau_H) = \frac{(3 \cdot \tau_H + \tau_H^{-3})}{4} \quad (39)$$

5. Conclusions

Les résultats formels présentés ici sont destinés à élargir les champs d'application des formules classiques, en traitant les cas du modèle bi-couche (notamment pour la prise en compte d'une réduction du module en surface) et de la prise en compte de la plastification du sol.

Ils permettent de déterminer rapidement les valeurs des principales caractéristiques du pieu étudié : déformation et rotation en tête, moment maximum ainsi que sa position, hauteur de plastification.

Ces résultats et d'autres sont analysés dans le guide méthodologique sur les micropieux qui sera publié prochainement par le Cerema.

6. Références bibliographiques

- AFNOR (2013). Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes, Norme NF P94-262.
- AFPS (2017). Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal, Cahier technique n°38.
- Alem A., Gherbi M. (1998). Analyse pratique de pieux chargés latéralement dans un milieu pulvérulent, Actes des Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil 1998.
- Brûlé S., Cuir F. (2018). Pratique de l'interaction sol-structure sous séisme, AFNOR Editions, p73-78, 85-91.
- Cassan M. (1978). Essais in situ en mécanique des sols II, Eyrolles, pp 235-265
- Costet J., Sanglerat G. (1983). Cours pratique de mécanique des sols, vol2, Dunod, pp 247-256.
- Philipponnat G., Hubert B. (1997). Fondations et ouvrages en terre, Eyrolles, pp 419-426.
- Shakirev V., Magnan J.P., Ejaouani H., Chamou El Fihri O. (1997). Calcul des pieux courts rigides soumis à des forces horizontales, BLPC n°210.