



Manuel utilisateur – Partie C.5 – Notice technique du module GROUPIE+

Date	Révision	Etabli par	Commentaires
15/03/2021	Ind A	F. Cuira	Première émission

Table des matières

1. Préambule	3
2. Aspects théoriques.....	4
2.1. Notations et conventions.....	4
2.1.1. Définition de la semelle de liaison – repère global	4
2.1.2. Définition des pieux – repères locaux	4
2.1.3. Définition des couches de sol	5
2.2. Mise en équation	6
2.2.1. Modélisation du comportement d’un pieu « i »	6
2.2.2. Modélisation de l’interaction pieux/sol	7
2.2.3. Modélisation de l’interaction semelle/pieux	9
2.3. Résolution	9
2.4. Limites de validité	10
2.5. Mise en œuvre en mode « manuel ».....	10
3. Mise en œuvre pratique.....	11
3.1. Caractéristiques des pieux.....	11
3.1.1. Cas d’un pieu de section circulaire en béton.....	11
3.1.2. Cas d’une barrette de section rectangulaire en béton.....	11
3.1.3. Cas d’un pieu de section tubulaire en acier	11
3.1.4. Cas d’un pieu (ou micropieu) de section mixte	11
3.2. Lois d’interaction sol/pieux.....	12
3.2.1. Loi de réaction frontale « p–y ».....	12
3.2.2. Loi de réaction axiale « t–z »	14
3.2.3. Loi de réaction en pointe.....	15
3.3. Prise en compte d’un déplacement libre du sol $g(z)$	16
3.4. Traitement des effets de groupe	17
3.5. Traitement des effets de surface	18

1. Préambule

Le module Groupie+ permet le calcul d'une fondation sur groupe de pieux, barrettes ou micropieux. C'est un programme hybride qui profite de la puissance des formulations matricielles dérivées des éléments finis pour l'étude des problèmes d'interaction sol structure. Le processus de calcul est rendu totalement automatique pour faciliter la modélisation et minimiser le temps de calcul. Toutefois, la version « classique » basée sur le calcul manuel a été conservée.

Dans tous les cas, le problème tridimensionnel est scindé en deux parties : les pieux et le massif de sol encaissant. Les pieux, orientables dans l'espace, sont modélisés par des poutres élastiques caractérisées par leur rigidité axiale et celle en flexion, et discrétisées en éléments finis. L'interaction pieux/sol est modélisée par des lois de transfert non linéaires de type "p-y" et "t-z". Enfin, le chargement sur la semelle est défini par un torseur d'effort à six composantes.

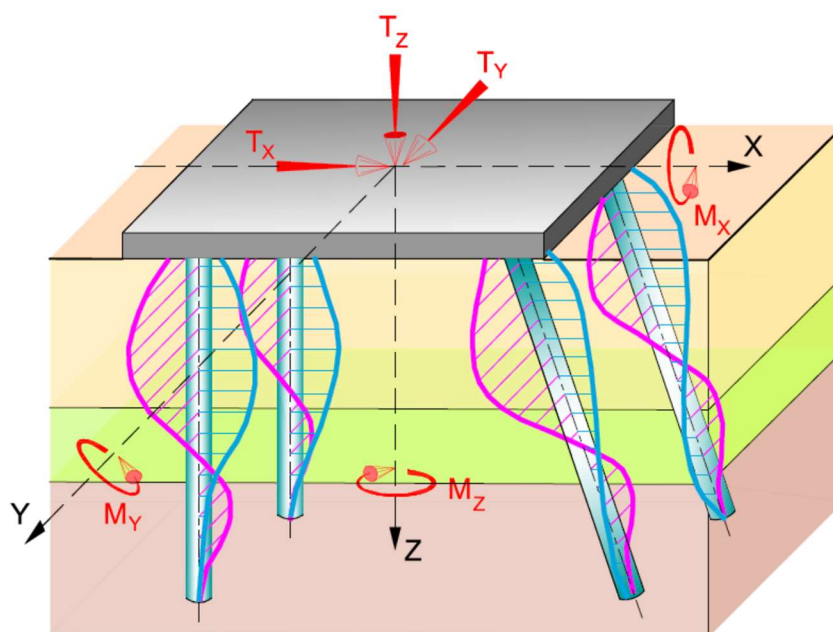


Figure 1 : Principe du modèle Groupie+

Deux modes de fonctionnement sont possibles :

- **Gestion manuelle du processus de calcul** (mode Groupie Manuel) : chaque pieu est à caractériser par une matrice de raideur équivalente en tête préalablement définie à l'aide des modules Taspie+ et Piecoef+. Le problème se réduit ainsi à l'équilibre de la semelle soumise au torseur des efforts extérieurs et aux réactions en tête des pieux. Les itérations à conduire, notamment dans le cas de la plastification de sol, sont à gérer manuellement par l'utilisateur pour chaque cas de chargement et chaque pieu.
- **Gestion automatique du calcul** (modes Groupie+ Automatique et Groupie+ Automatique Avancé) : les pieux sont discrétisés en éléments de poutre caractérisés par une rigidité axiale et un produit d'inertie dans chaque direction. Le sol, de comportement élastoplastique, est défini comme un multicouche quelconque offrant la possibilité d'introduire des pendages dans les deux directions. Le problème consiste à résoudre l'équilibre global du groupe de pieux. Le processus de calcul est à la fois autonome et automatique.

2. Aspects théoriques

2.1. Notations et conventions

2.1.1. Définition de la semelle de liaison – repère global

Le repère global $(O, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ est un repère orthonormé direct dont l'axe $(O, \vec{Z})$ est vertical descendant. Le torseur des efforts extérieurs appliqués sur la semelle, ainsi que celui des déplacements résultants sont exprimés au point O selon les conventions de la mécanique. Les forces et les déplacements sont positifs s'ils sont orientés dans le même sens des axes du repère global. Les moments et les rotations sont positifs si leurs vecteurs associés sont positifs au sens de la règle du tire-bouchon (voir figure suivante).

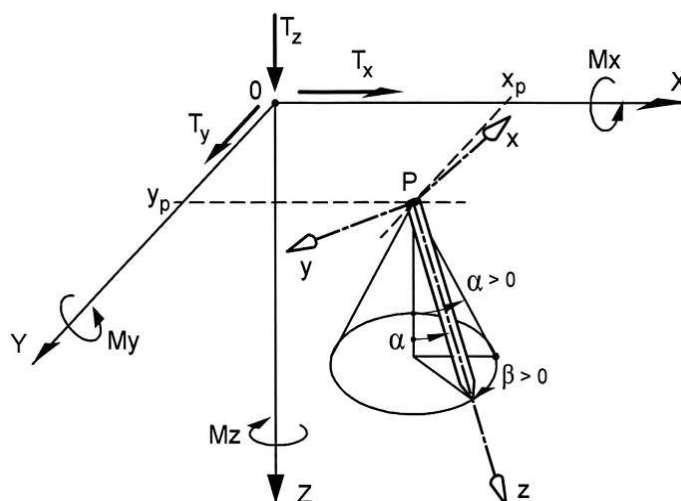


Figure 2 : Conventions de signe – repère global

2.1.2. Définition des pieux – repères locaux

On désigne par « n_p » le nombre total de pieux. Chaque pieu « i » est défini par les coordonnées de sa tête (X_p, Y_p, Z_p) et par deux angles α et β précisant son orientation dans le repère global (voir figure précédente). Le repère local qui lui est associé, noté $(P, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, est tel que l'axe $(P, \vec{y})$ reste toujours orthogonal à l'axe $(O, \vec{Z})$. Le torseur des efforts en tête de chaque pieu (résultat du calcul) est exprimé dans le repère local de celui-ci, tout en adoptant les conventions de signe particulières présentées dans la figure suivante.

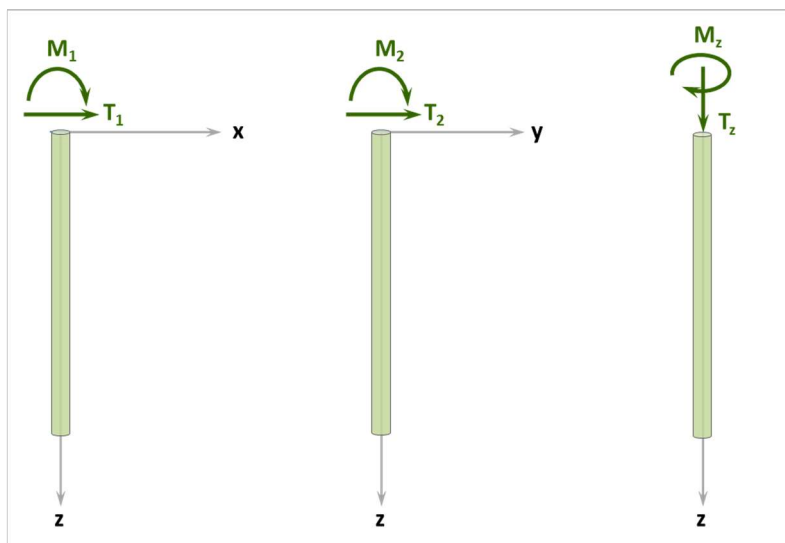


Figure 3 : conventions de signe – repère local

Un pieu est caractérisé par différents paramètres géométriques et mécaniques. Sa disposition et son orientation dans l'espace sont définies par les éléments suivants :

X_P	: abscisse de la tête du pieu dans le repère global ;
Y_P	: ordonnée de la tête du pieu dans le repère global ;
Z_P	: cote de la tête du pieu ;
L	: longueur du pieu ;
α	: angle existant entre la direction du pieu et la verticale
β	: angle défini par la rotation du pieu autour de l'axe vertical

Les caractéristiques mécaniques d'un pieu sont :

EI_x	: produit d'inertie du pieu dans la direction x ;
EI_y	: produit d'inertie du pieu dans la direction y ;
ES	: rigidité axiale du pieu ;
Γ	: raideur à la torsion équivalente en tête.

Liaison avec la semelle :

Liaison	: type de la liaison entre le pieu et la semelle (articulation ou encastrement).
---------	--

Dans le cas où les pieux ne sont pas libres en pointe, des raideurs complémentaires en translation latérale et en rotation peuvent être définies pour simuler les liaisons en pointe de chaque pieu.

2.1.3. Définition des couches de sol

Le sol de fondation est constitué d'une ou plusieurs couches de caractéristiques géométriques et mécaniques différentes. Les paramètres géométriques introduisent des contraintes sur le maillage des pieux. Ces dernières forcent la création de nœuds imposés au droit des points

d'intersection des pieux avec les interfaces de couches. Chaque couche de sol est caractérisée par les paramètres suivants :

$Cote_{base}$: cote de la base au droit de l'axe $(O, \vec{Z})$;

α_Y : angle que fait la base avec l'axe $(O, \vec{Y})$;

α_X : angle que fait la base avec l'axe $(O, \vec{X})$.

Les autres caractéristiques servent pour la définition des lois de réaction pieu-sol en tenant compte des dimensions des pieux (largeur de réaction, périmètre, section).

2.2. Mise en équation

2.2.1. Modélisation du comportement d'un pieu « i »

Chaque pieu est assimilé à une poutre de comportement élastique linéaire. On se place dans le cas de poutres de section homogène ce qui permet de dissocier le comportement en flexion de celui en traction/compression.

Le comportement en flexion composée de la poutre représentative d'un pieu « i » peut être décrit à l'aide du système d'équations suivant :

$$\begin{cases} ES^i \frac{d^2 u_z^i(z)}{dz^2} = q_z^i(z) - r_z^i(z) \\ EI_x^i \frac{d^4 u_x^i(z)}{dz^4} = q_x^i(z) - r_x^i(z) \\ EI_y^i \frac{d^4 u_y^i(z)}{dz^4} = q_y^i(z) - r_y^i(z) \end{cases}$$

Avec :

$u_k^i(z)$: déplacement du pieu « i » selon la direction « k » ($k = x, y$ ou z) ;

EI_k^i : produit d'inertie du pieu « i » dans la direction « k » ($k = x, y$) ;

ES^i : rigidité axiale du pieu « i » ;

$q_k^i(z)$: composante « k » de la densité de chargement linéique extérieur sur le pieu « i » ;

$r_k^i(z)$: composante « k » de la réaction du sol sur le pieu « i » ($k = x, y$ ou z).

La modélisation de ce système d'équations peut être menée numériquement en discrétisant le pieu en éléments finis de poutre. On utilise pour cela des éléments « classiques » à 2 nœuds et 5 degrés de liberté par nœud : un déplacement axial, deux déplacements latéraux, et deux rotations. En tout point, la rotation de la poutre coïncide avec la dérivée du champ de déplacement latéral (approximation de Bernoulli). Dans le cadre de cette discrétisation, l'équilibre du pieu se traduit par un système matriciel équivalent de taille $5(p_i+1) \times 5(p_i+1)$ où p_i désigne le nombre total d'éléments du pieu « i » :

$$\mathbf{K}_p^i \cdot \mathbf{u}^i = \mathbf{F}_{ext}^i - \mathbf{R}_s^i$$

Avec :

- $\mathbf{K}_p^i$: matrice de rigidité du pieu « i » constituée par assemblage des matrices de rigidité élémentaires ;
- $\mathbf{F}_{\text{ext}}^i$: vecteur chargement relatif aux charges latérales sur le pieu « i » autres que la réaction du sol ;
- $\mathbf{R}_s^i$: vecteur chargement relatif à la réaction du sol sur le pieu « i » ;
- $\mathbf{u}^i$: vecteur déplacement équivalent du pieu « i » constitué par les déplacements (u_x, u_y, u_z) et les rotations (θ_x, θ_y) en chaque nœud.

2.2.2. Modélisation de l'interaction pieux/sol

L'interaction des pieux avec le sol environnant peut être décrite par :

- Une réaction frontale à deux composantes (découplées), selon x et y ;
- Une réaction axiale (frottement) selon z ;
- Une réaction en pointe, limitée usuellement à sa composante axiale selon z.

La modélisation de chacune de ces composantes se base sur les principes des modèles « p-y » (composantes frontales) et « t-z » (composantes axiales). Ces modèles consistent à assimiler les réponses frontales et axiales du sol environnant à celles d'une distribution de ressorts juxtaposés élastoplastiques (voir figure suivante).

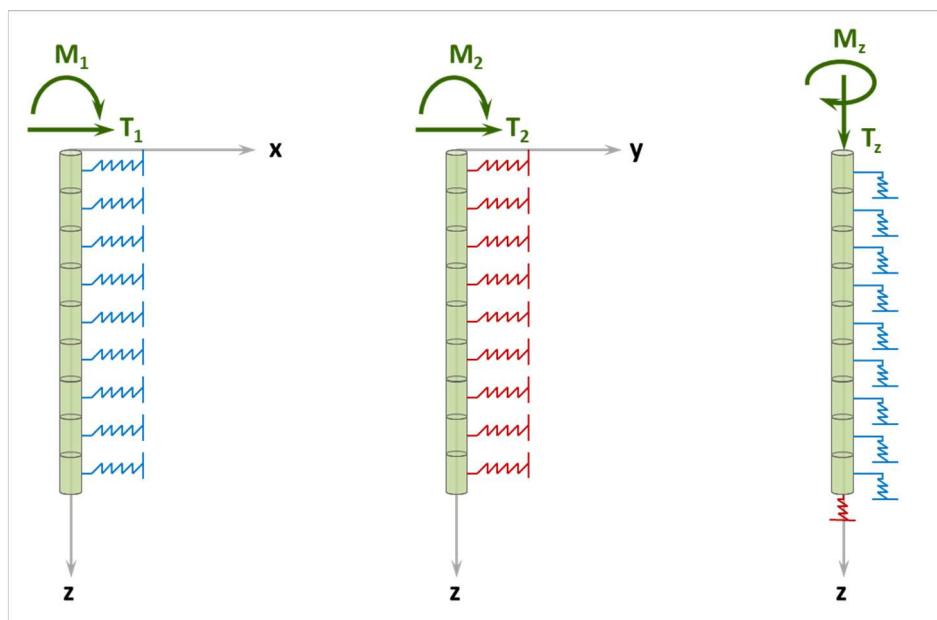


Figure 4 : décomposition de l'interaction sol/pieu

Chacune de ces distributions de ressorts est caractérisée par une loi de mobilisation à trois paliers reliant la réaction du sol (pour une composante donnée) au déplacement relatif du pieu (selon un axe donné) comme le montre la figure suivante. Le caractère relatif du déplacement apparaissant en abscisse permet notamment de traiter le cas des effets parasites (effets latéraux de type « g(z) » ou frottement négatif) se développant dans une ou plusieurs couches de sol.

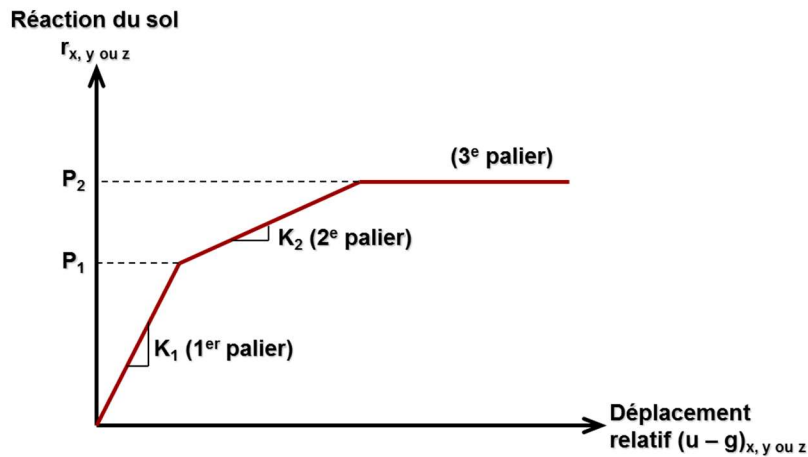


Figure 5 : loi d'interaction sol-pieux

Selon les notations de la figure ci-dessus, la réaction latérale du sol $r(z)$ s'exprime ainsi :

$$r = \alpha[u - g] + \beta$$

Avec :

- Pour le 1^{er} palier $\alpha = K_1$ et $\beta = 0$
- Pour le 2^e palier $\alpha = K_2$ et $\beta = P_1 \cdot \left(1 - \frac{K_2}{K_1}\right)$
- Pour le 3^e palier $\alpha = 0$ et $\beta = P_2$

Dans le cadre de la discrétisation éléments finis retenue pour le pieu « i », cette relation peut s'écrire matriciellement sous la forme suivante :

$$\mathbf{R}_s^i = \mathbf{K}_s^i \cdot (\mathbf{u}^i - \mathbf{g}^i) + \mathbf{c}_s^i$$

Où :

$\mathbf{K}_s^i$: matrice de rigidité du sol en contact avec le pieu « i » correspondant à la part élastique de la courbe de mobilisation dans chaque élément ;

$\mathbf{c}_s^i$: vecteur chargement équivalent correspondant à la part « plastique » de la réaction du sol en contact avec le pieu « i » ;

$\mathbf{g}^i$: vecteur déplacement équivalent correspondant au déplacement libre du sol en contact avec le pieu « i ».

La combinaison des équations précédentes conduit à la formulation globale du système traduisant la réponse du pieu « i » en interaction avec le sol environnant :

$$(\mathbf{K}_p^i + \mathbf{K}_s^i) \cdot \mathbf{u}^i = \mathbf{F}_{\text{ext}}^i + \mathbf{K}_s^i \cdot \mathbf{g}^i - \mathbf{c}_s^i$$

La gestion de la plastification du sol est conduite par un processus itératif durant lequel les termes $\mathbf{K}_s^i$ et $\mathbf{c}_s^i$ évoluent jusqu'à l'obtention d'une solution compatible, en tout point du pieu, et dans chaque direction, avec la loi de mobilisation de la réaction du sol.

2.2.3. Modélisation de l'interaction semelle/pieux

L'interaction entre la semelle et les pieux est décrite moyennant une condition de contact de type « encastrement » ou « articulation ». Dans le premier cas, on écrit l'égalité entre les déplacements et les rotations de la semelle et ceux des pieux en tête. Dans le second, seule l'égalité des déplacements est considérée.

Dans les deux cas, l'équilibre statique de la semelle peut s'écrire sous la forme :

$$\mathbf{K}_{\text{sem}} \cdot \mathbf{u}_{\text{pieux}}^{\text{tête}} = \mathbf{T}_{\text{ext}} - \mathbf{T}_{\text{pieux}}^{\text{tête}}$$

Avec :

$\mathbf{K}_{\text{sem}}$: matrice de rigidité de la semelle ;

$\mathbf{T}_{\text{ext}}$: vecteur représentant le torseur de chargement extérieur appliqué sur la semelle (donnée du problème) ;

$\mathbf{u}_{\text{pieux}}^{\text{tête}}$: vecteur représentant les déplacements et les rotations en tête des pieux. Ce vecteur est directement lié aux vecteurs déplacement $\mathbf{u}^i$ relatifs à chaque pieu ;

$\mathbf{T}_{\text{pieux}}^{\text{tête}}$: vecteur représentant les efforts et moments en tête des pieux. Celui-ci est directement lié aux vecteurs chargement extérieur $\mathbf{F}_{\text{ext}}^i$ relatifs à chaque pieu.

2.3. Résolution

La mise en œuvre du modèle repose sur la constitution et la résolution du système d'équations global régissant l'équilibre du système « semelle + pieux » en interaction avec le sol. Le moteur de calcul de Groupie+ assemble ainsi dans un même système matriciel, l'équation d'équilibre de la semelle (5) avec celles traduisant les équilibres locaux de chaque pieu (4). Les éléments de ce système peuvent être complétés par des conditions d'appui complémentaires introduites en un point quelconque d'un pieu donné sous la forme d'un appui élastique ponctuel. Le calcul étant non linéaire, la résolution est menée d'une manière itérative.

La résolution du système final permet d'obtenir les déplacements, rotations et réactions en tout point de chaque pieu, en particulier en tête. Connaissant les réactions, les efforts internes (T_x T_y T_z M_x M_y) sont calculés ensuite par intégration selon la formule générale suivante :

$$T_k(z) = \int_0^z [q_k(t) - r_k(t)] dt + T_k(0) \quad k = x, y \text{ ou } z$$

$$M_k(z) = \int_0^z T_k(t) dt + M_k(0) \quad k = x \text{ ou } y$$

Le modèle permet également de définir un système de raideur tangente équivalente au centre de la semelle, qui peut servir ensuite de paramètre d'entrée au modèle « structure ». Le système de raideurs en tête se compose d'une « matrice » de raideur 6 x 6 symétrique et d'un terme « constant » selon la formule générale suivante :

$$\begin{bmatrix} T_X \\ M_Y \\ T_Y \\ M_X \\ T_Z \\ M_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{u_X, u_X} & k_{u_X, \theta_Y} & k_{u_X, u_Y} & k_{u_X, \theta_X} & k_{u_X, u_Z} & k_{u_X, \theta_Z} \\ \cdot & k_{\theta_Y, \theta_Y} & k_{\theta_Y, u_Y} & k_{\theta_Y, \theta_X} & k_{\theta_Y, u_Z} & k_{\theta_Y, \theta_Z} \\ \cdot & \cdot & k_{u_Y, u_Y} & k_{u_Y, \theta_X} & k_{u_Y, u_Z} & k_{u_Y, \theta_Z} \\ \cdot & \cdot & \cdot & k_{\theta_X, \theta_X} & k_{\theta_X, u_Z} & k_{\theta_X, \theta_Z} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & k_{u_Z, u_Z} & k_{u_Z, \theta_Z} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & k_{\theta_Z, \theta_Z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_X \\ \theta_Y \\ u_Y \\ \theta_X \\ u_Z \\ \theta_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{0X} \\ M_{0Y} \\ T_{0Y} \\ M_{0X} \\ T_{0Z} \\ M_{0Z} \end{bmatrix}$$

2.4. Limites de validité

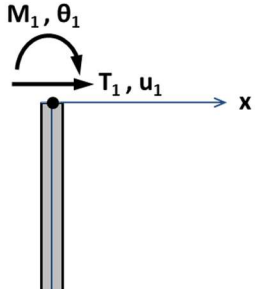
La formulation précédente est valable dans le cas de pieux de section homogène autorisant un découplage entre le comportement axial et celui en flexion. La validité du système considéré suppose également des pieux suffisamment élancés pour négliger l'influence des déformations dues à l'effort tranchant.

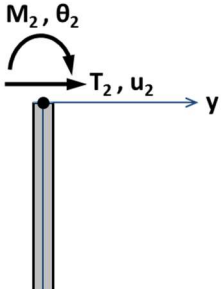
La validité du modèle général suppose par ailleurs une adaptation préalable des lois d'interaction pieu/sol afin de tenir compte de certains cas particuliers comme celui d'une fondation située à proximité d'un talus ou des zones de pieux proches de la surface. L'effet de groupe entre les pieux (interaction pieu/sol/pieu) est également de nature à nécessiter une dégradation préalable des paramètres de pente et/ou des paliers plastiques caractérisant la loi de mobilisation de la réaction du sol (voir §3.4 et §3.5).

2.5. Mise en œuvre en mode « manuel »

Le mode manuel de Groupie consiste à caractériser la réponse de chaque pieu par une matrice de raideur équivalente en tête issue d'un calcul préalable mené à l'aide des modules Taspie+ et Piecoef+ (cf. figure ci-après).

La formulation mathématique du système est alors adaptée en remplaçant l'équation (4) par celle représentée par les matrices de raideur en tête issue de Taspie+ et Piecoef+.

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ M_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_1 & -\rho_2 \\ -\rho_2 & \rho_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}$$


$$\begin{pmatrix} T_2 \\ M_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_4 & -\rho_5 \\ -\rho_5 & \rho_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix}$$


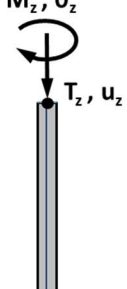
$$\begin{pmatrix} T_z \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu & 0 \\ 0 & \Gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_z \\ \theta_z \end{pmatrix}$$


Figure 6 : Matrice de raideur en tête des pieux – mode manuel

3. Mise en œuvre pratique

3.1. Caractéristiques des pieux

3.1.1. Cas d'un pieu de section circulaire en béton

Pour un pieu en béton de section circulaire pleine de diamètre B :

$$ES = E_b \frac{\pi B^2}{4} \quad \text{et} \quad EI = E_b \frac{\pi B^4}{64}$$

Où E_b désigne le module d'Young du béton que l'on prend égal à :

- $E_b = 10\,000$ MPa pour un chargement de longue durée ;
- $E_b = 30\,000$ MPa pour un chargement instantané.

3.1.2. Cas d'une barrette de section rectangulaire en béton

Pour une barrette de section rectangulaire pleine de longueur L et de largeur B :

$$ES = E_b BL \quad EI_L = E_b \frac{BL^3}{12} \quad EI_B = E_b \frac{LB^3}{12}$$

Où EI_L (resp. EI_B) désigne le produit d'inertie pour un chargement dans la direction de L (resp. B).

Le module d'Young du béton E_b est estimé selon les indications du §3.1.1.

3.1.3. Cas d'un pieu de section tubulaire en acier

Pour un pieu de section tubulaire en acier, de diamètre extérieur B_{ext} et de diamètre intérieur B_{int} :

$$ES = E_a \frac{\pi(B_{\text{ext}}^2 - B_{\text{int}}^2)}{4} \quad \text{et} \quad EI = E_a \frac{\pi(B_{\text{ext}}^4 - B_{\text{int}}^4)}{64}$$

Où E_a désigne le module d'Young de l'acier pris égal à 210 000 MPa.

3.1.4. Cas d'un pieu (ou micropieu) de section mixte

Pour un pieu ou micropieu de section mixte (profilé tubulaire, en I ou en H mis en œuvre dans un forage en béton ou en coulis de ciment), le produit d'inertie résultant est calculé à l'aide de la relation :

$$ES = E_a S_a + E_b (S_b - S_a) \quad \text{et} \quad EI = E_a I_a + E_b (I_b - I_a) \quad \text{avec} \quad I_b = \frac{\pi B^4}{64} \quad \text{et} \quad S_b = \frac{\pi B^2}{4}$$

Où E_a est le module d'Young de l'acier (= 210 000 MPa), I_a est l'inertie en flexion du profilé (dans la direction du chargement), S_a est son aire, B est le diamètre extérieur du forage, E_b le module d'Young du béton ou du coulis de ciment (que l'on peut négliger en première approximation).

3.2. Lois d'interaction sol/pieux

3.2.1. Loi de réaction frontale « p-y »

On considère les notations de la figure suivante.

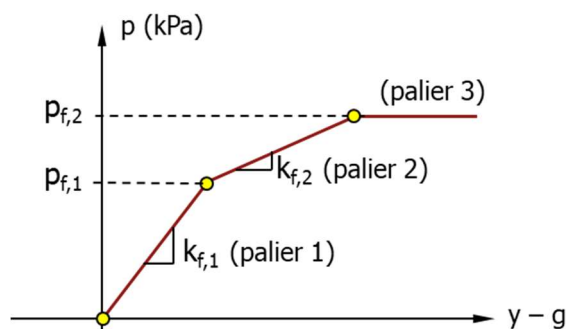


Figure 7 : Courbe de mobilisation à trois paliers – notations et conventions

3.2.1.1. Estimation à partir des propriétés pressiométriques (PMT)

Les coefficients de réaction $k_{f,i}$ peuvent être estimés à partir du modèle de Ménard selon la relation (NF P 94 262):

$$k_{f,i}B = \mu_i \frac{18\rho E_M}{4(2,65\rho)^\alpha + 3\alpha\rho} \quad \text{avec } \rho = \max\left(\frac{B}{B_0}; 1\right)$$

Où :

- E_M module pressiométrique de Ménard ;
- α coefficient rhéologique variant de 0,33 pour un sol sableux à 0,67 pour sol argileux;
- μ_i coefficient multiplicateur dépendant du type de sollicitation ;
- B_0 dimension de référence prise égale à 0,6 m ;

Les valeurs de μ_i ainsi que celles des paliers plastiques p_{f1} et p_{f2} sont données dans le Tableau 1.

Type de sollicitation	μ_1	μ_2	p_{f1}	p_{f2}
Sollicitations permanentes en tête dominantes	1	0	p_{fluage}	p_{fluage}
Sollicitations de courte durée en tête dominantes	2	0	p_{fluage}	p_{fluage}
Poussées transversales du sol dominantes	1	$\mu_1/2$	p_{fluage}	p_{limite}
Sollicitations accidentelles en tête dominantes	2	$\mu_1/2$	p_{fluage}	p_{limite}
Sollicitations sismiques dominantes	2 à 6	$\mu_1/2$	p_{fluage}	p_{limite}

Tableau 1 : Valeurs des coefficients μ_i et des paliers p_{fi} en fonction du type de sollicitation

Où p_{fluage} et p_{limite} sont respectivement la pression de fluage nette (p_f^*) et la pression limite nette (p_l^*) mesurées à l'essai pressiométrique. Il est important de noter que dans les situations où les poussées transversales du sol dominant, la réaction du sol est réputée être de caractère « actif » (le sol « pousse » la fondation). La sécurité est ainsi mieux assurée avec une loi de réaction allant jusqu'à la pression limite (Tableau 1).

3.2.1.2. Estimation à partir des propriétés pénétrométriques (CPT)

Les coefficients de réaction frontaux $k_{f,i}$ peuvent également être estimés à partir de la résistance de cône obtenue par un essai CPT selon la relation (NF P 94 262) :

$$k_{f,i}B = \mu_i \beta q_c$$

Où :

- q_c résistance de cône pénétrométrique ;
- μ_i coefficient multiplicateur dépendant du type de sollicitation (Tableau 1);
- β facteur de corrélation fonction du type de terrain (Tableau 2) ;
- B_0 dimension de référence prise égale à 0,6 m.

Les valeurs de μ_i ainsi que celles des paliers plastiques p_{f1} et p_{f2} sont données dans le Tableau 1. Dans le cas du pénétromètre statique, les paliers plastiques sont estimés par corrélation avec la résistance de cône selon la relation (NF P 94 262) :

$$p_{\text{fluage}} = \frac{q_c}{\beta_1} \quad \text{et} \quad p_{\text{limite}} = \frac{q_c}{\beta_2}$$

Où β_1 et β_2 sont des facteurs de corrélation donnés dans le tableau suivant (NF P 94 262):

	Terrain sableux	Terrain intermédiaire	Terrain argileux	Craie et Marnes
β	2	4	6	2
β_1	13,0	10,0	5,0	13,0
β_2	8,0	6,0	3.5	8,0

Tableau 2 : Valeurs des facteurs de corrélation β , β_1 et β_2

3.2.1.3. Estimation à partir des propriétés d'élasticité

Le coefficient de réaction du sol pour un pieu circulaire flexible peut également être caractérisé à partir du module de cisaillement du terrain G à l'aide de la relation suivante (Frank, 1982) :

$$k_f \approx \frac{2,4(1 + \nu)G}{B}$$

Avec ν le coefficient de Poisson du sol. Les paliers plastiques p_{limite} et p_{fluage} peuvent être reliés à la résistance au cisaillement non drainée c_u à l'aide de relation :

$$p_{\text{fluage}} \approx 4c_u \quad \text{et} \quad p_{\text{limite}} \approx 6c_u$$

3.2.2. Loi de réaction axiale « t-z »

On considère les notations de la figure suivante.

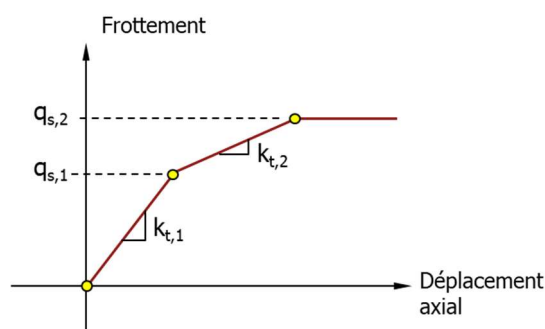


Figure 8 : Courbe de mobilisation à trois paliers – notations et conventions

3.2.2.1. Estimation à partir des propriétés pressiométriques (PMT)

On utilise les notations de la figure précédente. Les coefficients de réaction tangentiels $k_{t,i}$ peuvent être estimés à partir du modèle de Frank et Zhao selon la relation:

$$k_{t,i} = \mu_{t,i} \frac{\pi \cdot \eta \cdot E_M}{P_{eq}}$$

Où :

- E_M module pressiométrique de Ménard ;
- η facteur de corrélation égal à 0,8 pour un sol granulaire et 2,0 pour un sol fin ;
- $\mu_{t,i}$ coefficient multiplicateur dépendant du type de sollicitation ;
- P_{eq} périmètre de frottement.

Les valeurs de $\mu_{t,i}$ ainsi que celles des paliers plastiques q_{s1} et q_{s2} sont données dans le tableau ci-dessous.

Type de sollicitation	Statique	Sismique
$\mu_{t,1}$	1	1 à 3
$\mu_{t,2}$	$\frac{\mu_{t,1}}{5}$	$\frac{\mu_{t,1}}{5}$
q_{s1}	$\frac{q_{sl}}{2}$	$\frac{q_{sl}}{2}$
q_{s2}	q_{sl}	q_{sl}

Tableau 3 : Coefficients $\mu_{t,i}$ et paliers plastique $q_{s,i}$ pour la réaction axiale

Où q_{sl} est le frottement unitaire limite mobilisable au contact sol/pieu.

3.2.2.2. A partir des propriétés pénétrométriques (CPT)

On utilise les notations du paragraphe précédent. Les coefficients de réaction tangentiels $k_{t,i}$ peuvent être estimés à partir de la résistance de cône obtenue par un essai CPT selon la relation :

$$k_{t,i} = \mu_{t,i} \frac{\pi \beta_c q_c}{P_{eq}}$$

Où :

- q_c résistance de cône pénétrométrique ;
- β_c facteur de corrélation égal à 1 pour un sol granulaire et 5 pour un sol fin ;
- $\mu_{t,i}$ coefficient multiplicateur dépendant du type de sollicitation ;
- P_{eq} périmètre de frottement.

Les valeurs de $\mu_{t,i}$ ainsi que celles des paliers plastiques q_{s1} et q_{s2} sont spécifiées dans le paragraphe précédent.

3.2.2.3. A partir des propriétés d'élasticité

Le coefficient de réaction tangentiel peut également être caractérisé à partir du module de cisaillement du terrain G à l'aide de la relation suivante (Frank, 1982) :

$$k_t = \frac{2\pi G}{P_{eq} \left(1 + \ln \frac{\pi D}{P_{eq}} \right)}$$

3.2.3. Loi de réaction en pointe

On considère les notations de la figure suivante.

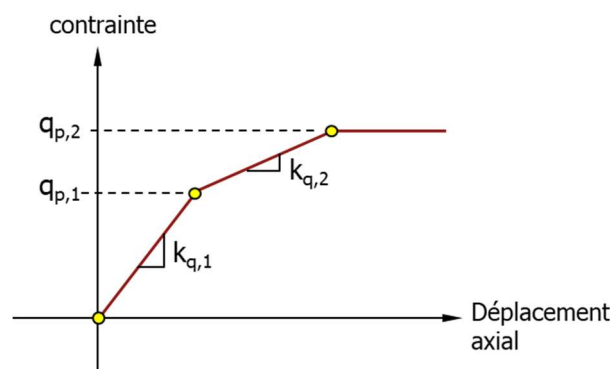


Figure 9 : Courbe de mobilisation à trois paliers – notations et conventions

3.2.3.1. Estimation à partir des propriétés pressiométriques (PMT)

On utilise les notations de la figure précédente. Les coefficients de réaction tangentiels $k_{q,i}$ peuvent être estimés à partir du modèle de Frank et Zhao selon la relation:

$$k_{q,i} = \mu_{q,i} \frac{\eta \cdot E_M}{B_{eq}}$$

Où :

- E_M module pressiométrique de Ménard ;
- η facteur de corrélation égal à 4,8 pour un sol granulaire et 11 pour un sol fin ;
- $\mu_{q,i}$ coefficient multiplicateur dépendant du type de sollicitation ;
- B_{eq} Diamètre équivalent de la pointe du pieu.

Les valeurs de $\mu_{q,i}$ ainsi que celles des paliers plastiques q_{p1} et q_{p2} sont données dans le tableau ci-dessous.

Type de sollicitation	Statique	Sismique
$\mu_{q,1}$	1	1 à 3
μ_{q2}	$\frac{\mu_{q,1}}{5}$	$\frac{\mu_{q,1}}{5}$
q_{s1}	$\frac{q_{pl}}{2}$	$\frac{q_{pl}}{2}$
q_{s2}	q_{pl}	q_{pl}

Tableau 4 : Coefficients $\mu_{t,i}$ et paliers plastique $q_{s,i}$ pour la réaction axiale

Où q_{pl} est la contrainte limite en pointe du pieu.

3.2.3.2. A partir des propriétés d'élasticité

Le coefficient de réaction tangentiel peut également être caractérisé à partir du module de cisaillement du terrain G à l'aide de la relation suivante (Frank, 1982) :

$$k_q = \frac{32G}{3\pi B_{eq}(1 - \nu)}$$

Où B_{eq} désigne le diamètre équivalent de la pointe.

3.3. Prise en compte d'un déplacement libre du sol $g(z)$

Groupe+ permet de traiter la situation d'un groupe de fondations profondes édifiées dans un terrain faisant l'objet d'un tassement et /ou d'un mouvement transversal, noté $g(z)$, d'origine statique (chargement en surface, excavation ou remblaiement à proximité de la fondation profonde) ou sismique (déformée cinématique liée à la mise en résonance du terrain par le passage des ondes sismiques). Ce déplacement peut être estimé préalablement au calcul GROUPIE+, par des modèles empiriques (§3.4.1 de la notice C4 de Foxta v4), analytiques (par exemple à partir de TASSELDO) ou numériques (par modélisation en éléments finis ou par différences finies en deux ou trois dimensions du terrain déformable).

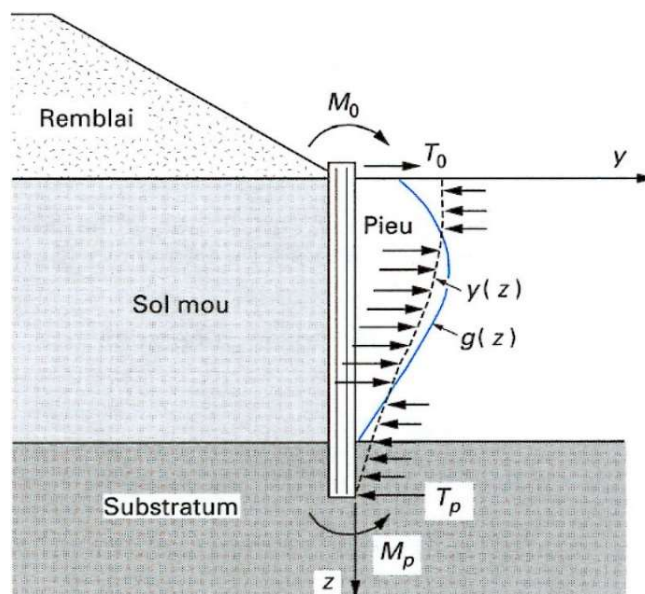


Figure 10 : Exemple d'une fondation profonde dans un sol soumis à un déplacement $g(z)$

3.4. Traitement des effets de groupe

Groupe+ permet de spécifier pour chaque pieu et pour chaque composante de la loi d'interaction avec le sol, des coefficients réducteurs visant à rendre compte des effets de groupe. La norme NF P 94-262 admet que les lois de réaction d'une fondation isolée s'appliquent pour les groupes de fondations dont l'entraxe « e » est supérieur à 3 B (B = diamètre de la fondation profonde). Si cette condition n'est pas remplie, des règles de réduction sont appliquées selon les indications de la figure suivante.

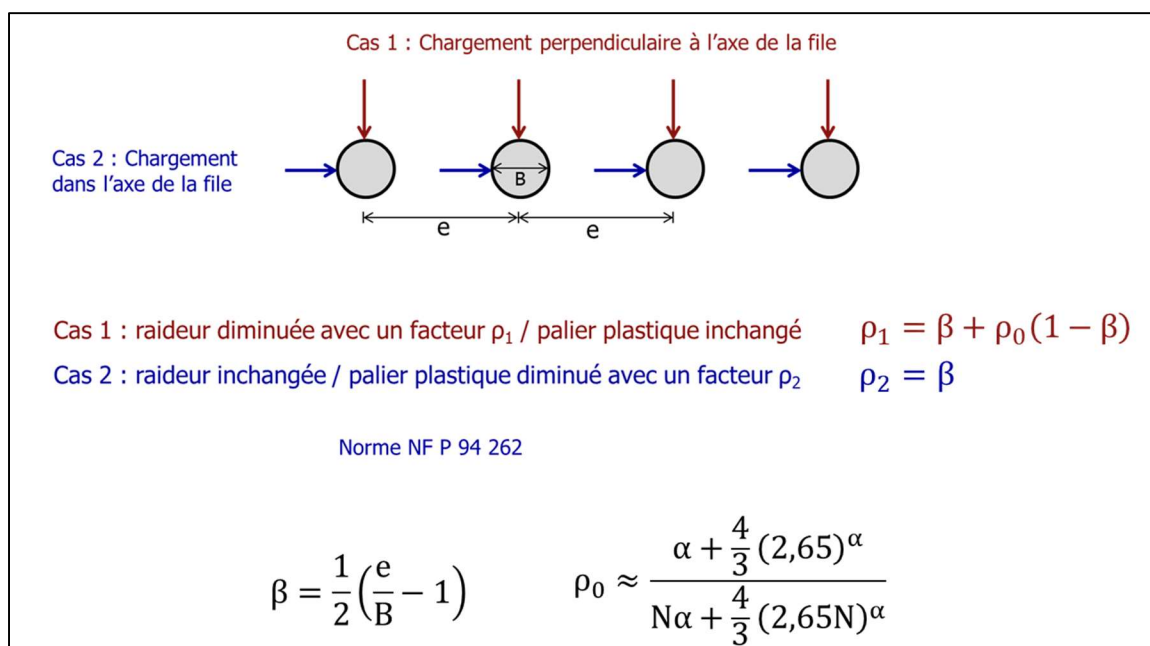


Figure 11 : Coefficient réducteurs par effet de groupe –NF P 94 262

3.5. Traitement des effets de surface

Quelque soit la méthode utilisée pour l'estimation du coefficient de réaction du sol, il convient de prendre en compte les effets de dégradation à proximité du niveau du TN. La norme NF P 94 262 propose d'appliquer cette dégradation de façon homothétique sur la courbe de mobilisation de la réaction du sol (sur les raideurs et paliers plastiques) selon les principes suivants :

- Coefficient de dégradation variant linéaire de 0,5 en surface à 1,0 à la base de la zone de dégradation ;
- La zone de dégradation s'étend sur une profondeur de $2 \times B$ pour un terrain cohérent à $4 \times B$ pour un terrain frottant, où B est le diamètre extérieur de la fondation profonde.

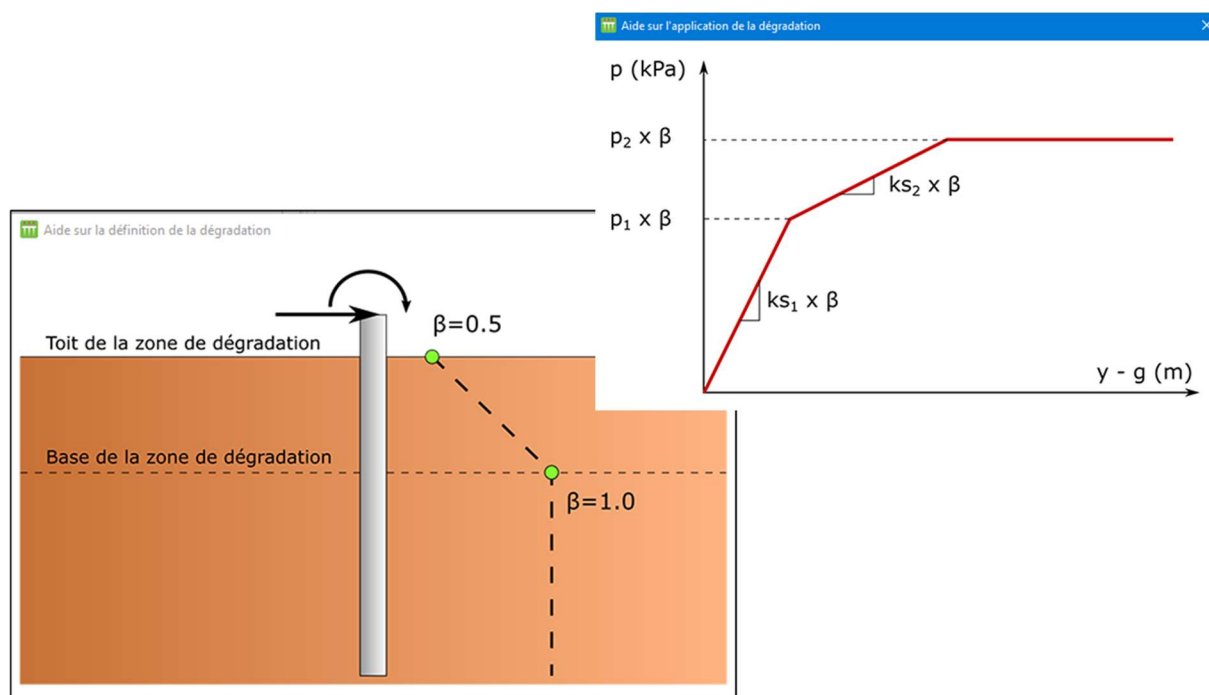


Figure 12 : Dégradation de la réaction du sol à proximité de la surface