



Foxta v5

Manuel utilisateur – Partie C.3 – Notice technique du module SEMIPROF
--

Date	Révision	Etabli par	Commentaires
28/09/2020	Ind A	F. Cuir	Première émission
07/03/2026	Ind B	F. Cuir	Passage en 3D

Table des matières

1.	Préambule	3
2.	Notations et conventions	4
3.	Principe de modélisation	5
3.1.	Modèle de Winkler généralisé	5
3.2.	Lois de réaction le long du fût	6
3.2.1.	Réaction frontale (pression – déplacement horizontal)	6
3.2.2.	Réaction tangentielle verticale (frottement – tassement)	7
3.2.3.	Réaction tangentielle horizontale (frottement – déplacement)	8
3.2.4.	Prise en compte des effets de dégradation à proximité de la surface	9
3.2.5.	Réduction de la réaction du sol sur une face donnée	9
3.3.	Lois de réaction à la base de la fondation	9
3.3.1.	Réaction verticale (normale à la base)	9
3.3.2.	Réaction tangentielle (horizontale) à la base de la fondation	10
3.4.	Mise en équation	11
3.4.1.	Equilibre statique	11
3.4.2.	Champ de déplacement	11
3.4.3.	Résolution	12
3.4.4.	Résultats	12
4.	Mise en œuvre pratique	13
4.1.	Choix des lois de réaction	13
4.2.	Loi de réaction frontale	13
4.2.1.	A partir des propriétés pressiométriques (PMT)	13
4.2.2.	A partir des propriétés pénétrométriques (CPT)	14
4.2.3.	A partir des propriétés d'élasticité	15
4.3.	Loi de réaction tangentielle le long du fût	15
4.3.1.	A partir des propriétés pressiométriques (PMT)	15
4.3.2.	A partir des propriétés pénétrométriques (CPT)	16
4.3.3.	A partir des propriétés d'élasticité	16
4.4.	Loi de réaction verticale à la base de la fondation	16
4.4.1.	A partir des propriétés pressiométriques (PMT)	16
4.4.2.	A partir d'un essai CPT	17
4.4.3.	A partir des propriétés d'élasticité	18
4.5.	Loi de réaction tangentielle à la base de la fondation	18
4.6.	Descente de charge	18
4.7.	Justifications à mener	19
4.7.1.	Calcul aux ELS	19
4.7.2.	Calcul aux ELU	19

1. Préambule

Le module SEMIPROF est destiné à la justification géotechnique d'une fondation semi-profonde infiniment rigide à l'aide d'un modèle 3D en déplacements (usuellement appelé modèle de « Cassan »), selon les principes de l'annexe P de la norme NF P 94 261. Le concept de fondation semi-profonde tel que défini dans la norme NF P 94 261 s'applique aux massifs de fondation dont la base est située à une profondeur D comprise entre 2,5 et 5,0 fois la largeur d'assise B . Pour des profondeurs d'encastrement situées en dehors de l'intervalle $[2,5B - 5,0B]$, il convient d'appliquer des modèles adaptés :

- aux fondations superficielles pour $D < 2,5 B$ (cf. module FONDSUP) ;
- aux fondations profondes pour $D > 5B$ (cf. modules FONDPROF, TASPIE et PIECOEF).

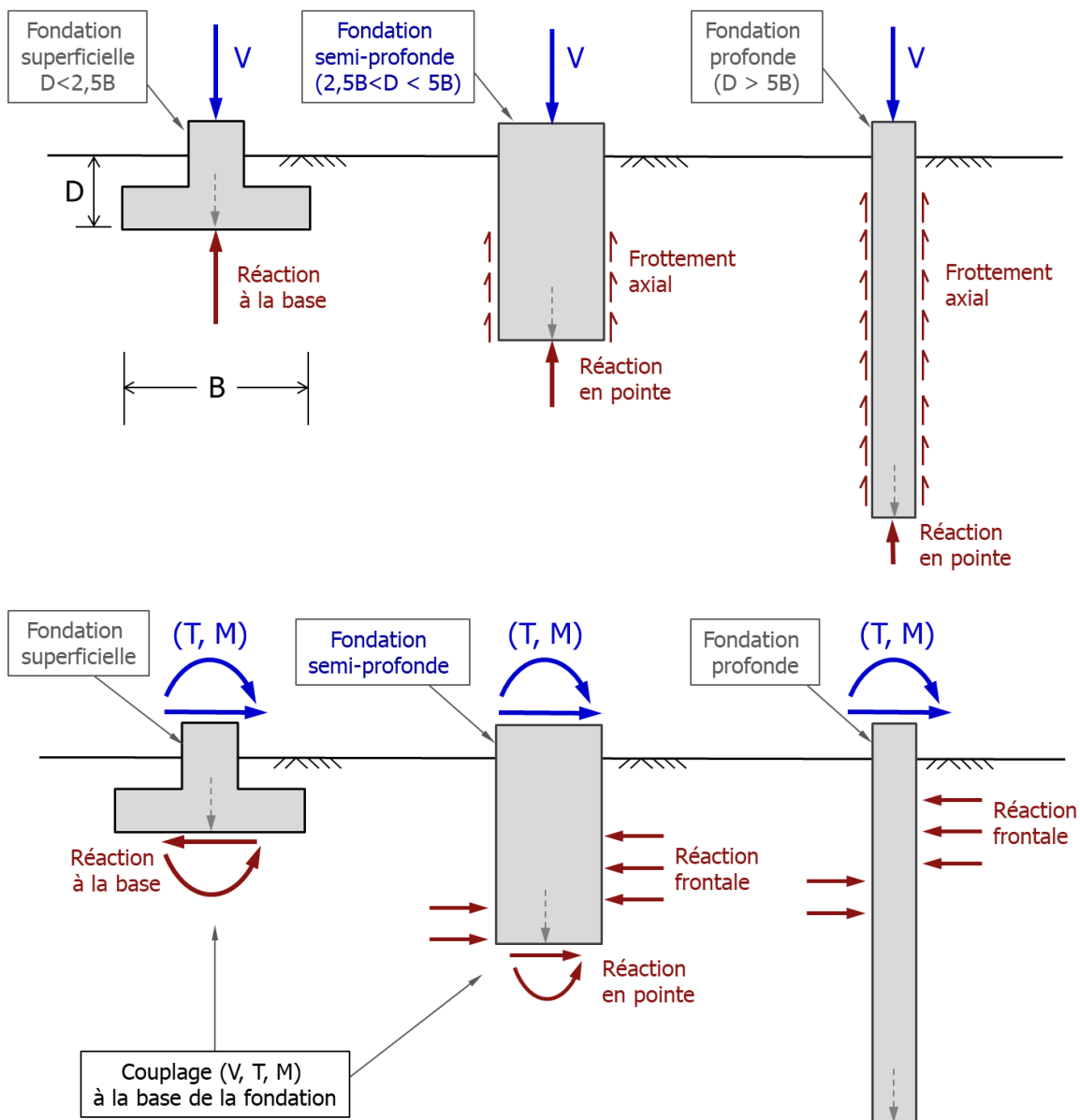


Figure 1 : Domaine conventionnel d'application du concept de fondation semi-profonde

A la différence des fondations superficielles, une fondation semi-profonde se distingue par sa capacité à mobiliser la réaction du terrain le long du fût. D'une manière plus générale, la particularité d'une fondation semi-profonde réside principalement dans son comportement transversal avec :

- une mobilisation de la réaction transversale du terrain le long du fût à la différence des fondations superficielles ;
- une mobilisation de la réaction tangentielle (et rotationnelle) du terrain à la base de la fondation à la différence des fondations profondes (flexibles).

La mise en œuvre du modèle SEMIPROF permet ainsi d'établir par un modèle 3D en déplacements (modèle de Winkler généralisé) :

- les contributions respectives de « la base » et du « fût » tenant compte des effets de non-linéarité éventuels (plastification, décollement etc.) ;
- une estimation des déplacements 3D de la fondation (tassement, flèches selon O_x et O_y , rotations autour de O_x , O_y et O_z);
- une estimation « 3D » de la surface comprimée à la base de la fondation ;
- le torseur (V, H_x, H_y, M_x, M_y) résultant à la base. Celui-ci peut ensuite servir de donnée d'entrée à une justification conventionnelle de capacité portante à l'aide du module FONDSUP ;
- les efforts internes en vue de vérifier la résistance structurale du massif de fondation.

2. Notations et conventions

On utilise les notations suivantes :

- Z_0 cote de la tête de la fondation
- Z_{base} cote de la base de la fondation
- W poids propre total de la fondation
- D profondeur de la base de la fondation = $Z_0 - Z_{base}$
- P_{eq} périmètre de frottement équivalent (pour la réaction tangentielle le long du fût)
- A aire d'assise de la fondation
- L_x largeur de la fondation selon X (variable selon z pour une fondation trapézoïdale)
- L_y largeur de la fondation selon Y
- V effort vertical appliqué en tête de la fondation
- F_x effort horizontal selon X appliqué en tête de la fondation
- F_y effort horizontal selon Y appliqué en tête de la fondation
- M_x moment de renversement autour de X appliqué en tête de la fondation
- M_y moment de renversement autour de Y appliqué en tête de la fondation
- M_z moment de torsion autour de Z appliqué en tête de la fondation

3. Principe de modélisation

3.1. Modèle de Winkler généralisé

Le principe des calculs réalisés par SEMIPROF repose sur le modèle de Winkler 3D généralisé qui consiste à simuler l'interaction sol/fondation à l'aide d'une série de ressorts élasto-plastiques placés le long du fût et à la base de la fondation.

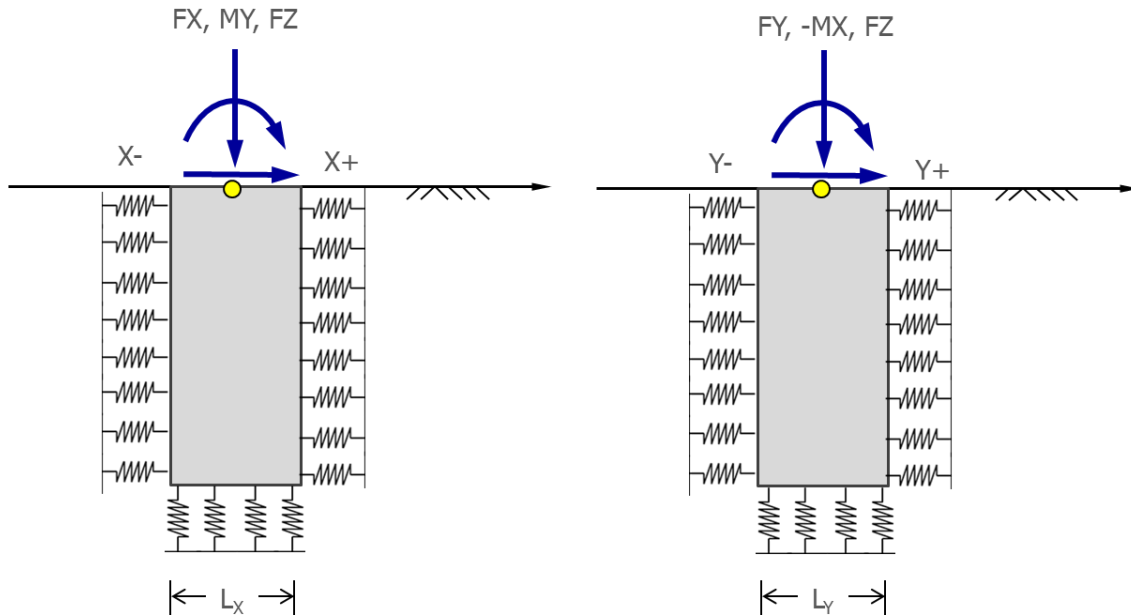


Figure 2 : Principe du modèle de Winkler généralisé (multicouche, non-linéaire) – Fondation rectangulaire ou cylindrique

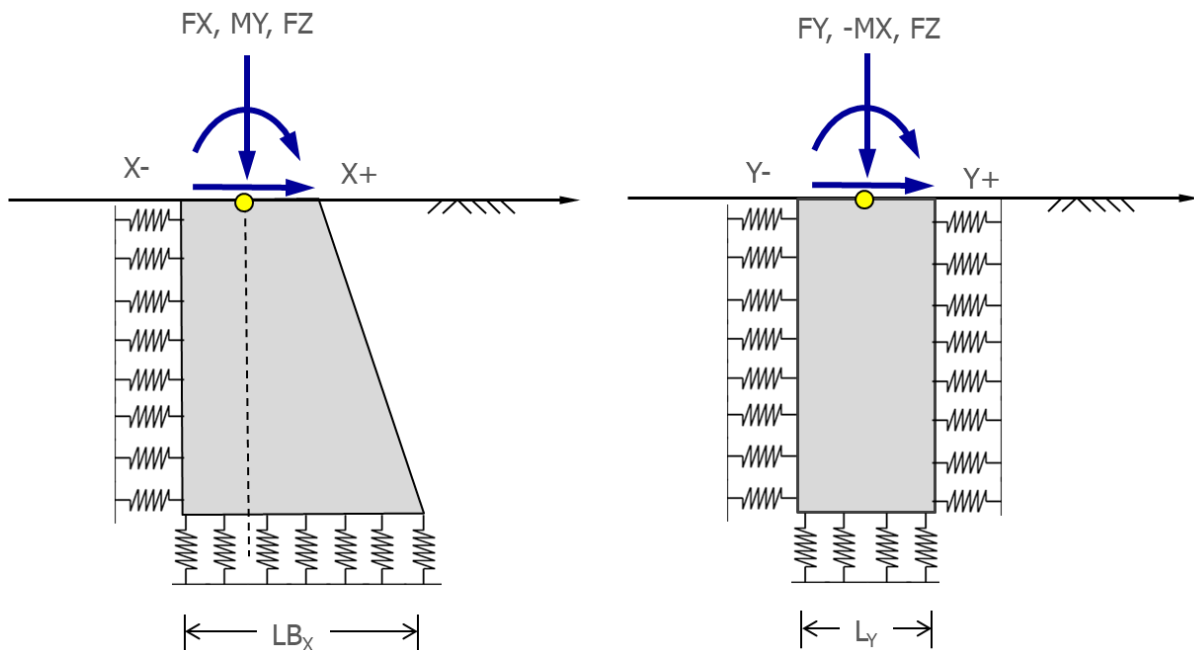


Figure 3 : Principe du modèle de Winkler généralisé (multicouche, non-linéaire) – Fondation trapézoïdale

Chaque série de ressorts est caractérisée par une loi de mobilisation non-linéaire à deux ou trois paliers selon les principes décrits dans les paragraphes suivants. En particulier, la réaction le long du fût (transversale ou axiale) est caractérisée à l'aide d'une loi symétrique à trois paliers (deux raideurs et deux paliers plastiques). Quant à la réaction (verticale) en pointe, celle-ci est caractérisée à l'aide d'une loi asymétrique à deux paliers (une pente et un palier plastique) intégrant un critère de décollement.

3.2. Lois de réaction le long du fût

3.2.1. Réaction frontale (pression – déplacement horizontal)

Dans SEMIPROF, la reprise des charges transversales en tête peut être assurée en partie, dans chaque direction, par la mobilisation d'une réaction frontale du terrain, supposée se développer sur la largeur perpendiculaire à la direction du chargement (L_x et L_y). A noter que Pour une fondation trapézoïdale, la valeur de L_x (chargement selon Y) est variable avec la profondeur.

La loi de réaction frontale d'une fondation semi-profonde obéit à une construction comparable à celle usuellement considérée pour les pieux et les barrettes. Il s'agit d'une loi de type « p-y » que SEMIPROF permet de caractériser à l'aide d'une courbe de pression-déplacement à trois paliers selon les notations de la Figure 4. Les coefficients de réaction k_{f1} et k_{f2} (exprimés en kPa/m) et les pressions $p_{f,1}$ et $p_{f,2}$ (exprimés en kPa) peuvent être estimés en pratique par corrélation avec les mesures pressiométriques ou pénétrométriques (voir §4.2.1 et §4.2.2). La valeur de k_f peut également être reliée aux « propriétés élastiques » du terrain quand celui-ci est assimilé à un milieu continu élastique (voir §4.2.3).

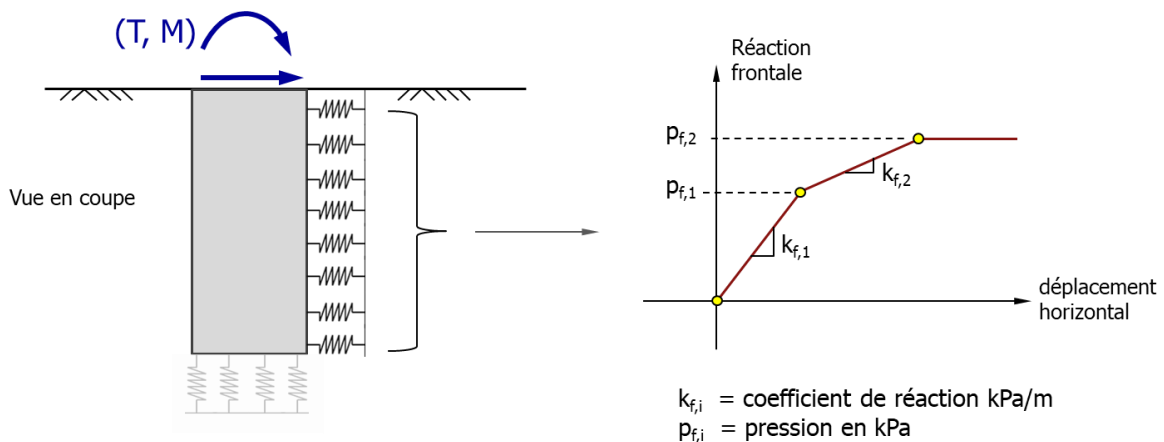


Figure 4 : Modélisation de la réaction frontale du sol – Loi de mobilisation

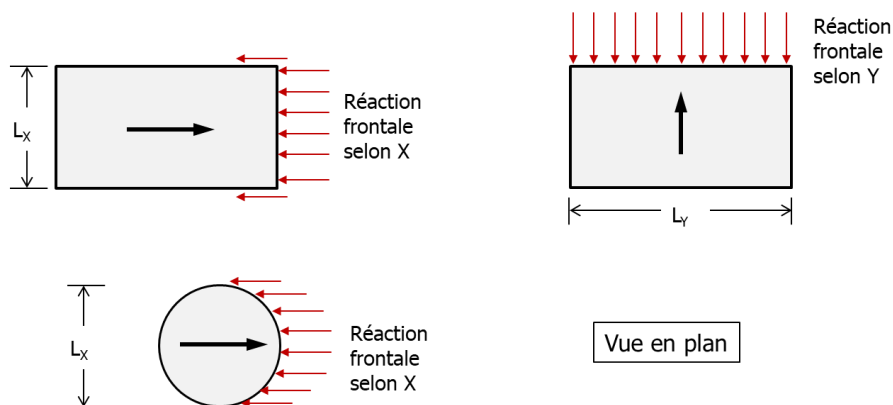


Figure 5 : Mobilisation de la réaction frontale selon la direction du chargement

3.2.2. Réaction tangentielle verticale (frottement – tassement)

Dans SEMIPROF, la reprise des charges verticales peut être assurée en partie par la mobilisation d’une réaction tangentielle verticale (frottement axial) du terrain, supposée se développer sur un périmètre de la fondation P_{eq} :

- Pour une fondation cylindrique $P_{eq} = \pi L_x$
- Pour une fondation rectangulaire $P_{eq} = 2(L_x + L_y)$
- Pour une fondation trapézoïdale $P_{eq}(z) = 2L_x(z) + L_y$ (1 seule face active selon Y)

La loi de réaction tangentielle verticale d’une fondation semi-profonde obéit à une construction comparable à celle usuellement considérée pour les pieux et les barrettes. Il s’agit d’une loi de type « t-z » que SEMIPROF permet de caractériser à l’aide d’une courbe de frottement-tassement à trois paliers selon les notations de la Figure 7.

Les coefficients de réaction k_{t1} et k_{t2} (exprimés en kPa/m) et les frottements $p_{t,1}$ et $p_{t,2}$ (exprimés en kPa) peuvent être estimés en pratique par corrélation avec les mesures pressiométriques ou pénétrométriques (voir §4.3.1 et §4.3.2). La valeur de k_t peut également être reliée aux « propriétés élastiques » du terrain quand celui-ci est assimilé à un massif élastique (voir §4.3.3).

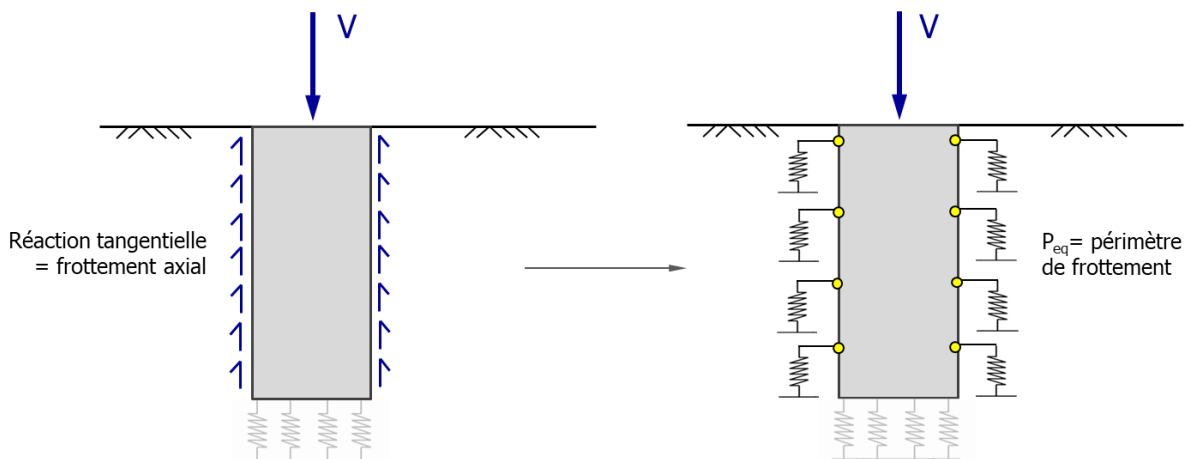


Figure 6 : Modélisation de la réaction tangentielle verticale du sol

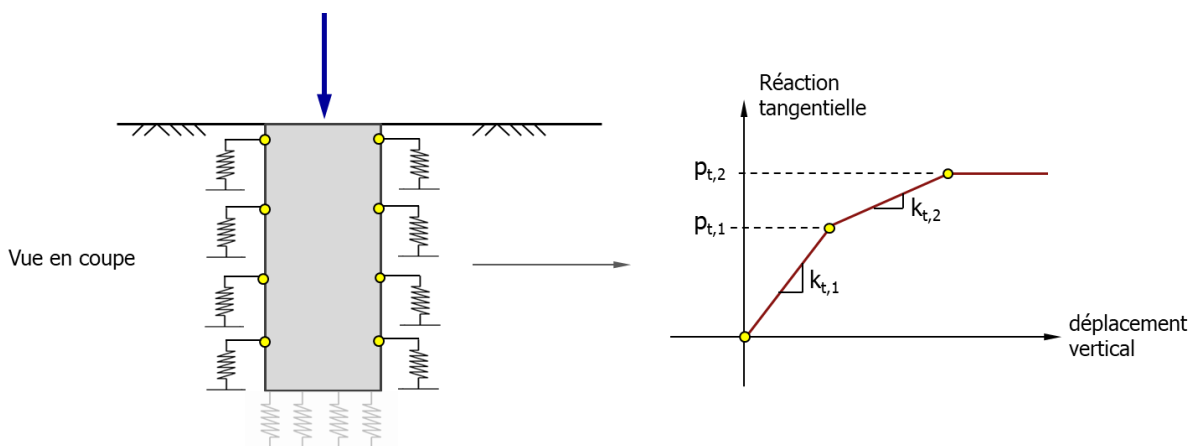


Figure 7 : Loi de mobilisation de la réaction tangentielle verticale du sol

3.2.3. Réaction tangentielle horizontale (frottement – déplacement)

Dans SEMIPROF, la reprise des charges transversales peut également être assurée en partie par la mobilisation d’une réaction tangentielle du terrain dans la direction horizontale. Ceci est notamment le cas pour une fondation de section rectangulaire ou trapézoïdale. Dans ce cas, cette réaction tangentielle est supposée se développer sur un périmètre de frottement égal à :

- Pour une fondation rectangulaire
 - o Chargement selon X $P_{eq} = 2L_x$
 - o Chargement selon Y $P_{eq} = 2L_y$
- Pour une fondation trapézoïdale
 - o Chargement selon X $P_{eq}(z) = 2L_x(z)$
 - o Chargement selon Y $P_{eq} = L_y$ (une seule face selon Y)

La loi de réaction tangentielle horizontale d’une fondation semi-profonde obéit à une construction comparable à celle usuellement considérée pour les barrettes. Il s’agit d’une loi de type « t-z » que SEMIPROF permet de caractériser à l’aide d’une courbe de frottement-déplacement à trois paliers selon les notations de la Figure 9.

Les coefficients de réaction k_{t1} et k_{t2} (exprimés en kPa/m) et les frottements $p_{t,1}$ et $p_{t,2}$ (exprimés en kPa) peuvent être estimés en pratique par corrélation avec les mesures pressiométriques ou pénétrométriques (voir §4.3.1 et §4.3.2). La valeur de k_t peut également être reliée aux « propriétés élastiques » du terrain quand celui-ci est assimilé à un massif élastique (voir §4.3.3).

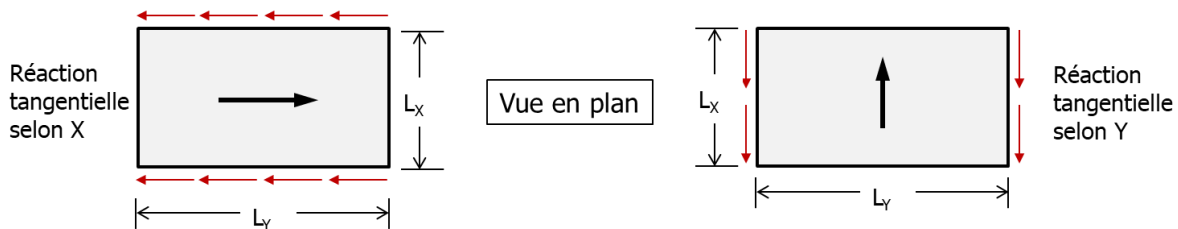


Figure 8 : Modélisation de la réaction tangentielle horizontale du sol

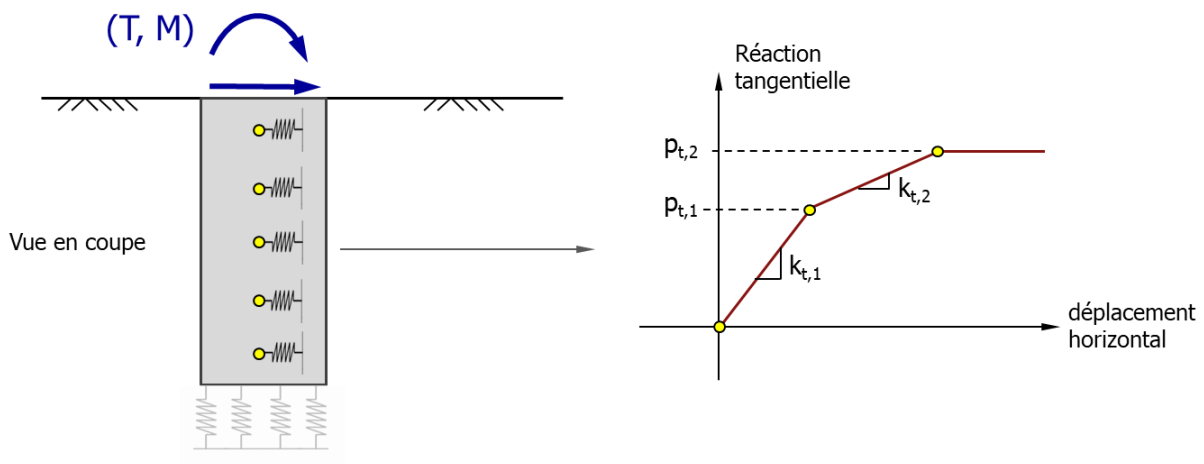


Figure 9 : Loi de mobilisation de la réaction tangentielle horizontale du sol

3.2.4. Prise en compte des effets de dégradation à proximité de la surface

SEMIPROF permet d'appliquer une dégradation homothétique sur les lois de réaction à proximité de la surface à l'aide d'un coefficient minorateur variant linéairement entre $x_{\beta, \text{toit}}$ en $z = Z_{\text{toit, dég}}$ et $x_{\beta, \text{base}}$ à $z = Z_{\text{base, dég}}$.

En règle générale :

- $Z_{\text{toit, dég}} = Z_{\text{TN}}$
- $Z_{\text{base, dég}} = Z_{\text{TN}} - 2B_{\text{eq}}$ pour terrain cohérent et $= Z_{\text{TN}} - 4B_{\text{eq}}$ pour terrain frottant
- $x_{\beta, \text{toit}} = 0,5$ et $x_{\beta, \text{base}} = 1,0$

Cette dégradation s'applique sur l'ensemble des lois de réaction « activées » dans le modèle (le long du fût) : à la fois sur les termes de raideur et les paliers plastiques.

3.2.5. Réduction de la réaction du sol sur une face donnée

SEMIPROF permet également de spécifier un coefficient de réduction compris entre 0 et 1 sur la réaction du sol à prendre en compte sur une face donnée.

Cette réduction s'applique sur l'ensemble des lois de réaction « activées » dans le modèle (le long du fût). Pour une fondation trapézoïdale, un coefficient de réduction égal à 0 est imposé sur la face « inclinée » : aucune réaction n'est comptabilisée sur la face inclinée.

3.3. Lois de réaction à la base de la fondation

Dans SEMIPROF, la mobilisation de la réaction en pointe contribue à la reprise d'une partie des charges appliquées en tête.

3.3.1. Réaction verticale (normale à la base)

La réaction verticale du terrain sous la base de la fondation permet d'équilibrer une partie de l'effort vertical et du moment de renversement à reprendre par la fondation. SEMIPROF assimile le terrain sous la fondation à une distribution de ressorts verticaux élasto-plastiques travaillant exclusivement en compression (figure suivante).

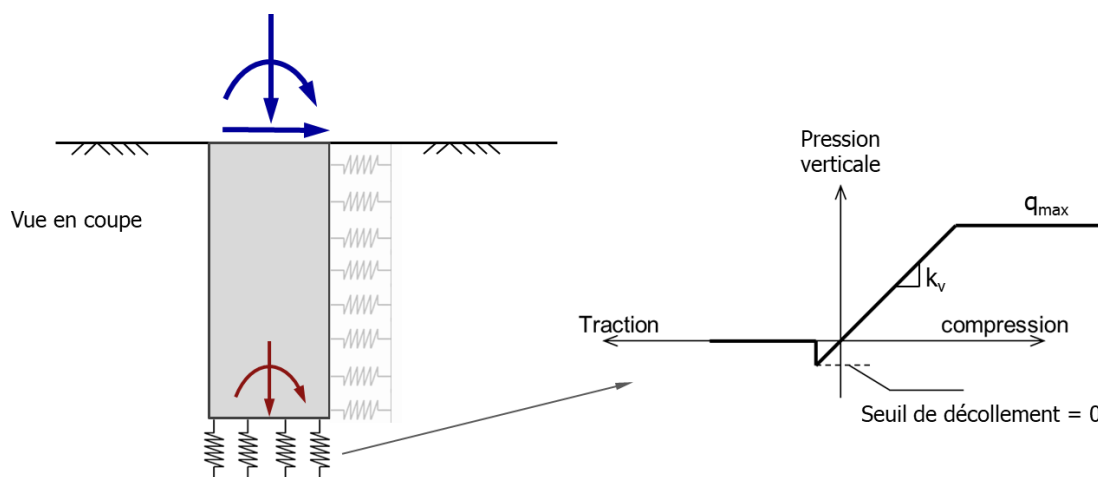


Figure 10 : Loi de mobilisation de la réaction verticale à la base de la fondation

La loi de comportement de ces ressorts comporte un palier élastique k_v (kPa/m) et un palier plastique q_{max} (kPa). Ces deux termes peuvent être estimés en pratique par corrélation avec les mesures pressiométriques ou pénétrométriques (§4.4.1 et §4.4.2). La valeur de k_v peut également être reliée aux « propriétés élastiques » du terrain quand celui-ci est assimilé à un massif élastique (voir §4.4.3). L'aire d'assise de la fondation est de forme circulaire pour un massif cylindrique ou de forme rectangulaire pour un massif rectangulaire ou trapézoïdale.

3.3.2. Réaction tangentielle (horizontale) à la base de la fondation

SEMIRPOF permet également de prendre en compte la contribution éventuelle de la réaction tangentielle (horizontale) à la base de la fondation. Cette réaction, souvent négligée pour les cas courants, obéit à une loi de mobilisation comprenant un palier élastique k_h (kPa/m) et un palier plastique τ_{max} (kPa).

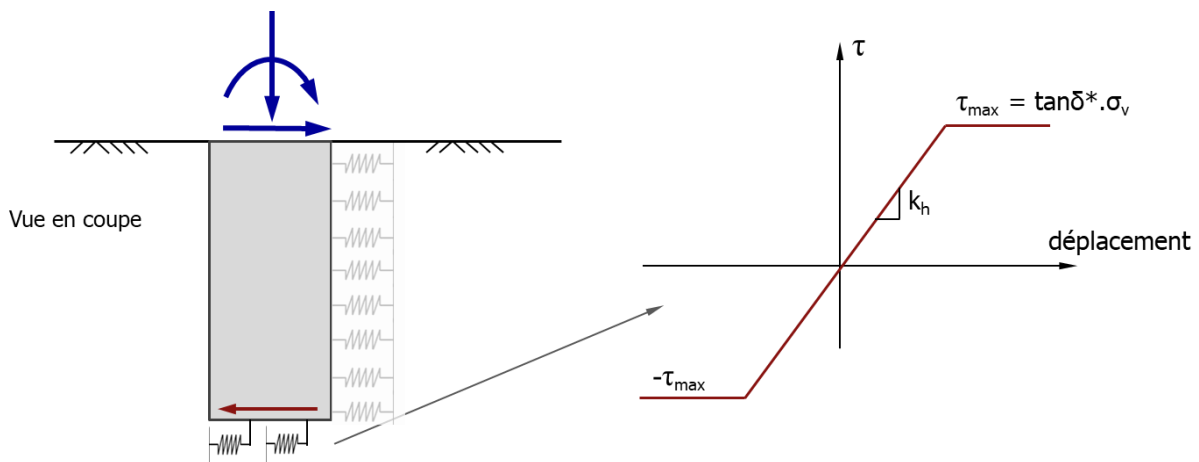


Figure 11 : Loi de mobilisation de la réaction tangentielle à la base de la fondation

La valeur de k_h peut être estimée par corrélation avec k_v à partir des solutions d'élasticité (voir §4.5). Celle de τ_{max} est calculée selon un critère de stabilité « combiné » à l'aide de la relation :

$$\tau_{max} = \tan\delta^* \cdot \sigma_n \quad \text{avec} \quad \delta^* = \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma_n}{q_{max}}} \right) \delta_{max}$$

Où :

- σ_n réaction normale (verticale) mobilisée sous la base de la fondation ;
- q_{max} contrainte verticale maximale (palier plastique de la loi de mobilisation de la réaction verticale sous la fondation) ;
- δ_{max} angle de rugosité maximal (donnée utilisateur) pris généralement égal à une fraction (comprise entre 2/3 et 1) de l'angle de frottement du terrain d'ancrage.

Dans le cas général, le critère utilisé s'apparente à un critère de portance combinée (sous chargement incliné) qui peut être représenté graphiquement sous forme d'un diagramme de stabilité (τ_{max}, σ_n) normalisé à q_{max} comme le montre la figure suivante.

Pour une fondation faiblement chargée verticalement (σ_n faible) ou pour une fondation posée sur un support rocheux (q_{max} grand), on a $\delta^* \sim \delta_{max}$. Le critère de stabilité tend vers alors un critère de glissement de Coulomb.

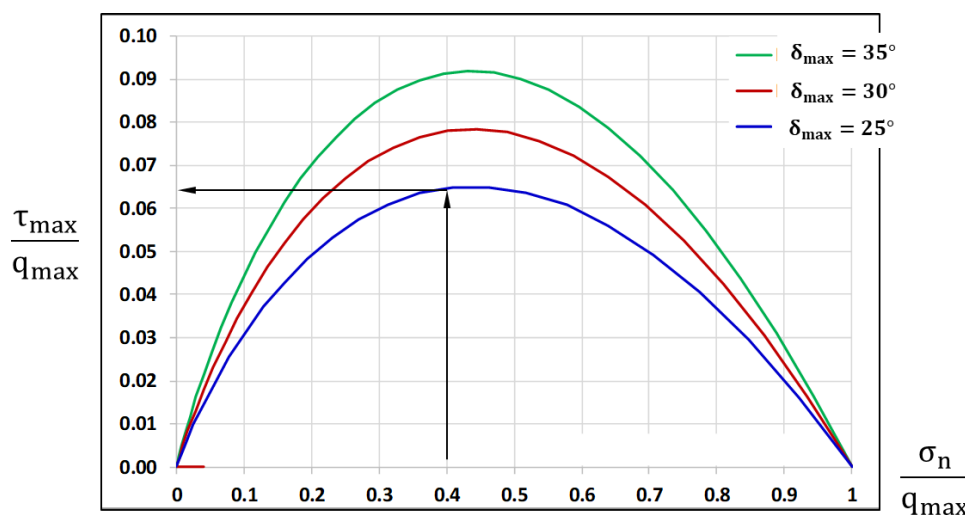


Figure 12 : Diagramme de stabilité cisaillement/compression à la base de la fondation

3.4. Mise en équation

3.4.1. Equilibre statique

L'équilibre statique global de la fondation est entièrement décrit à l'aide d'un système de 6 équations :

- Bilan des forces et réactions verticales (en frottement et à la base) du sol. Ce bilan tient également compte du poids propre de la fondation et des défauts de masse éventuels ;
- Bilan des forces horizontales selon X et Y tenant compte des réactions frontales et tangentielles le long du fût et de la réaction tangentielle à la base. Ce bilan tient également compte de l'application éventuelle d'une charge répartie le long du fût ;
- Bilan des moments de renversement autour de X et Y tenant compte des réactions frontales et tangentielles ainsi que de la réaction à la base (tangentielle et verticale). Ce bilan tient également compte de l'application éventuelle d'une charge répartie le long du fût et de l'excentrement du poids propre du massif quand celui-ci est de forme trapézoïdale ou quand il contient des défauts de masse décalés par rapport à l'axe de la fondation ;
- Bilan du moment de torsion autour de Z tenant compte des réactions frontales.

3.4.2. Champ de déplacement

La fondation étant rigide, son déplacement en tout point peut être entièrement décrit à l'aide de six degrés de liberté :

- Le tassement en tête noté s ;
- Les déplacements horizontaux en tête selon X et Y notés respectivement u_x et u_y ;
- Les rotations de la fondation autour de X, Y et Z notées respectivement θ_x , θ_y et θ_z .

3.4.3. Résolution

L'intégration des lois de mobilisation de la réaction du terrain le long du fût et sous la base de la fondation est menée par l'intermédiaire d'une discrétisation élémentaire de la fondation (le long du fût et au niveau de la base d'assise). Le contrôle de la réaction du terrain vis-à-vis de la loi de la mobilisation est opéré au centre de chaque élément du maillage. Le caractère « rigide » de la fondation et les relations cinématiques qui en résultent permettent ensuite d'exprimer, matriciellement, la résultante des réactions intervenant dans l'équilibre statique de la fondation comme une « fonction affine » du vecteur déplacement constitué des 6 degrés de liberté du système $\mathbf{U} = [s, u_x, u_x, \theta_x, \theta_y, \theta_z]$.

L'équilibre statique de la fondation peut ensuite être écrit, à chaque itération, sous forme matricielle :

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}$$

Où \mathbf{K} est la matrice (6 x 6) de rigidité équivalente du système et \mathbf{F} est un vecteur (6 x 1) de chargement équivalent. Les valeurs de \mathbf{K} et \mathbf{F} sont actualisées à chaque itération tenant compte du comportement non-linéaire de la réaction du sol (décollement, plastification etc.).

3.4.4. Résultats

La résolution du système permet d'établir :

- Les déplacements de la fondation : tassement, flèches horizontales et rotations ;
- Les sollicitations internes (effort normal, efforts tranchants, moments fléchissants et moment de torsion) dans le corps de la fondation ;
- La réaction du terrain le long du fût de la fondation : pressions frontales ou tangentielles, et frottement axial éventuel ;
- Le torseur $(V, H_x, H_y, M_x, M_y)_{\text{base}}$ repris à la base de la fondation tenant compte du comportement non-linéaire du sol (décollement plastification, cf. Figure suivante) ;
- Le taux de surface comprimée à la base de la fondation A_{comp} .

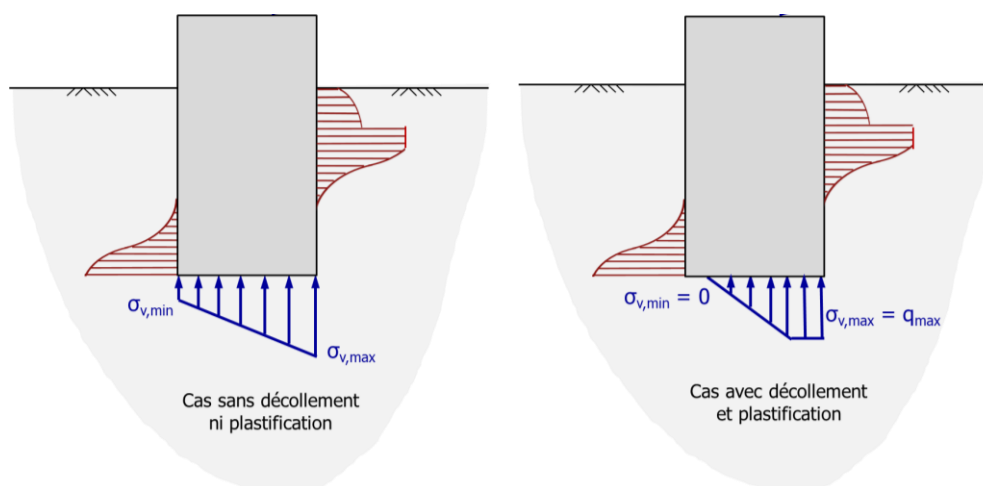


Figure 13 : Réaction du sol à la base en cas de décollement ou de plastification

4. Mise en œuvre pratique

4.1. Choix des lois de réaction

SEMIPROF permet de définir la loi de réaction selon trois modes :

- Manuellement couche par couche, ainsi qu'à la base, en spécifiant directement les coefficients de réaction et les paliers plastiques ;
- Automatiquement à partir des propriétés du terrain, pressiométriques ou pénétrométriques (§4.2 à 4.5). Dans ce cas, les lois de réaction sont automatiquement adaptées pour chaque cas de charge au type de combinaison associé (ELS, ELU).

Dans le cas du mode « automatique », des coefficients partiels peuvent être spécifiés par l'utilisateur et appliqués sur le palier plastique selon la combinaison de chargement.

4.2. Loi de réaction frontale

4.2.1. A partir des propriétés pressiométriques (PMT)

On utilise les notations de la Figure 4. Les coefficients de réaction frontaux $k_{f,i}$ peuvent être estimés à partir du modèle de Ménard selon la relation :

$$k_{f,i} = \mu_i \frac{9E_M}{\lambda_c B_{eq} \alpha + 2B_0 \left(\frac{\lambda_d B_{eq}}{B_0} \right)^\alpha}$$

Où $B_0 = 0,6$ m et :

- B_{eq} largeur équivalente (Tableau 1)
- E_M module pressiométrique de Ménard ;
- α coefficient rhéologique (NF P 94 261) ;
- μ_i coefficient multiplicateur dépendant du type de sollicitation (Tableau 3) ;
- $\lambda_c \lambda_d$ coefficients de forme (Tableau 2).

La valeur de B_{eq} est obtenue comme suit :

	Chargement selon X	Chargement selon Y
Cylindrique	$B_{eq} = L_x = L_y$	-
Rectangulaire	$B_{eq} = L_y$	$B_{eq} = L_x$
Trapézoïdale	$B_{eq} = L_y$	$B_{eq} = 0,5 (L_x(Z_0) + L_x(Z_{base}))$

Tableau 1 : Valeurs de B_{eq}

Les valeurs de λ_c et λ_d sont données dans le tableau suivant.

D/ B_{eq}	1,0	2,0	3,0	5,0	20
λ_c	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50
λ_d	1,12	1,53	1,78	2,14	2,65

Tableau 2 : Coefficients de forme λ_c et λ_d en fonction de D/ B_{eq}

Les valeurs de μ_i et des paliers plastiques p_{f1} et p_{f2} sont données dans le tableau suivant.

	ELS QP	ELS CARA	ELU FOND	ELU ACC	ELU SISM
μ_1	1	2	1	2	2 à 6
μ_2	0	0	$\mu_1/2$	$\mu_1/2$	$\mu_1/2$
p_{f1}	p_{fluage}	p_{fluage}	p_{fluage}	p_{fluage}	p_{fluage}
p_{f2}	p_{fluage}	p_{fluage}	p_{limite}	p_{limite}	p_{limite}

Tableau 3 : Valeurs des coefficients μ_i et des paliers p_{fi}

4.2.2. A partir des propriétés pénétrométriques (CPT)

On utilise les notations de la Figure 4. Les coefficients de réaction frontaux k_{fi} peuvent également être estimés à partir de la résistance de cône obtenue par un essai CPT selon la relation :

$$k_{f,i} = \mu_i \frac{9\beta q_c}{\lambda_c B_{eq} \alpha + 2B_0 \left(\frac{\lambda_d B_{eq}}{B_0} \right)^\alpha}$$

Où $B_0 = 0,6$ m et :

- B_{eq} largeur équivalente (Tableau 1)
- q_c résistance de cône pénétrométrique ;
- β facteur de corrélation fonction du type de terrain (Tableau 4) ;
- α coefficient rhéologique fonction du type de terrain (Tableau 5);
- μ_i coefficient multiplicateur dépendant du type de sollicitation (Tableau 3);
- $\lambda_c \lambda_d$ coefficients de forme dépendant du rapport D/B_{eq} de la fondation (Tableau 2).

Les valeurs de β et α sont données dans le tableau suivant :

	Terrain sableux	Terrain intermédiaire	Terrain argileux	Craie et Marnes
β	1,25	1,50	3,00	1,25
α	0,33	0,50	0,67	0,50

Tableau 4 : Valeurs de β et α en fonction du type de terrain

Les valeurs de μ_i ainsi que celles des paliers plastiques p_{f1} et p_{f2} sont données dans le Tableau 3. Dans le cas du pénétromètre statique, on a :

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

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_1	13,0	10,0	5,0	13,0
β_2	8,0	6,0	3.5	8,0

Tableau 5 : Valeurs des facteurs de corrélation β_1 et β_2

4.2.3. A partir des propriétés d'élasticité

Le coefficient de réaction frontal peut également être caractérisé à partir du module de cisaillement du terrain G à l'aide de la relation suivante (Gazetas, 1991) :

$$k_f = \frac{5,4G}{(1 - \nu)D} \left(\frac{D}{B_{eq}} \right)^{0,4}$$

Avec ν le coefficient de Poisson du sol et B_{eq} telle que indiquée dans le Tableau 1.

4.3. Loi de réaction tangentielle le long du fût

4.3.1. A partir des propriétés pressiométriques (PMT)

On utilise les notations de la Figure 7. 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 P_{eq} est le périmètre de frottement et :

- 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.

Les valeurs de $\mu_{t,i}$ ainsi que celles des paliers plastiques p_{t1} et p_{t2} sont données dans le tableau ci-dessous.

	ELS QP	ELS CARA	ELU FOND	ELU ACC	ELU SISM
$\mu_{t,1}$	1	1	1	1	1 à 3
$\mu_{t,1}$	$\frac{\mu_{t,1}}{5}$	$\frac{\mu_{t,1}}{5}$	$\frac{\mu_{t,1}}{5}$	$\frac{\mu_{t,1}}{5}$	$\frac{\mu_{t,1}}{5}$
p_{t1}	$\frac{q_{sl}}{2}$	$\frac{q_{sl}}{2}$	$\frac{q_{sl}}{2}$	$\frac{q_{sl}}{2}$	$\frac{q_{sl}}{2}$
p_{t2}	q_{sl}	q_{sl}	q_{sl}	q_{sl}	q_{sl}

Tableau 6 : Valeurs de $\mu_{t,i}$ et $p_{t,i}$ en fonction de la combinaison de chargement

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

4.3.2. A partir des propriétés pénétrométriques (CPT)

On utilise les notations de la Figure 7. 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 P_{eq} est le périmètre de frottement et :

- 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.

Les valeurs de $\mu_{t,i}$ ainsi que celles des paliers plastiques p_{t1} et p_{t2} sont données dans le Tableau 6.

4.3.3. 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) :

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

4.4. Loi de réaction verticale à la base de la fondation

4.4.1. A partir des propriétés pressiométriques (PMT)

On utilise les notations de la Figure 10. Le coefficient de réaction verticale k_v à la base de la fondation peut être estimé à partir du modèle de Ménard selon la relation :

$$k_v = \mu_v \frac{9E_M}{\lambda_c B \alpha + 2B_0 \left(\frac{\lambda_d B}{B_0}\right)^\alpha}$$

Où :

- E_M module pressiométrique de Ménard ;
- α coefficient rhéologique fonction du type de terrain (NF P 94 261) ;
- μ_v coefficient multiplicateur dépendant du type de sollicitation ;
- $\lambda_c \lambda_d$ coefficients de forme dépendant du rapport L/B de l'aire d'assise ;
- B_0 dimension de référence prise égale à 0,6 m.

On a par convention :

- $B = \min(L_x, L_y)$ (valeurs pour $z = Z_{base}$)
- $L = \max(L_x, L_y)$ (valeurs pour $z = Z_{base}$)

Les valeurs de λ_c et λ_d sont données dans le tableau ci-dessous.

L/B	Cercle	1,0	2,0	3,0	5,0	20
λ_c	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50
λ_d	1,00	1,12	1,53	1,78	2,14	2,65

Tableau 7 : Valeurs de λ_c et λ_d pour la loi de réaction verticale à la base de la fondation

Les valeurs de μ_v ainsi que celles du palier plastique q_{max} sont données dans le tableau ci-dessous.

	ELS QP	ELS CARA	ELU FOND	ELU ACC	ELU SISM
μ_v	1	2	1	2	2 à 6
q_{max}	Pfluage	Pfluage	Plimite	Plimite	Plimite

Tableau 8 : Valeurs de μ_v et q_{max}

4.4.2. A partir d'un essai CPT

On utilise les notations de la Figure 10. Le coefficient de réaction verticale à la base de la fondation k_v peut être estimé à partir de la résistance au cône obtenue par un essai CPT selon la relation :

$$k_v = \mu_v \frac{9\beta q_c}{\lambda_c B \alpha + 2B_0 \left(\frac{\lambda_d B}{B_0}\right)^\alpha}$$

Où :

- q_c résistance de cône pénétrométrique ;
- β facteur de corrélation fonction du type de terrain (voir Tableau 4) ;
- α coefficient rhéologique fonction du type de terrain (voir Tableau 4) ;
- μ_v coefficient multiplicateur dépendant du type de sollicitation ;
- $\lambda_c \lambda_d$ coefficients de forme fonction de L/B (voir Tableau 7) ;
- B_0 dimension de référence prise égale à 0,6 m.

On a par convention :

- $B = \min (L_x, L_y)$ (valeurs pour $z = Z_{base}$)
- $L = \max (L_x, L_y)$ (valeurs pour $z = Z_{base}$)

Les valeurs de μ_v ainsi que celles du palier plastique q_{max} sont obtenues selon les indications du Tableau 8. Dans le cas particulier du pénétromètre statique, on a :

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

Où β_1 et β_2 sont des facteurs de corrélation donnés dans le Tableau 5 (NF P 94 262).

4.4.3. A partir des propriétés d'élasticité

Le coefficient de réaction vertical à la base de la fondation peut également être estimé à partir du module de cisaillement G et le coefficient de Poisson ν du terrain (Gazetas, 1991). Pour une base d'assise circulaire de diamètre B :

$$k_v = \frac{8G}{\pi(1-\nu)B}$$

Pour une base d'assise rectangulaire de section $L \times B$:

$$k_v = \frac{G}{(1-\nu)B} \left[0,73 + 1,54 \left(\frac{L}{B} \right)^{0,75} \right]$$

4.5. Loi de réaction tangentielle à la base de la fondation

On utilise les notations de la Figure 11. Le coefficient de réaction tangentielle à la base de la fondation k_h peut être relié analytiquement au coefficient de réaction verticale k_v (§4.4) à partir des solutions analytiques de Gazetas (1991).

Pour une base d'assise circulaire de diamètre B :

$$k_h \sim \frac{4}{5} k_v$$

Pour une base d'assise rectangulaire de section $L \times B$:

$$k_h = \frac{0,4B}{L} \frac{1,2 + 3,3 \left(\frac{L}{B} \right)^{0,65}}{0,73 + 1,54 \left(\frac{B}{L} \right)^{0,75}} k_v$$

Le palier plastique τ_{\max} est obtenu selon le formalisme du §3.3.2 à partir d'un angle de rugosité maximal δ_{\max} . Celui-ci varie entre 2/3 (fondation en béton préfabriqué) et 1 (fondation en béton coulé en place) x l'angle de frottement du terrain d'assise.

4.6. Descente de charge

SEMIPROF permet traiter simultanément plusieurs cas de charge. Chaque cas de chargement est un torseur à 6 composantes ($V, F_x, F_y, M_x, M_y, M_z$) comme le montre la Figure 14.

Les coordonnées du point d'application du torseur de chargement est spécifié par l'utilisateur. Le centre du repère global ($X = 0, Y = 0, Z = 0$) correspond au centre géométrique de la face supérieure de la fondation.

Ces torseurs peuvent être complétés par :

- Le poids propre du massif (spécifié à partir du poids volumique unitaire) ;
- Les effets liés aux défauts de masse éventuels ;
- Les charges réparties le long du fût éventuelles.

Une pondération spécifique du poids propre peut être appliquée pour chaque cas de chargement.

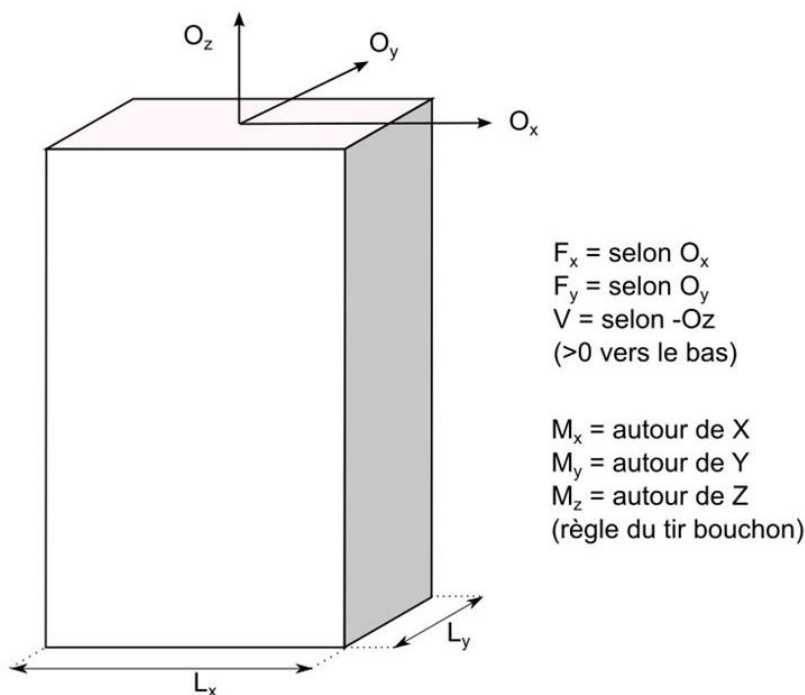


Figure 14 : Conventions pour le torseur de chargement

4.7. Justifications à mener

4.7.1. Calcul aux ELS

Pour un calcul sous combinaisons ELS, il convient de vérifier :

- Les déplacements en tête (tassement, flèche et rotation) vis-à-vis des critères de conception de la structure portée ;
- Que le taux de compression du terrain sous la fondation (rapport entre l'aire comprimée et l'aire totale) demeure supérieur ou égal à 75% de l'aire d'assise totale de la fondation.

4.7.2. Calcul aux ELU

Pour un calcul sous combinaisons ELU, il convient de vérifier :

- Les sollicitations internes dans le corps de la fondation (ELU STR) ;
- La capacité portante combinée (ELU GEO) de la base de la fondation à partir du torseur repris par la base $(V, H_x, H_y, M_x, M_y)_{\text{base}}$. Cette vérification de capacité portante peut être menée à l'aide du module FONDSUP.

A noter que l'annexe P de la norme NF P 94 261 propose une approche enveloppe consistant à mener le calcul SEMIPROF en appliquant un facteur partiel de sécurité de 2 sur le palier plastique q_{max} de la loi de mobilisation de la réaction verticale à la base, en négligeant toute contribution de la réaction tangentielle. L'obtention d'un équilibre stable par cette approche enveloppe dispense alors du passage par FONDSUP pour la vérification de capacité portante.