



Foxta v4

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

Date	Révision	Etabli par	Commentaires
07/09/2020	Ind A	F. Cuirá	Première émission

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	5
3.2.1.	Réaction frontale (pression – déplacement horizontal).....	5
3.2.2.	Réaction tangentielle verticale (frottement – tassement).....	6
3.2.3.	Réaction tangentielle horizontale (frottement – déplacement).....	7
3.2.4.	Prise en compte des effets de dégradation à proximité de la surface.....	8
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	11
3.4.	Mise en équation.....	13
3.4.1.	Equilibre statique	13
3.4.2.	Champ de déplacement	13
3.4.3.	Résolution.....	14
3.4.4.	Résultats	14
4.	Mise en œuvre pratique.....	15
4.1.	Loi de réaction frontale	15
4.1.1.	A partir des propriétés pressiométriques (PMT).....	15
4.1.2.	A partir des propriétés pénétrométriques (CPT).....	16
4.1.3.	A partir des propriétés d'élasticité.....	17
4.2.	Loi de réaction tangentielle le long du fût	17
4.2.1.	A partir des propriétés pressiométriques (PMT).....	17
4.2.2.	A partir des propriétés pénétrométriques (CPT).....	18
4.2.3.	A partir des propriétés d'élasticité.....	18
4.3.	Loi de réaction verticale à la base de la fondation.....	18
4.3.1.	A partir des propriétés pressiométriques (PMT).....	18
4.3.2.	A partir d'un essai CPT.....	19
4.3.3.	A partir des propriétés d'élasticité.....	20
4.4.	Loi de réaction tangentielle à la base de la fondation	20
4.5.	Justifications à mener.....	21
4.5.1.	Calcul aux ELS	21
4.5.2.	Calcul aux ELU.....	21

1. Préambule

Le module SEMIPROF est destiné à la justification géotechnique d'une fondation semi-profonde infiniment rigide à l'aide d'un modèle 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).

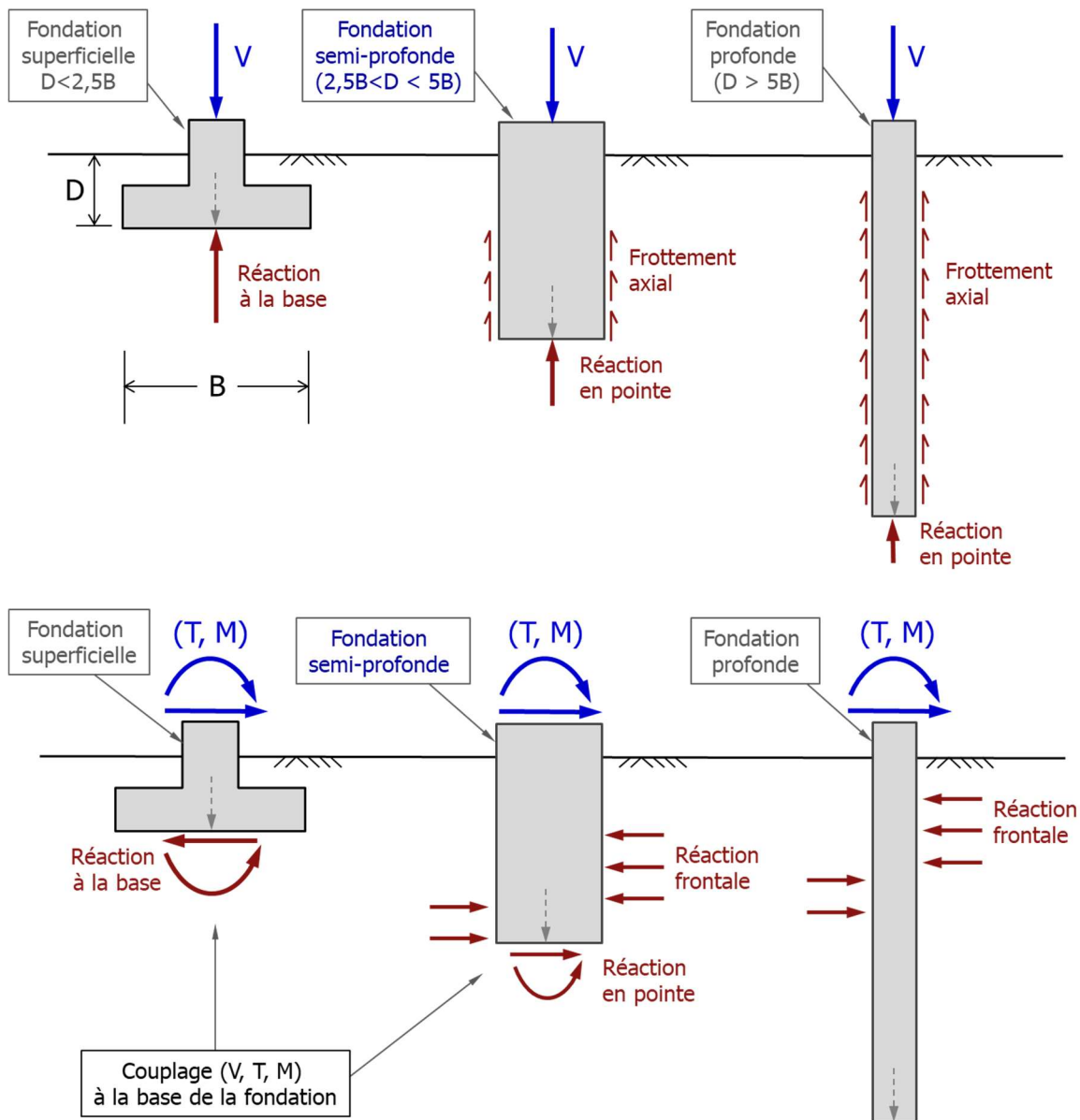


Figure 1 : Domaine conventionnel d'application du concept de fondation semi-profonde

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 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 de la flèche, de la rotation et du tassement en tête de la fondation ;
- une estimation de la surface comprimée à la base de la fondation ;
- le torseur (V, H, M) résultant à la base. Celui-ci sert ensuite de donnée d'entrée à une justification conventionnelle de capacité portante à l'aide du module FONDSUP.

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 = $Z_0 - Z_{base}$
- B_{eq} diamètre équivalent ou largeur frontale du fût (perpendiculaire au plan de travail)
- P_{eq} périmètre de frottement équivalent (pour la réaction tangentielle le long du fût)
- B diamètre ou largeur de la base (perpendiculaire au plan de travail)
- L longueur de la base de la fondation (dans le plan de travail)
- A aire d'assise de la fondation :
 - $A = B \times L$ pour une fondation de base rectangulaire
 - $A = \pi \times B^2/4$ pour une fondation de base circulaire
- V effort vertical appliqué en tête de la fondation
- T effort horizontal appliqué en tête de la fondation
- M moment de renversement 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 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.

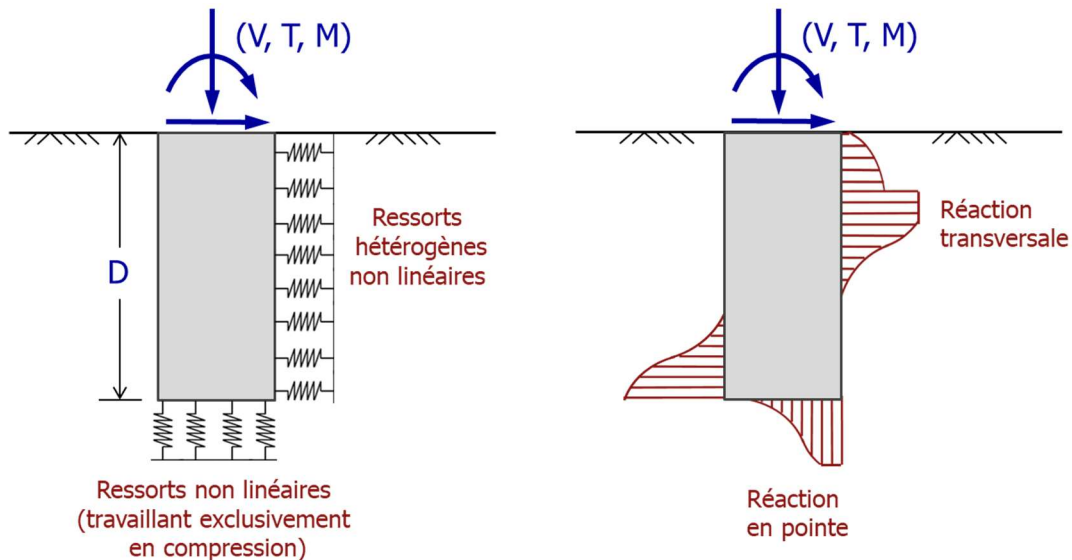


Figure 2 : Principe du modèle de Winkler généralisé (multicouche, non-linéaire)

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 par la mobilisation d'une réaction frontale du terrain, supposée se développer sur une largeur de « butée » équivalente notée B_{eq} (correspondant au diamètre pour un fût cylindrique ou à la largeur perpendiculairement au sens du déplacement pour un fût de section rectangulaire).

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 §4.1.1 et §4.1.2). 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 §4.1.3).

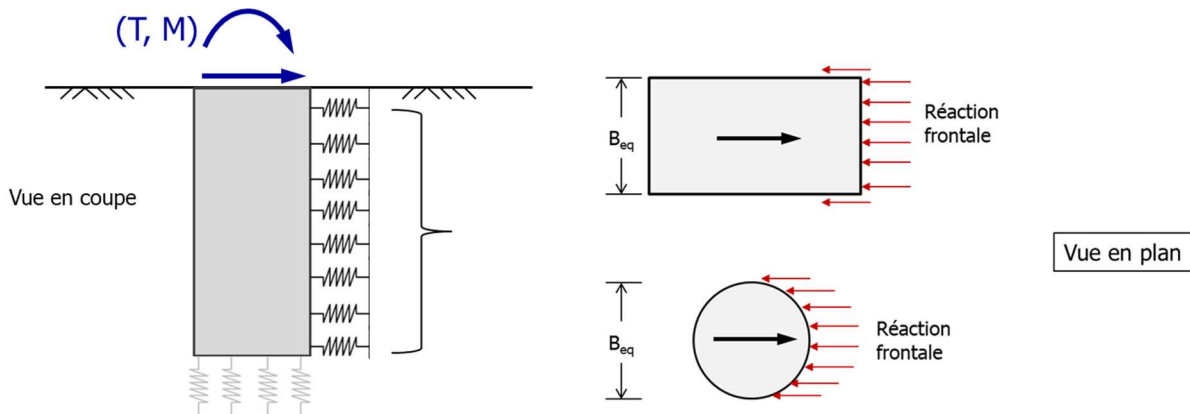


Figure 3 : Modélisation de la réaction frontale du sol – notion de largeur équivalente B_{eq}

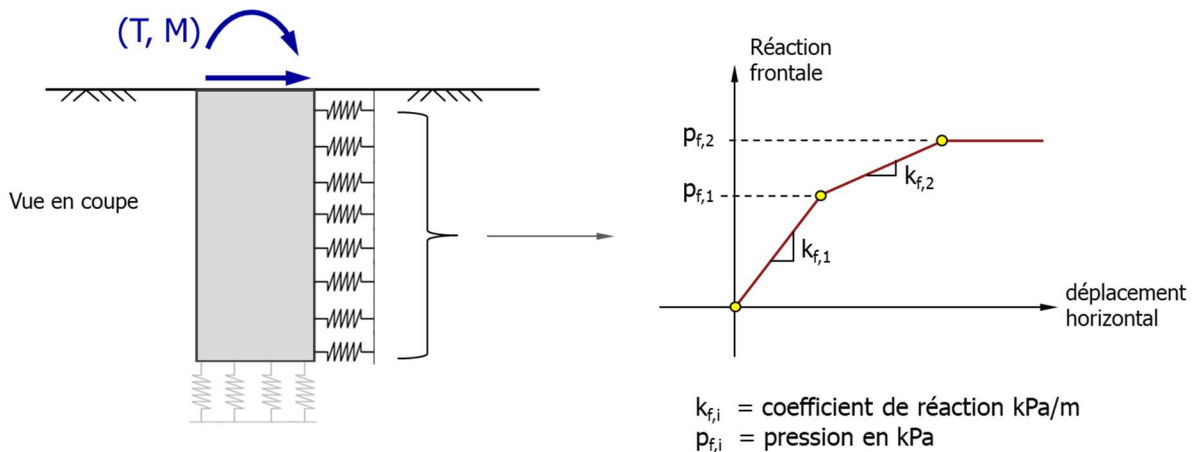


Figure 4 : Modélisation de la réaction frontale du sol – Loi de mobilisation

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 frottement équivalent P_{eq} spécifié par l'utilisateur.

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 6.

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 §4.2.1 et §4.2.2). La valeur de k_t peut également être reliée aux « propriétés élastiques » du terrain quand celui-ci est assimilé à un massif élastique (voir §4.2.3).

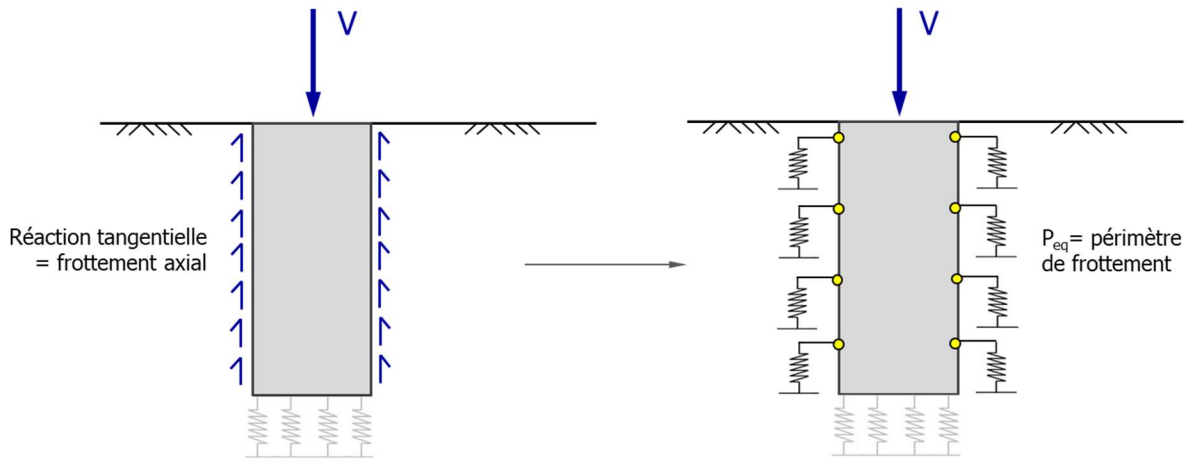


Figure 5 : Modélisation de la réaction tangentielle verticale du sol

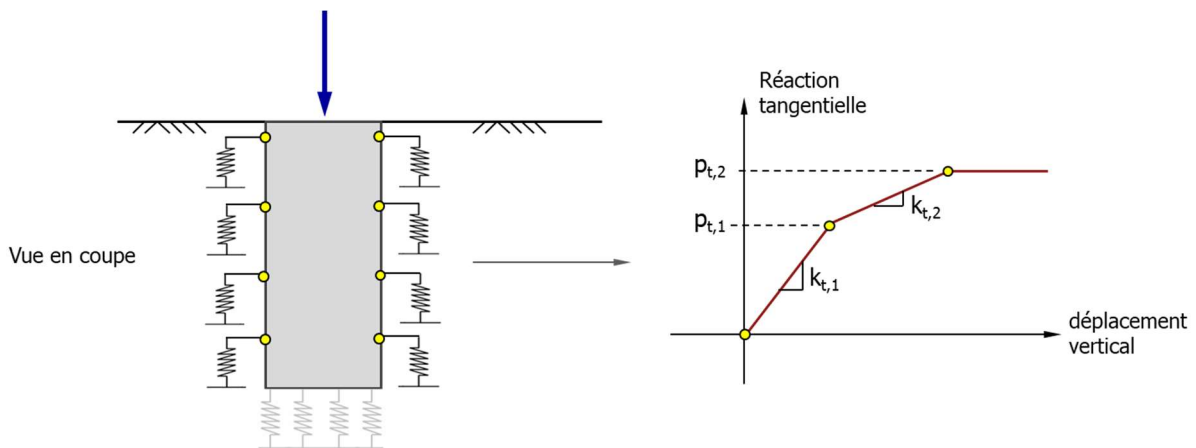


Figure 6 : Loi de mobilisation de la réaction tangentielle verticale du sol

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. Dans ce cas, cette réaction tangentielle est supposée se développer sur un périmètre de frottement spécifié par l’utilisateur qui peut être déterminé en pratique selon les mêmes modalités que pour le calcul des barrettes (cf. NF P 94 262) : $P_{eq} \sim 2(L_{eq} - B_{eq})$ pour une fondation de section $L_{eq} \times B_{eq}$ (avec $L_{eq} > B_{eq}$).

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 8.

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 §4.2.1 et §4.2.2). La valeur de k_t peut également être reliée aux « propriétés élastiques » du terrain quand celui-ci est assimilé à un massif élastique (voir §4.2.3).

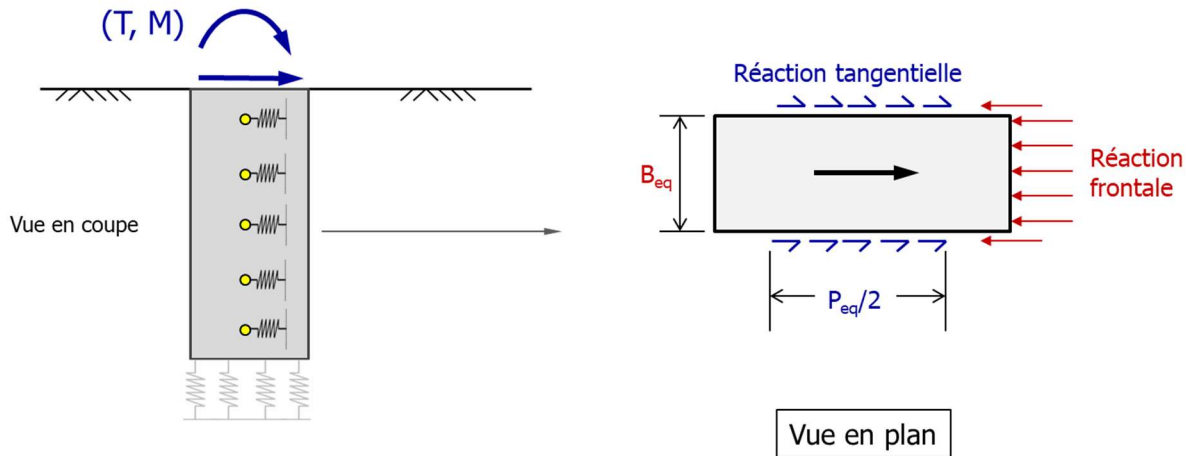


Figure 7 : Modélisation de la réaction tangentielle horizontale du sol (massif de section rectangulaire)

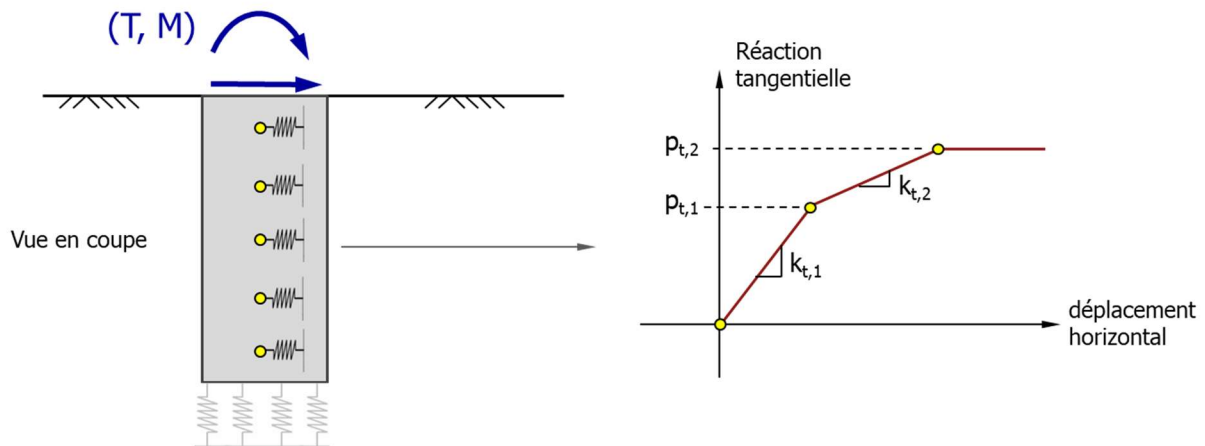


Figure 8 : Loi de mobilisation de la réaction tangentielle horizontale du sol

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 mineur variant linéairement entre x_β en $z = Z_{\text{toit, dégradation}}$ et 1,0 à $z = Z_{\text{base, dégradation}}$.

En règle générale :

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

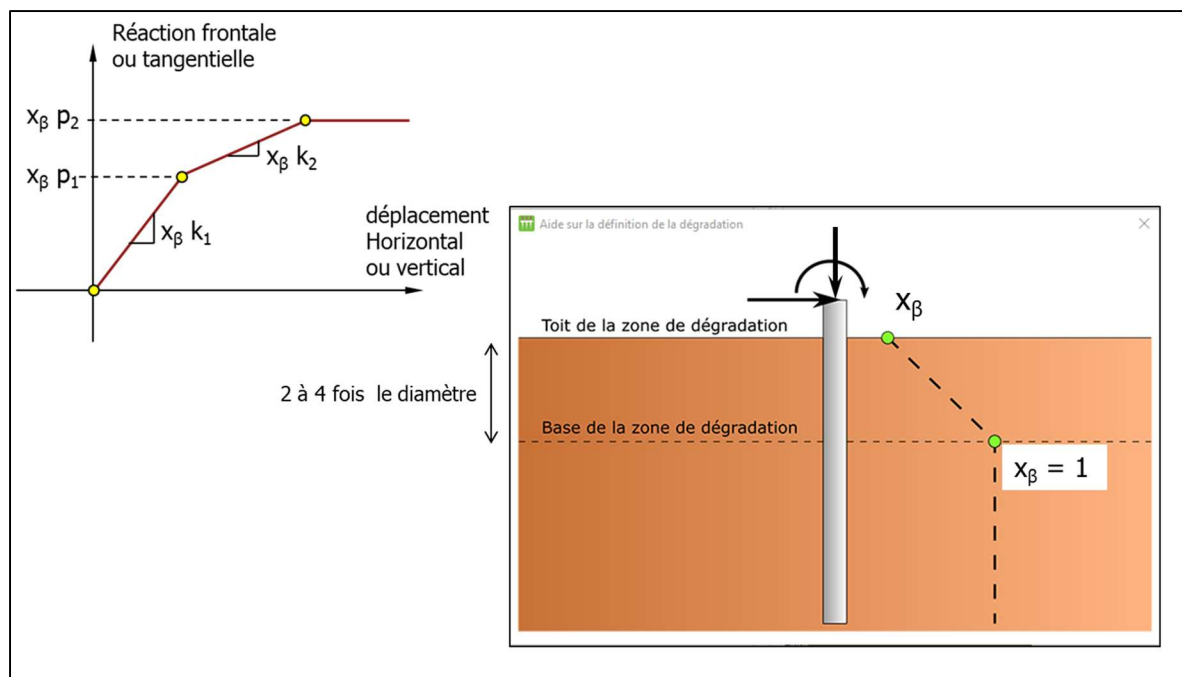


Figure 9 : Prise en compte des effets de dégradation à proximité de la surface

Cette dégradation s’applique sur l’ensemble des lois de réaction « activées » dans le modèle (le long du fût).

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 (figures suivantes).

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 (voir §4.3.1 et §4.3.2). La valeur de k_v peut également être reliée aux « propriétés élastiques » du terrain quand celui-ci est assimilé à un massif élastique (voir §4.3.3). L’aire d’assise de la fondation est caractérisée géométriquement par un diamètre B dans le cas d’une section circulaire, ou par un couple (largeur $B =$ perpendiculaire au plan de travail, $L =$ dans le plan de travail – voir figure suivante) dans le cas d’une section rectangulaire.

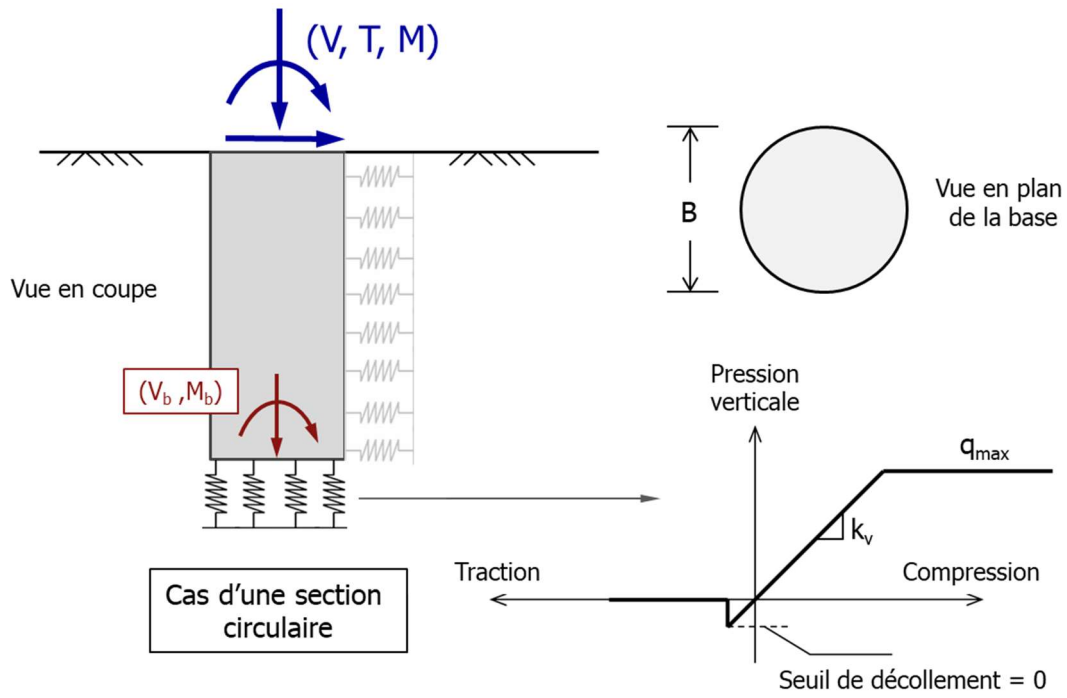


Figure 10 : Loi de mobilisation de la réaction verticale à la base de la fondation pour une section circulaire

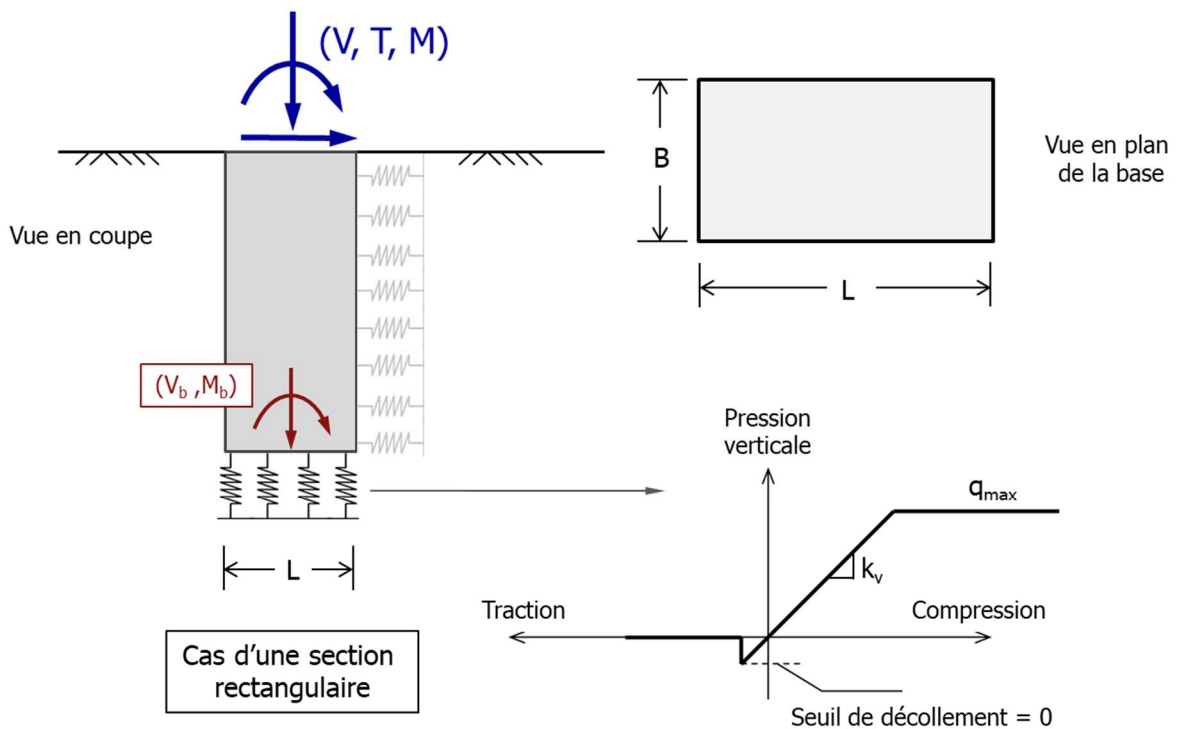


Figure 11 : Loi de mobilisation de la réaction verticale à la base de la fondation pour une section rectangulaire

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).

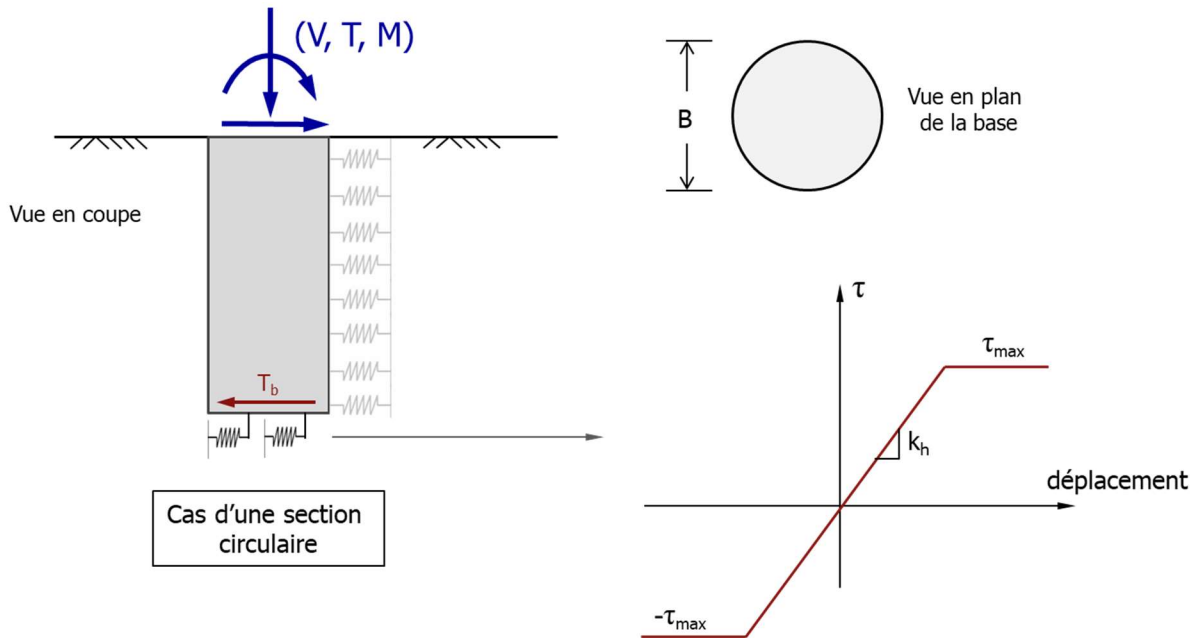


Figure 12 : Loi de mobilisation de la réaction tangentielle à la base de la fondation pour une section circulaire

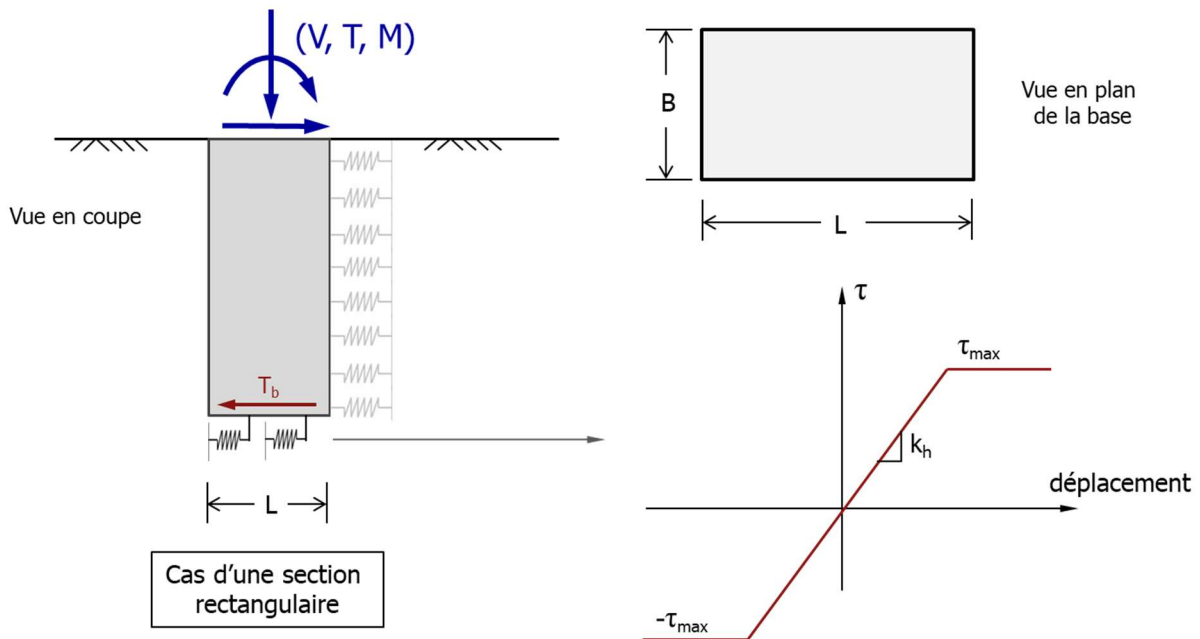


Figure 13 : Loi de mobilisation de la réaction tangentielle à la base de la fondation pour une section rectangulaire

La valeur de k_h peut être estimée par corrélation avec k_v à partir des solutions d'élasticité (voir §4.4). 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 1,0) 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} :

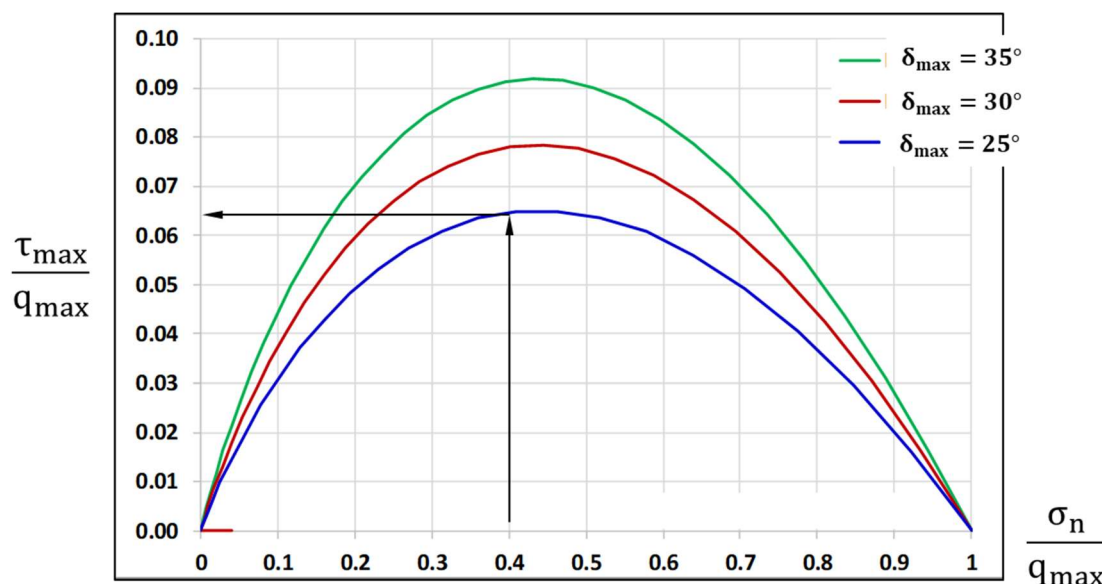


Figure 14 : Diagramme de stabilité cisaillement/compression à la base de la fondation

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.

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 trois équations :

- Bilan des forces verticales $V + W = R_s + R_{b,v}$
- Bilan des forces horizontales $T + Q_{ext} = R_f + R_t + R_{b,h}$
- Bilan des moments $M + M_A(Q_{ext}) = M_A(R_f) + M_A(R_t) + M_A(R_{b,h}) + M_A(R_{b,v})$

Où

- V, T, M effort vertical, horizontal et moment appliqués en tête de la fondation ;
- R_s résultante du frottement axial mobilisé le long du fût (si activé) ;
- $R_{b,v}$ résultante de la réaction verticale du terrain à la base de la fondation ;
- R_f résultante de la réaction frontale du terrain le long du fût;
- R_t résultante de la réaction tangentielle horizontale le long du fût (si activée);
- $R_{b,h}$ résultante de la réaction tangentielle à la base de la fondation (si activée) ;
- Q_{ext} résultante de charges réparties horizontales s'appliquant sur le fût;
- $M_A(X)$ moment par rapport à A de la réaction X, où A désigne la tête de la fondation.

3.4.2. Champ de déplacement

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

- Le tassement en tête noté s_0 ;
- La flèche horizontale en tête notée w_0 ;
- La rotation de la fondation (dans le plan de travail) notée θ_0 .

On a en particulier :

- Le déplacement horizontal le long du fût $w(z) = w_0 + \theta_0 (z - Z_0)$
- Le tassement de la base (à $z = Z_{base}$) $s(x) = s_0 + \theta_0 x$

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 (§3.4.2) 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 3 degrés de liberté du système $[s_0, w_0, \theta_0]$.

L'équilibre statique de la fondation peut ensuite être écrit sous forme matricielle :

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F} - \mathbf{P}_0$$

Avec :

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} s_0 \\ w_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} \text{ et } \mathbf{F} = \begin{pmatrix} V + W \\ T + Q_{\text{ext}} \\ M + M_A(Q_{\text{ext}}) \end{pmatrix}$$

Et :

- **K** Matrice de rigidité équivalente (3 x 3) constituée par intégration des termes de rigidité (raideur tangente) des lois de mobilisation de la réaction du terrain ;
- **U** Vecteur déplacement équivalent (3 x 1);
- **F** Vecteur chargement extérieur équivalent (3 x 1);
- **P₀** Vecteur « plastique » équivalent (3 x 1) constitué par intégration des termes plastiques des lois de mobilisation de la réaction du terrain (ordonnées à l'origine de la tangente à la courbe de mobilisation).

Une procédure itérative permet ensuite d'actualiser **K** et **P₀** (par conséquent **U**) en ajustant les termes de rigidité et plastiques dans chaque élément et pour chaque composante de la loi de mobilisation de la réaction du terrain.

3.4.4. Résultats

La résolution du système permet d'établir :

- Les déplacements de la fondation : tassement, flèche horizontale et rotation ;
- Les sollicitations internes (effort normal, effort tranchant et moment fléchissant) dans le corps de la fondation ;
- La réaction du terrain le long du fût de la fondation : pression frontale ou tangentielle, et frottement axial éventuel ;
- Le torseur $(V, T, M)_{\text{pied}}$ repris à la base de la fondation et le diagramme de contraintes locales associées : contrainte verticale maximale, contrainte verticale minimale, taux de

compression (rapport entre l'aire comprimée et l'aire d'assise totale) selon les conventions de la figure suivante.

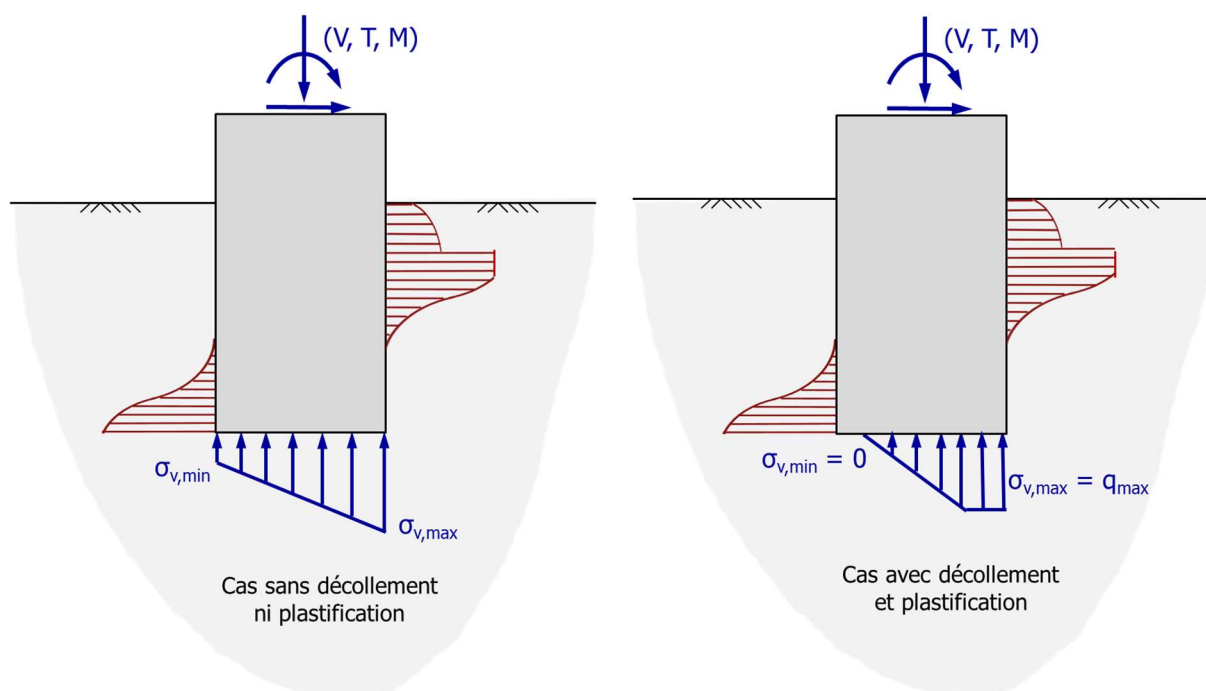


Figure 15 : conventions pour la représentation de la réaction verticale du terrain sous la fondation

4. Mise en œuvre pratique

4.1. Loi de réaction frontale

4.1.1. 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 :

- E_M module pressiométrique de Ménard ;
- α coefficient rhéologique (NF P 94 261) ;
- μ_i coefficient multiplicateur dépendant du type de sollicitation ;
- $\lambda_c \lambda_d$ coefficients de forme dépendant du rapport D/B_{eq} de la fondation ;
- B_0 dimension de référence prise égale à 0,6 m ;

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

Les valeurs de μ_i ainsi que celles des paliers plastiques p_{f1} et p_{f2} sont données dans le tableau ci-dessous.

Type de sollicitation	Statique longue durée	Statique courte durée	Accidentel	Sismique
μ_1	1	2	2	2 à 6
μ_2	0	0	$\mu_1/2$	$\mu_1/2$
p_{f1}	p_{fluage}	p_{fluage}	p_{fluage}	p_{fluage}
p_{f2}	p_{fluage}	p_{fluage}	p_{limite}	p_{limite}

Tableau 2 : 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.

4.1.2. A partir des propriétés pénétrométriques (CPT)

On utilise les notations de la Figure 4. 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 :

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

Où :

- q_c résistance de cône pénétrométrique ;
- β facteur de corrélation fonction du type de terrain ;
- α coefficient rhéologique fonction du type de terrain ;
- μ_i coefficient multiplicateur dépendant du type de sollicitation (Tableau 2) ;
- $\lambda_c \lambda_d$ coefficients de forme dépendant du rapport D/B_{eq} de la fondation (Tableau 1) ;
- B_0 dimension de référence prise égale à 0,6 m.

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 3 : 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 2. 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 4 : Valeurs des facteurs de corrélation β_1 et β_2

4.1.3. 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.

4.2. Loi de réaction tangentielle le long du fût

4.2.1. A partir des propriétés pressiométriques (PMT)

On utilise les notations de la Figure 6. 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 p_{t1} et p_{t2} sont données dans le tableau ci-dessous.

Type de sollicitation	Statique	Sismique
$\mu_{t,1}$	1	1 à 3
$\mu_{t,2}$	$\frac{\mu_{t,1}}{5}$	$\frac{\mu_{t,1}}{5}$
p_{t1}	$\frac{q_{sl}}{2}$	$\frac{q_{sl}}{2}$
p_{t2}	q_{sl}	q_{sl}

Tableau 5 : Coefficients $\mu_{t,i}$ et paliers plastique $p_{t,i}$ pour la réaction tangentielle

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

4.2.2. A partir des propriétés pénétrométriques (CPT)

On utilise les notations de la Figure 6. 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 p_{t1} et p_{t2} sont données dans le Tableau 5.

4.2.3. A partir des propriétés d'élasticité

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

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

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

4.3.1. A partir des propriétés pressiométriques (PMT)

On utilise les notations de la Figure 10 et la Figure 11. 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 ;

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 6 : Coefficients de forme λ_c et λ_d pour la loi de mobilisation de la 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.

Type de sollicitation	Statique longue durée	Statique courte durée	Accidentel	Sismique
μ_v	1	2	2	2 à 6
q_{max}	p_{fluage}	p_{fluage}	p_{limite}	p_{limite}

Tableau 7 : Valeurs du facteur μ_v et du palier plastique q_{max}

Où p_{fluage} et p_{limite} sont respectivement la pression de fluage nette (p_r^*) et la pression limite nette (p_l^*) mesurées à l'essai pressiométrique.

4.3.2. A partir d'un essai CPT

On utilise les notations de la Figure 10 et la Figure 11. 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 3) ;
- α coefficient rhéologique fonction du type de terrain (voir Tableau 3) ;

- μ_v coefficient multiplicateur dépendant du type de sollicitation ;
- $\lambda_c \lambda_d$ coefficients de forme (voir Tableau 6) ;
- B_0 dimension de référence prise égale à 0,6 m ;

Les valeurs de μ_v ainsi que celles du palier plastique q_{\max} sont obtenues selon les indications du Tableau 7. Dans le cas particulier 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 4 (NF P 94 262):

4.3.3. 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 $L \times B$:

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

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

On utilise les notations de la Figure 12 et la Figure 13. Le coefficient de réaction tangentielle à la base de la fondation k_h peut être relié analytiquement au coefficient de réaction verticale k_v (§4.3) 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.

4.5. Justifications à mener

4.5.1. 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.

4.5.2. 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 calculé en pied (V_{pied} , T_{pied} , M_{pied}). 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 (à la source) un facteur partiel de sécurité égal à 2, sur le palier plastique q_{max} de la loi de mobilisation de la réaction verticale à la base ;
- en négligeant la contribution de la réaction tangentielle à la base de la fondation.

L'obtention d'un équilibre stable par cette approche enveloppe dispense alors du passage par FONDSUP pour la vérification de capacité portante.