

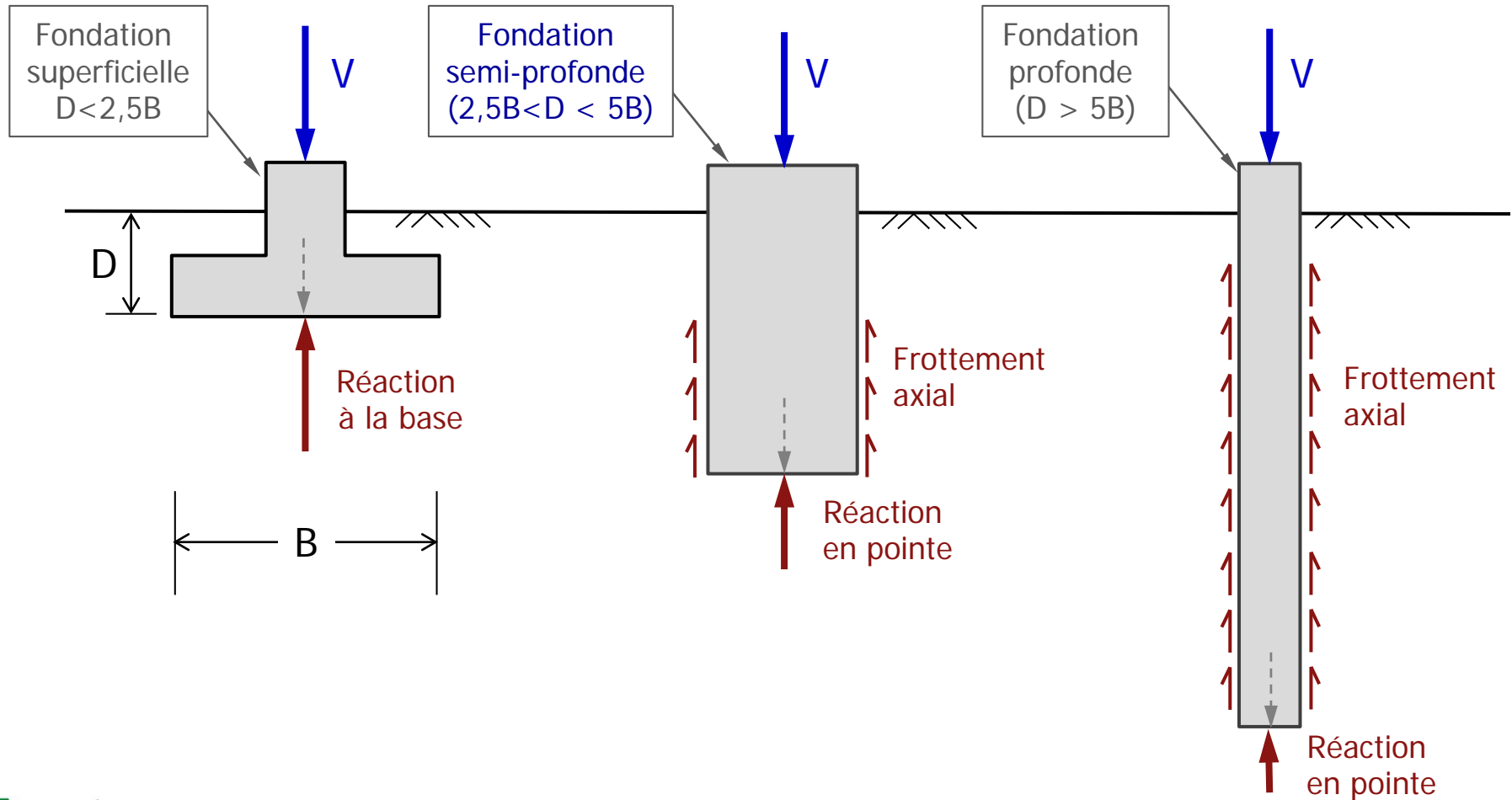
SEMIPROF : calcul non-linéaire d'une fondation
semi-profonde sous chargement combiné

Sommaire

- ⇒ Domaine d'application
- ⇒ Principe de modélisation
- ⇒ Mise en œuvre dans Foxta v4
- ⇒ Exercices d'application

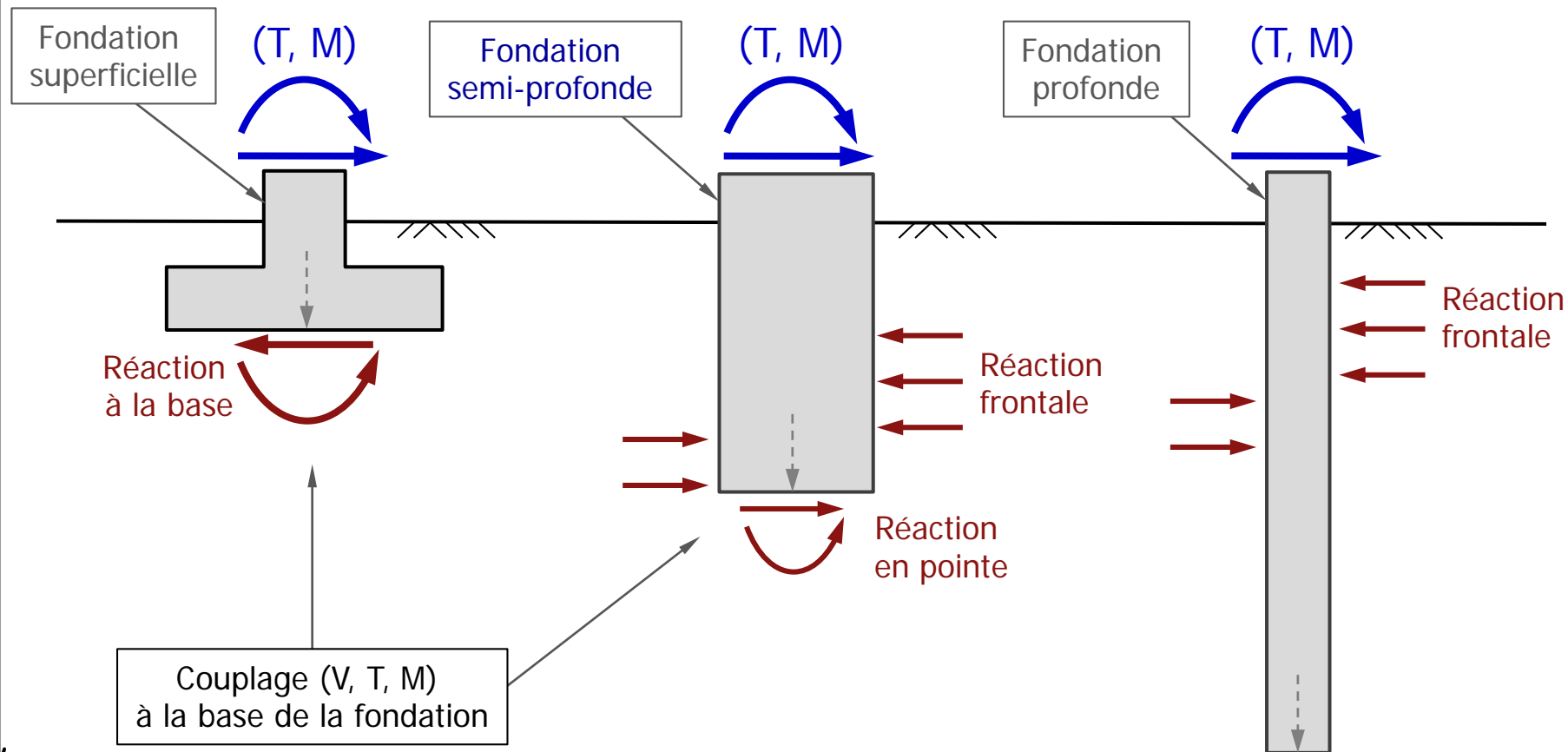
Domaine d'application

⇒ Concept de fondation semi-profonde



Domaine d'application

⇒ Concept de fondation semi-profonde



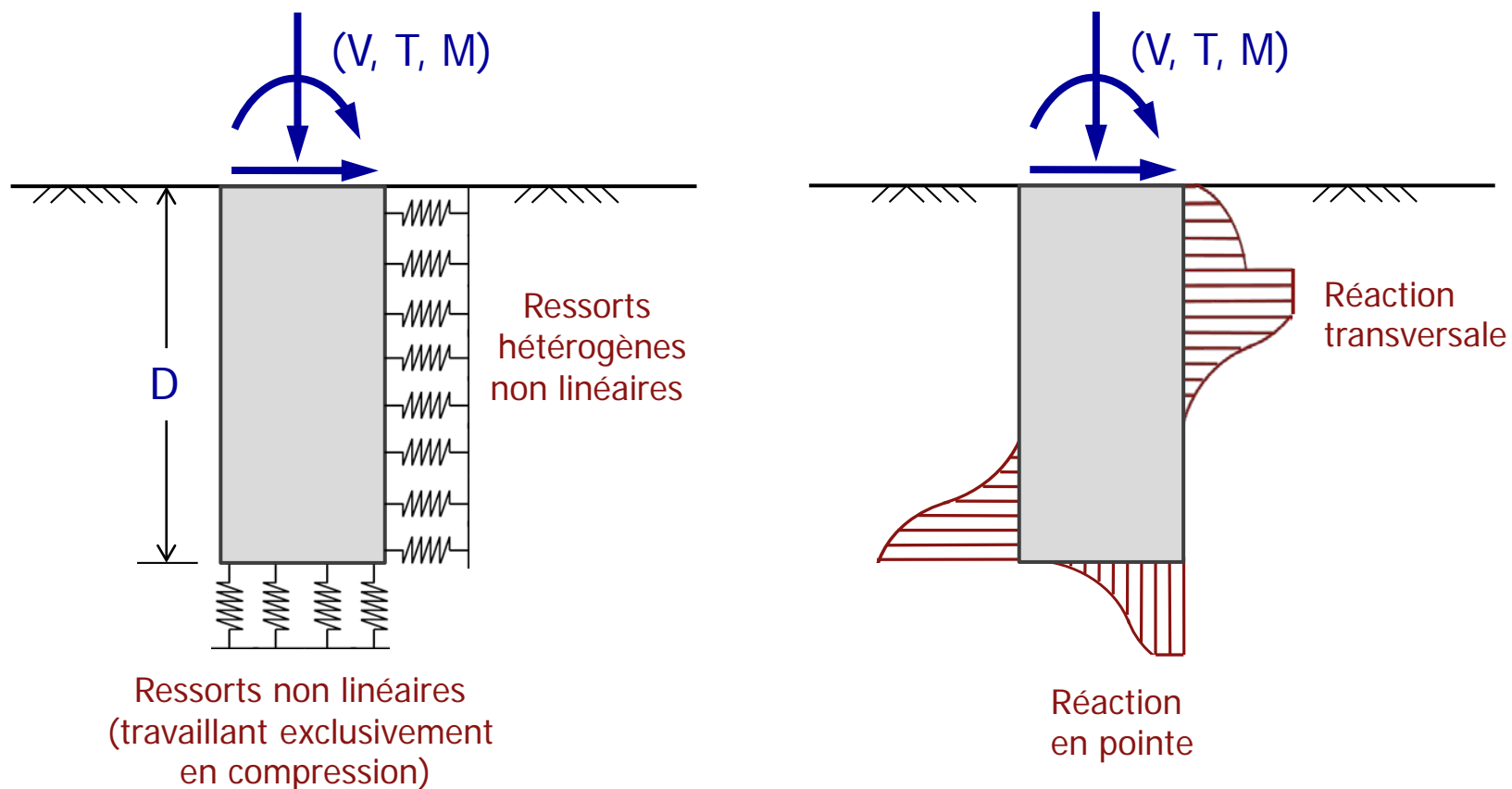
Domaine d'application

⇒ La démarche de justification

- 1) Fondation semi-profonde est une fondation superficielle avec mobilisation d'une réaction frontale dans l'équilibre des charges transversales
- 2) SemiProf permet d'établir par un modèle en déplacements les contributions respectives de « la base » et du « fût » tenant compte des effets de non-linéarité éventuels (plastification, décollement etc.)
- 3) SemiProf => déplacements, efforts internes (STR) et torseur à la base. Ce dernier doit servir ensuite de donnée d'entrée à une justification de portance combinée sous FondSup

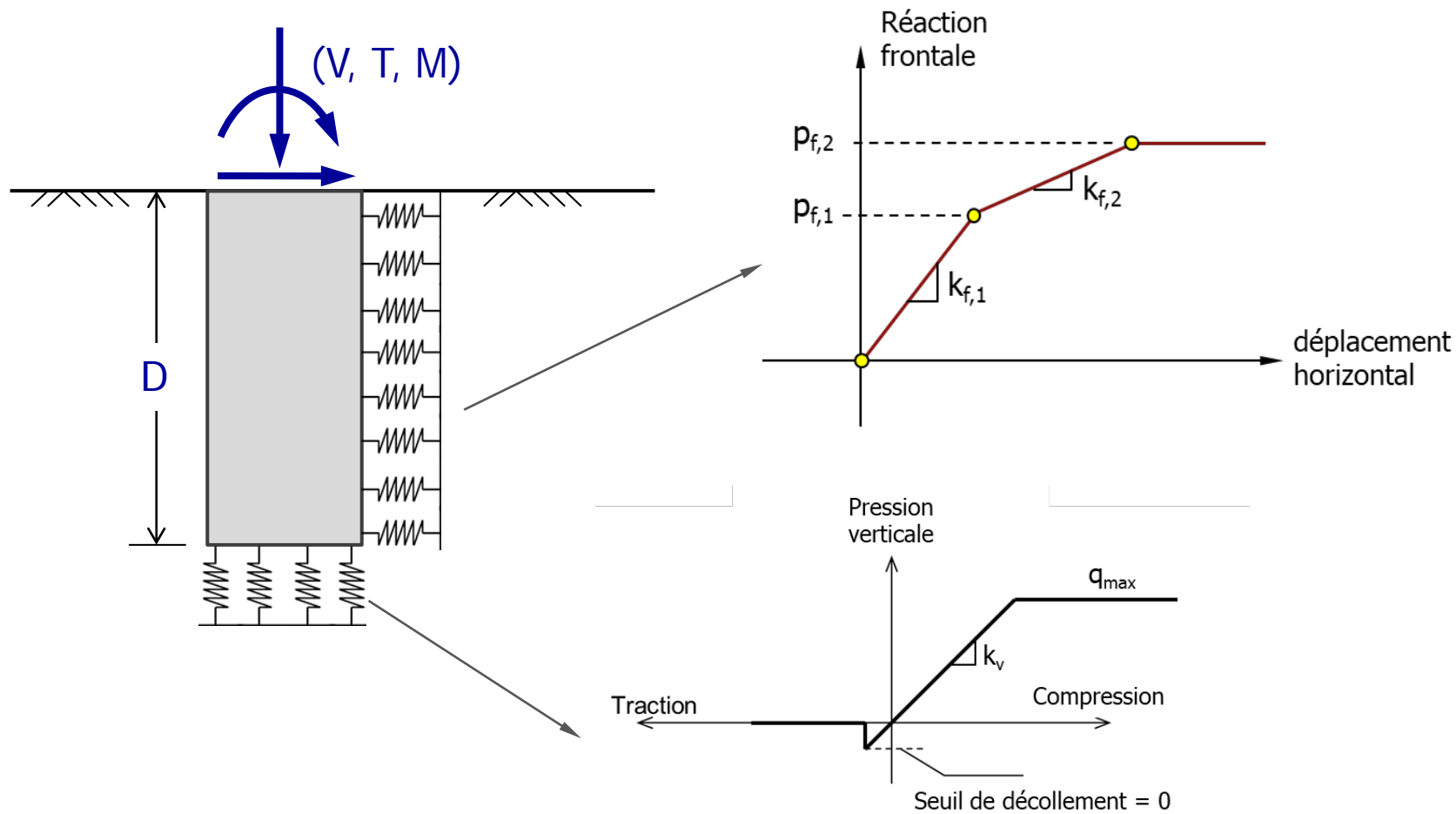
Principe de modélisation

⇒ Modèle de Winkler généralisé (multicouche, non-linéaire)



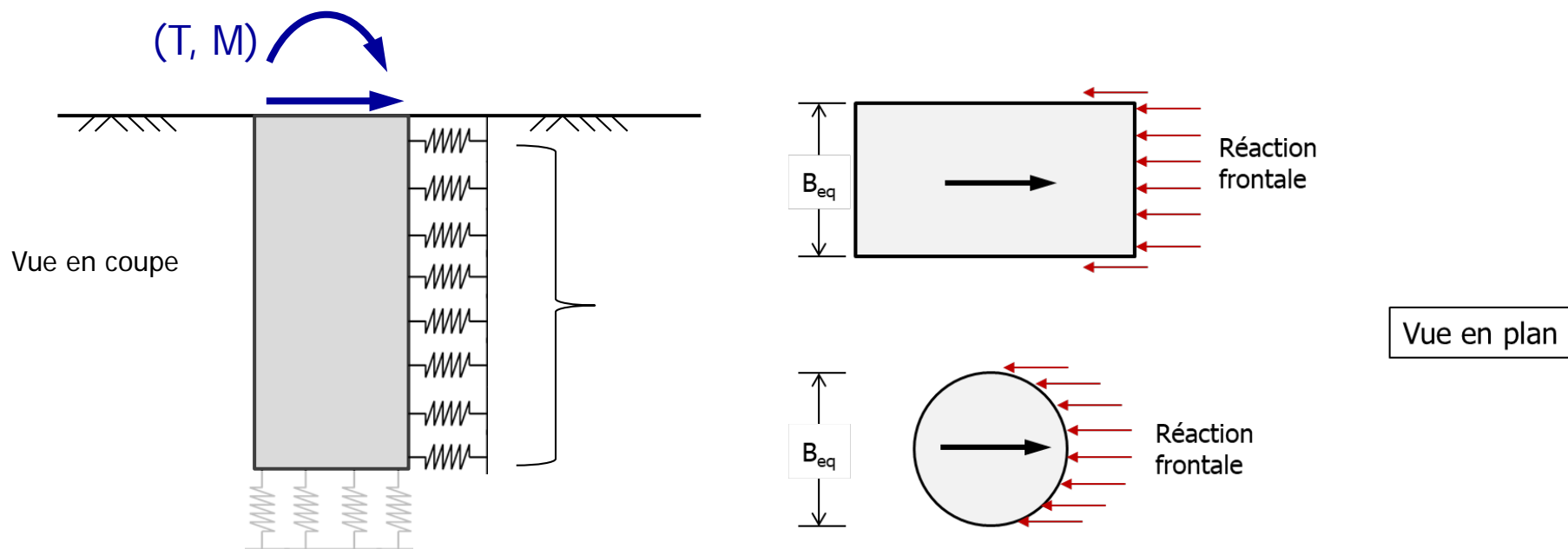
Principe de modélisation

⇒ Modèle de Winkler généralisé (multicouche, non-linéaire)



Principe de modélisation

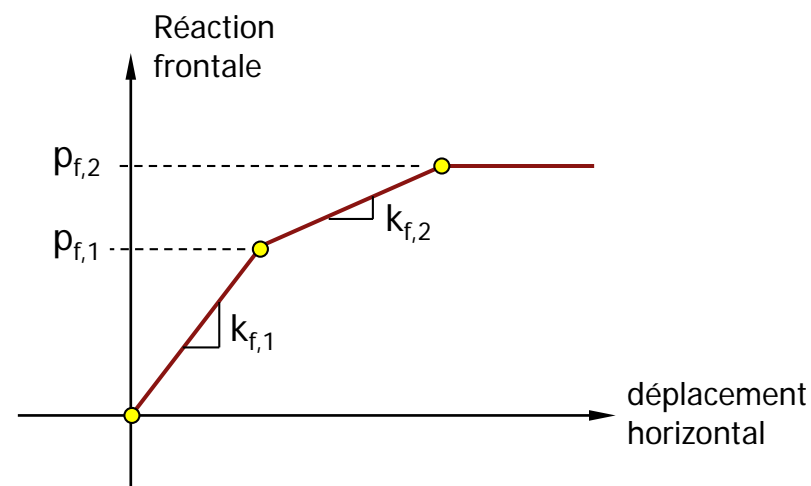
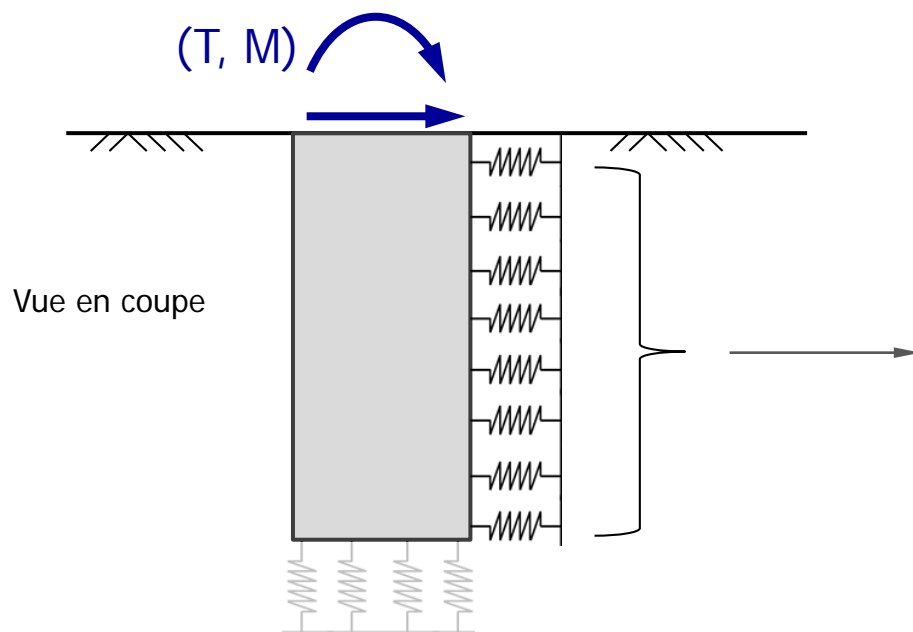
⇒ Loi de réaction transversale : pression – déplacement



Construction comparable à celle des lois p-y pour fondations profondes

Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction transversale : pression – déplacement

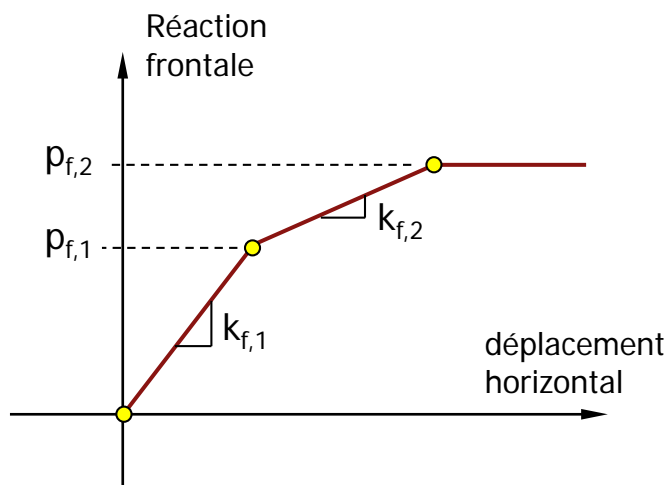


$k_{f,i}$ = coefficient de réaction kPa/m
 $p_{f,i}$ = pression en kPa

Construction comparable à celle des lois p-y pour fondations profondes

Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction transversale : pression – déplacement



$k_{f,i}$ = coefficient de réaction kPa/m
 $p_{f,i}$ = pression en kPa

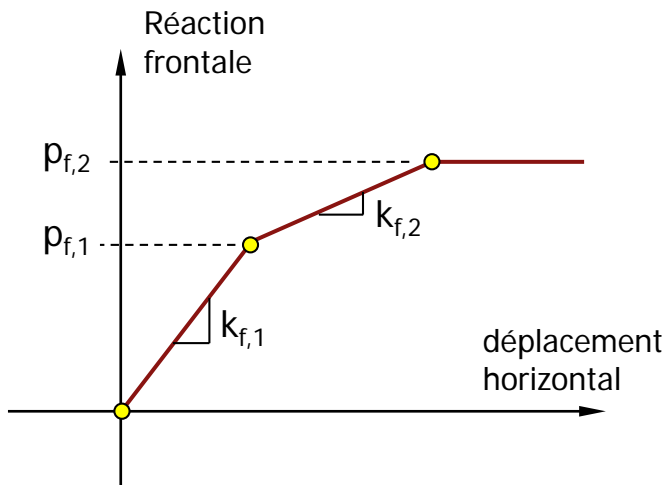
$$k_{f,i} = \mu_i \frac{9E_M}{\lambda_c B_{eq} \alpha + 2B_0 \left(\frac{\lambda_d B_{eq}}{B_0} \right)^\alpha}$$

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

Construction à partir de l'essai pressiométrique (PMT)

Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction transversale : pression – déplacement



$k_{f,i}$ = coefficient de réaction kPa/m
 $p_{f,i}$ = pression en kPa

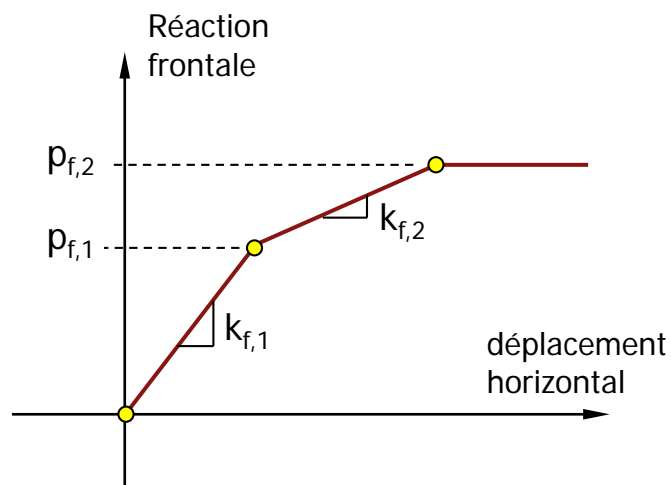
$$k_{f,i} = \mu_i \frac{9E_M}{\lambda_c B_{eq} \alpha + 2B_0 \left(\frac{\lambda_d B_{eq}}{B_0} \right)^\alpha}$$

	Statique LT	Statique CT	Accidentel	Sismique
μ_1	1	2	2	2 à 6
μ_2	0	0	$\mu_1/2$	$\mu_1/2$
$p_{f,1}$	p_{fluage}	p_{fluage}	p_{fluage}	p_{fluage}
$p_{f,2}$	p_{fluage}	p_{fluage}	p_{limite}	p_{limite}

Construction à partir de l'essai pressiométrique (PMT)

Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction transversale : pression – déplacement



$k_{f,i}$ = coefficient de réaction kPa/m

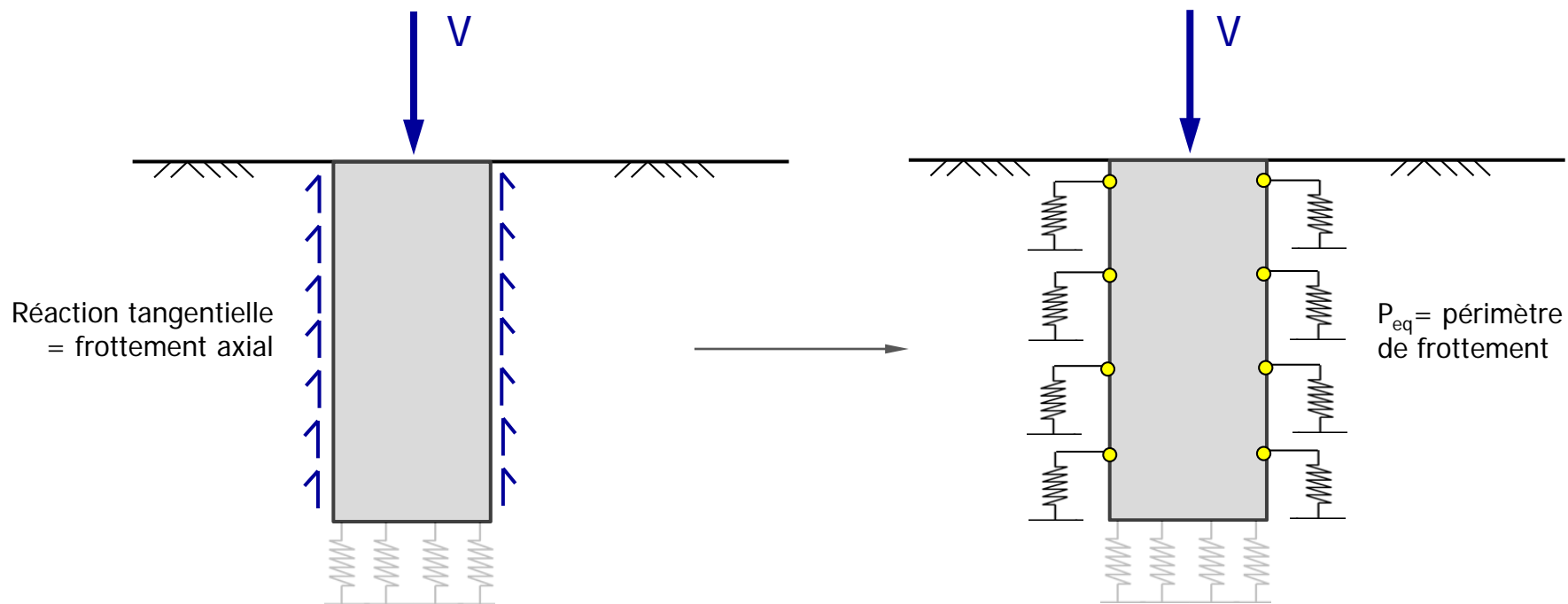
$p_{f,i}$ = pression en kPa

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

Construction à partir des solutions en élasticité (G, ν) – Gazetas (1991)

Principe de modélisation

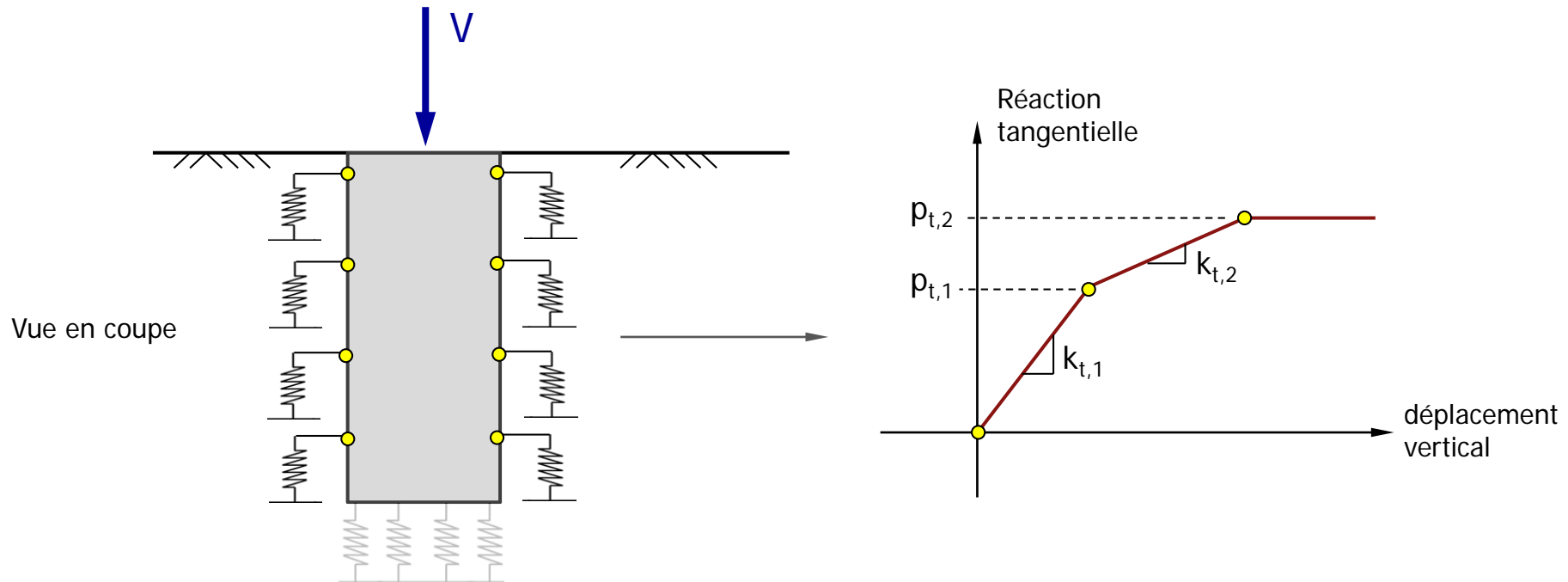
⇒ Loi de réaction tangentielle (verticale) : frottement – tassement



Construction similaire à celle des fondations profondes sous charge axiale

Principe de modélisation

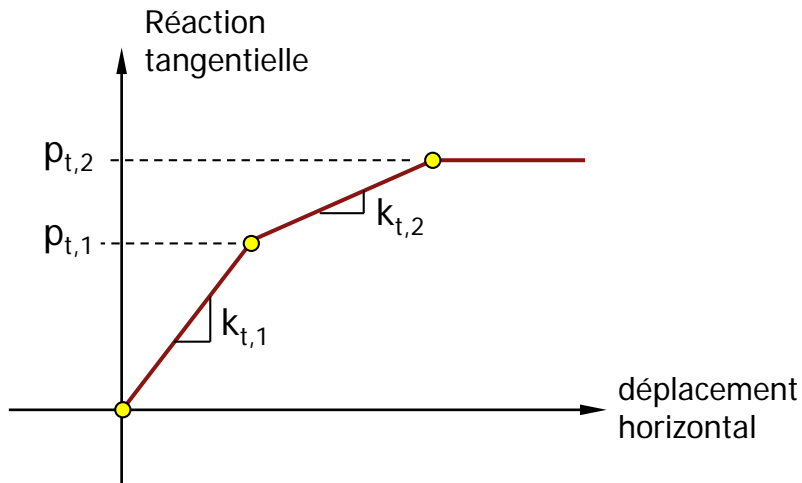
⇒ Loi de réaction tangentielle (verticale) : frottement – tassement



Construction similaire à celle des fondations profondes sous charge axiale

Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction tangentielle (verticale) : frottement – tassement



$k_{t,i}$ = coefficient de réaction kPa/m
 $p_{t,i}$ = frottement en kPa

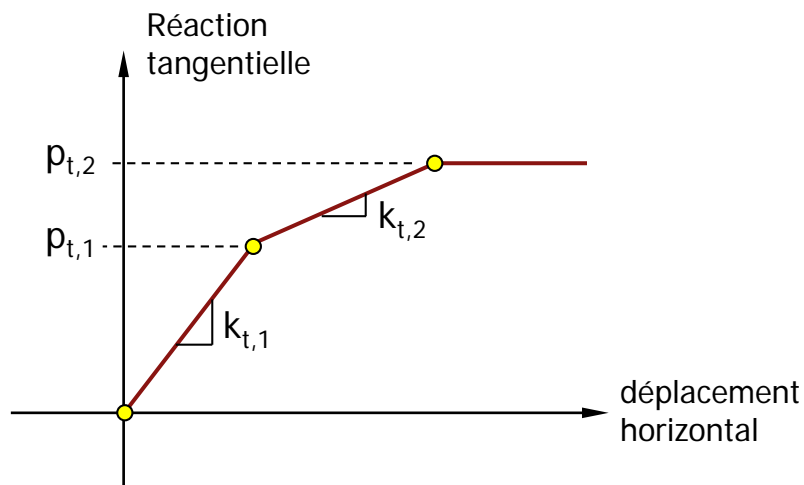
$$k_{t,i} = \mu_i \frac{2\pi E_M}{P_{eq}} \quad \text{Sol fin}$$

	Statique	Sismique
μ_1	1,0	1,0 à 3,0
μ_2	$\mu_1/5$	$\mu_1/5$
$p_{t,1}$	$q_{sl}/2$	$q_{sl}/2$
$p_{t,2}$	q_{sl}	q_{sl}

Construction à partir de l'essai pressiométrique (PMT)

Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction tangentielle (verticale) : frottement – tassement



$k_{t,i}$ = coefficient de réaction kPa/m
 $p_{t,i}$ = frottement en kPa

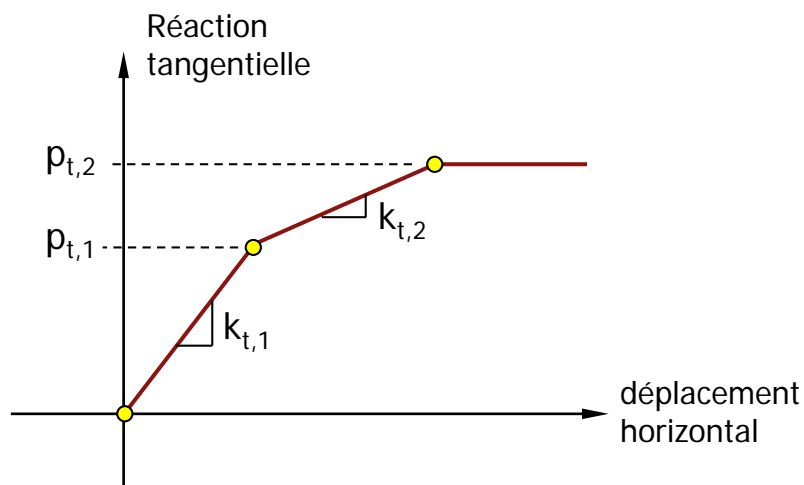
$$k_{t,i} = \mu_i \frac{4\pi E_M}{5P_{eq}} \quad \text{Sol granulaire}$$

	Statique	Sismique
μ_1	1,0	1,0 à 3,0
μ_2	$\mu_1/5$	$\mu_1/5$
$p_{t,1}$	$q_{sl}/2$	$q_{sl}/2$
$p_{t,2}$	q_{sl}	q_{sl}

Construction à partir de l'essai pressiométrique (PMT)

Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction tangentielle (verticale) : frottement – tassement



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

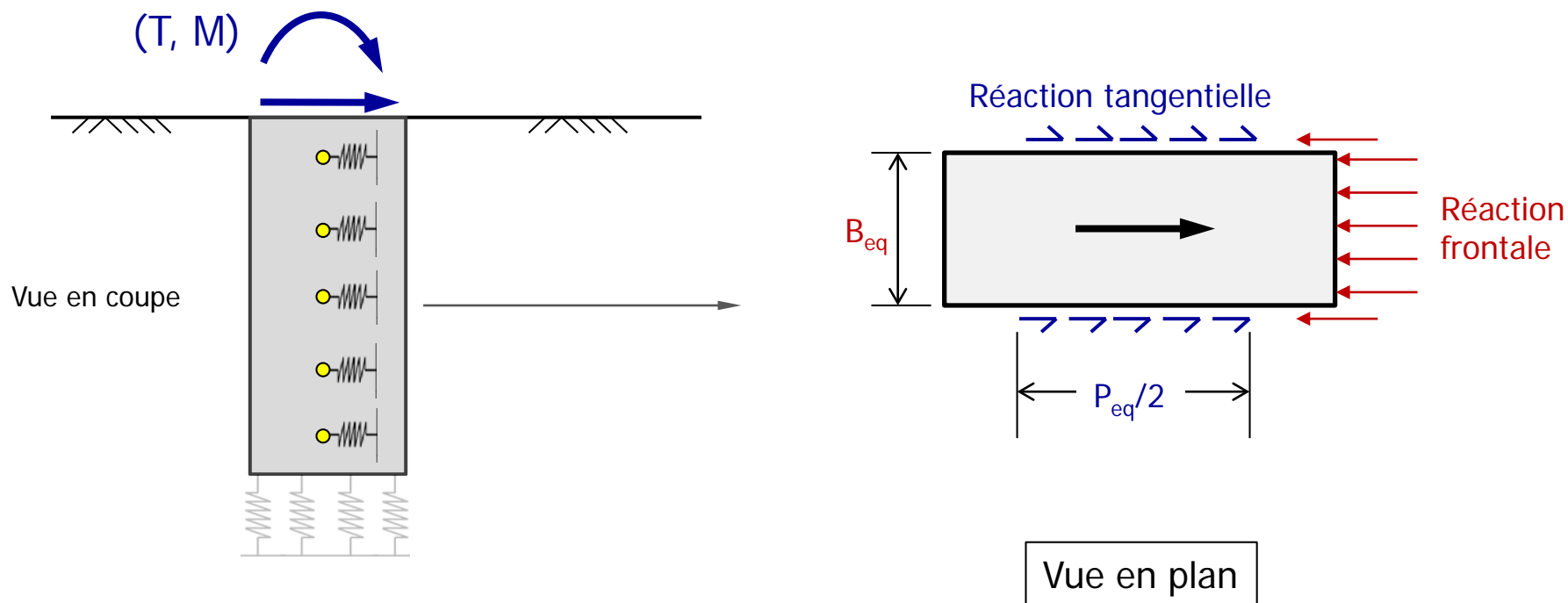
$k_{t,i}$ = coefficient de réaction kPa/m

$p_{t,i}$ = frottement en kPa

Construction à partir des solutions en élasticité (G, ν) – Frank (1984)

Principe de modélisation

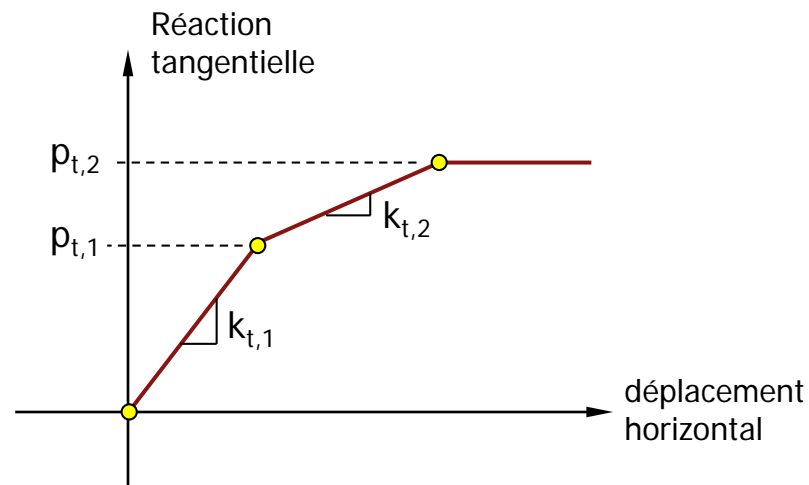
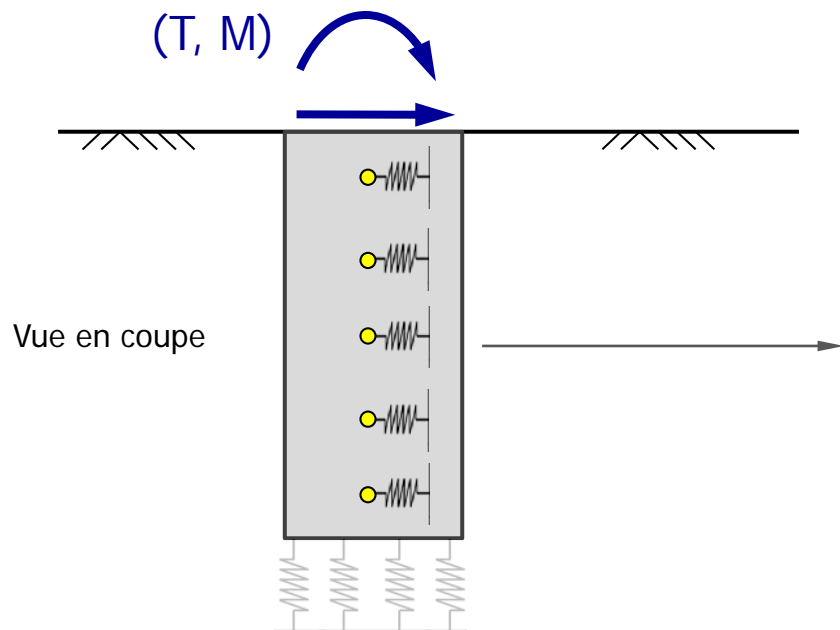
⇒ Loi de réaction tangentielle (horizontale) : frottement – déplacement



Concerne les massifs de section rectangulaire dans des terrains raides en surface

Principe de modélisation

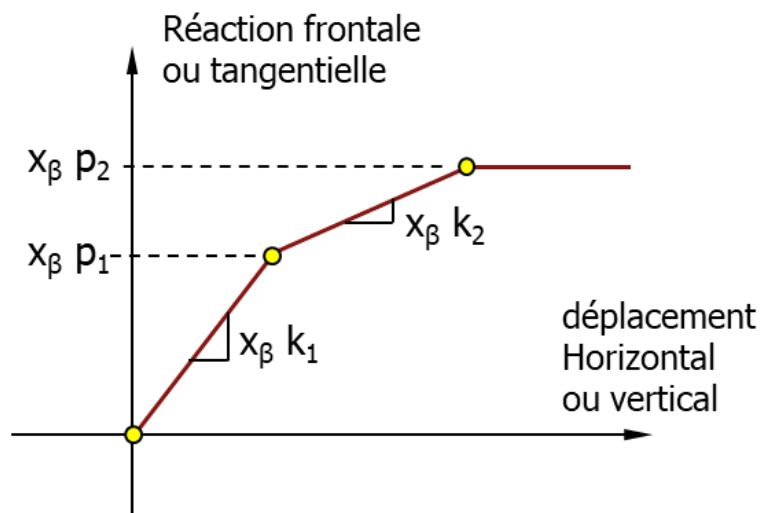
⇒ Loi de réaction tangentielle (horizontale) : frottement – déplacement



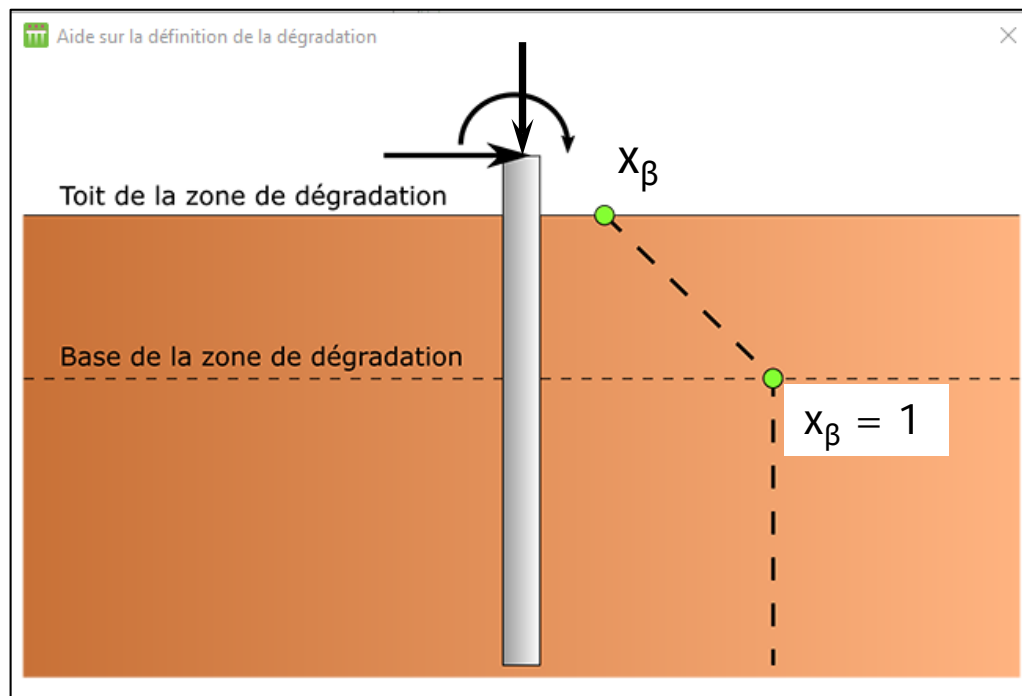
Même construction que pour la loi de frottement axial

Principe de modélisation

⇒ Prise en compte des effets de dégradation en surface

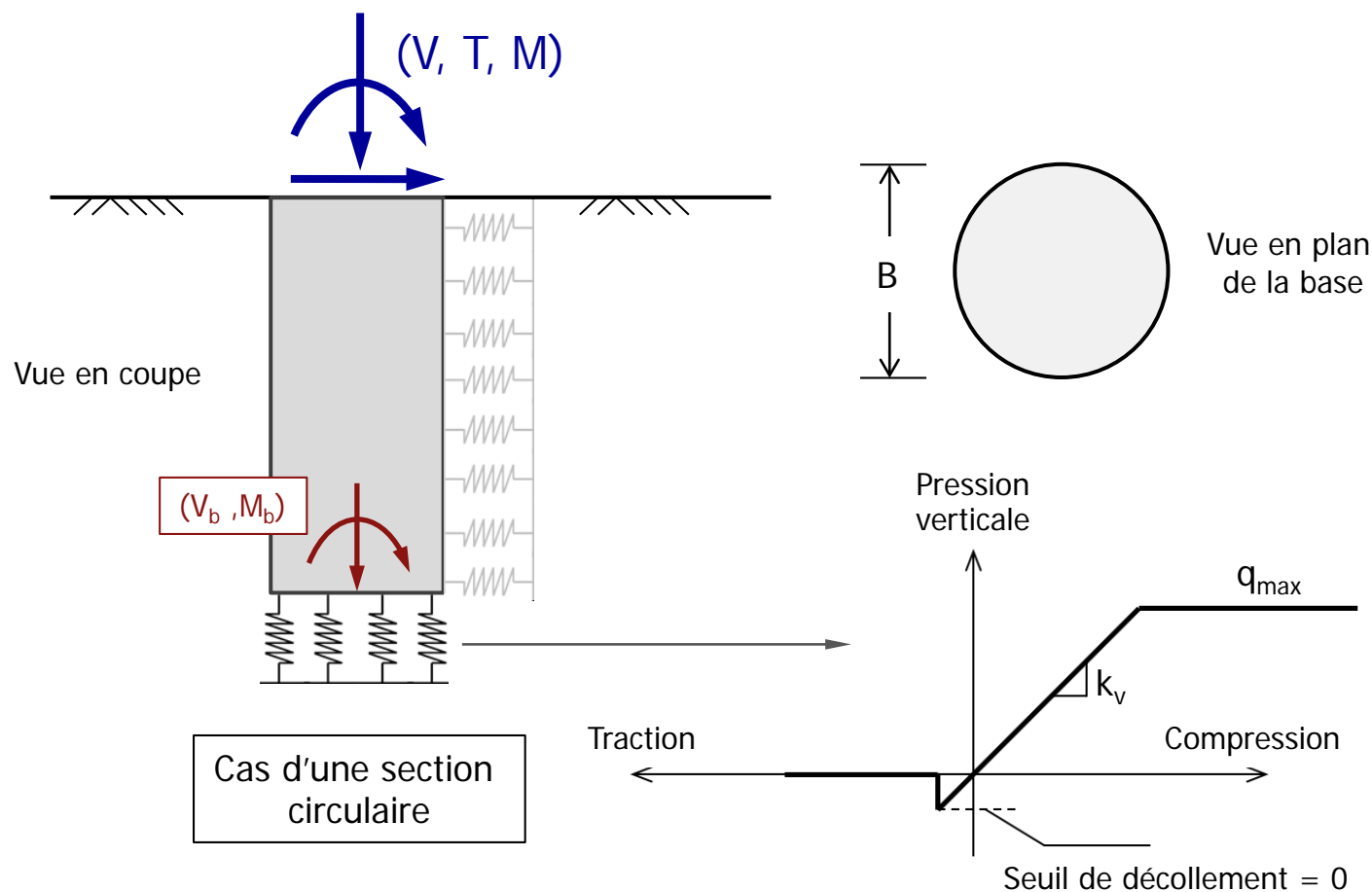


2 à 4 fois le diamètre



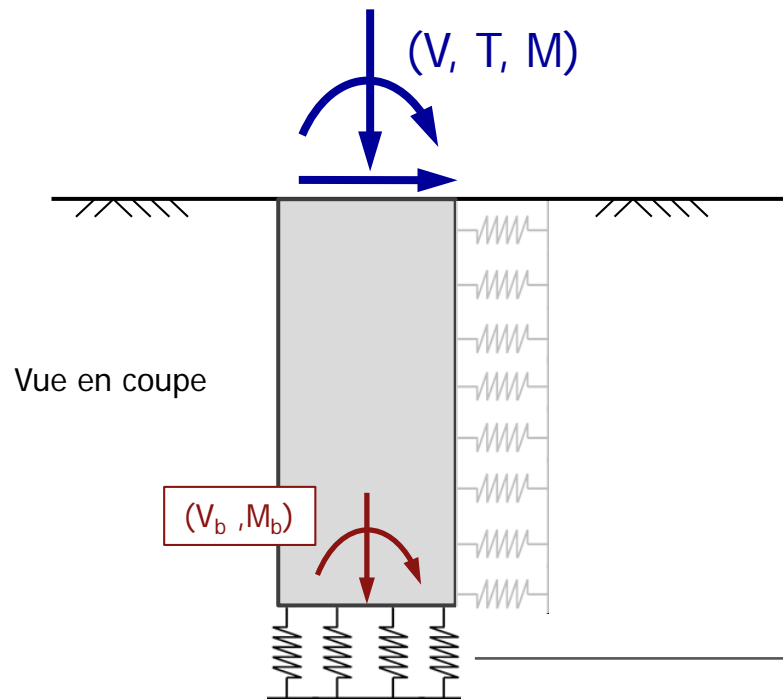
Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction verticale à la base



Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction verticale à la base



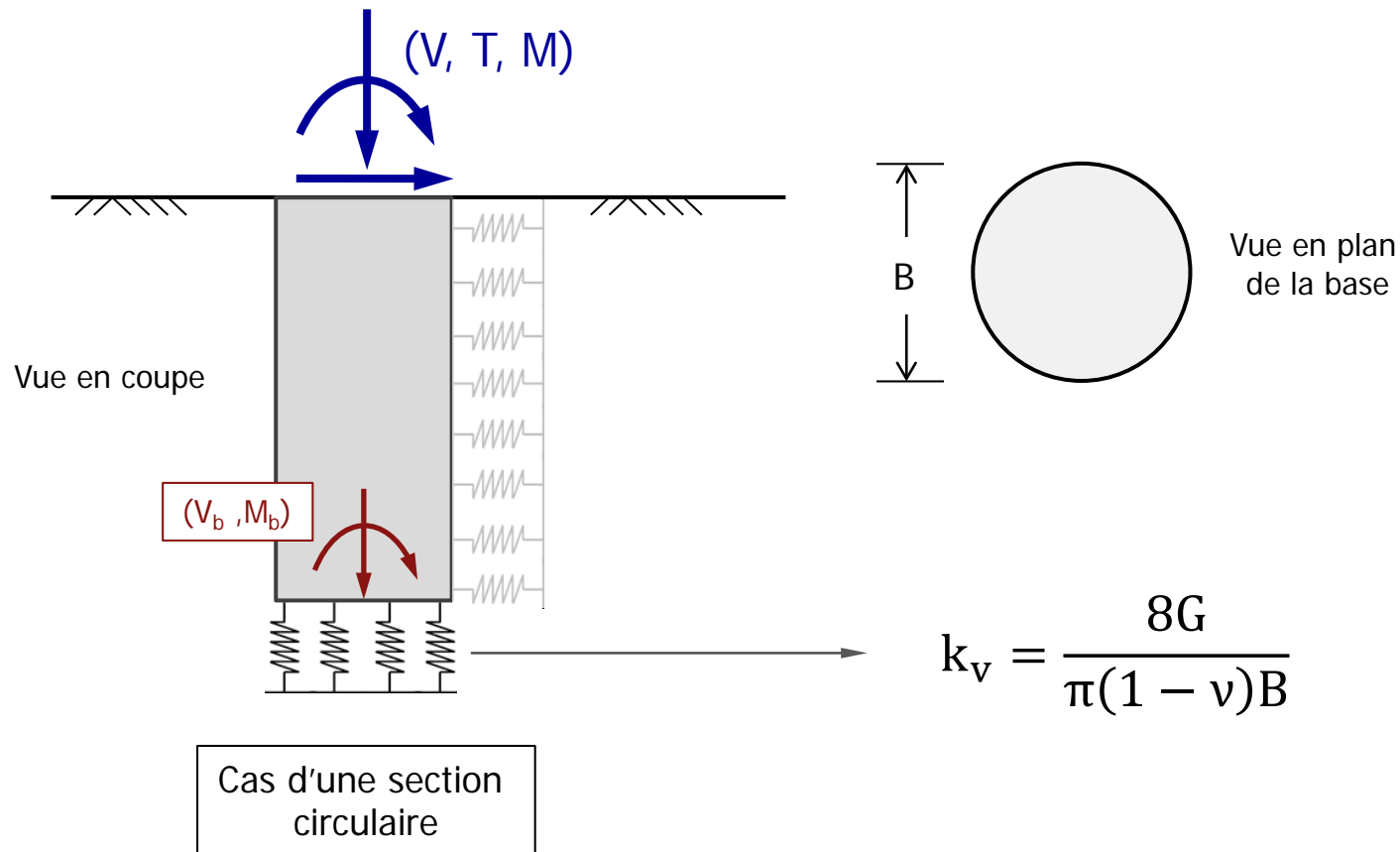
Cas d'une section circulaire

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

	Statique LT	Statique CT	Accidentel	Sismique
μ_v	1	2	2	2 à 6

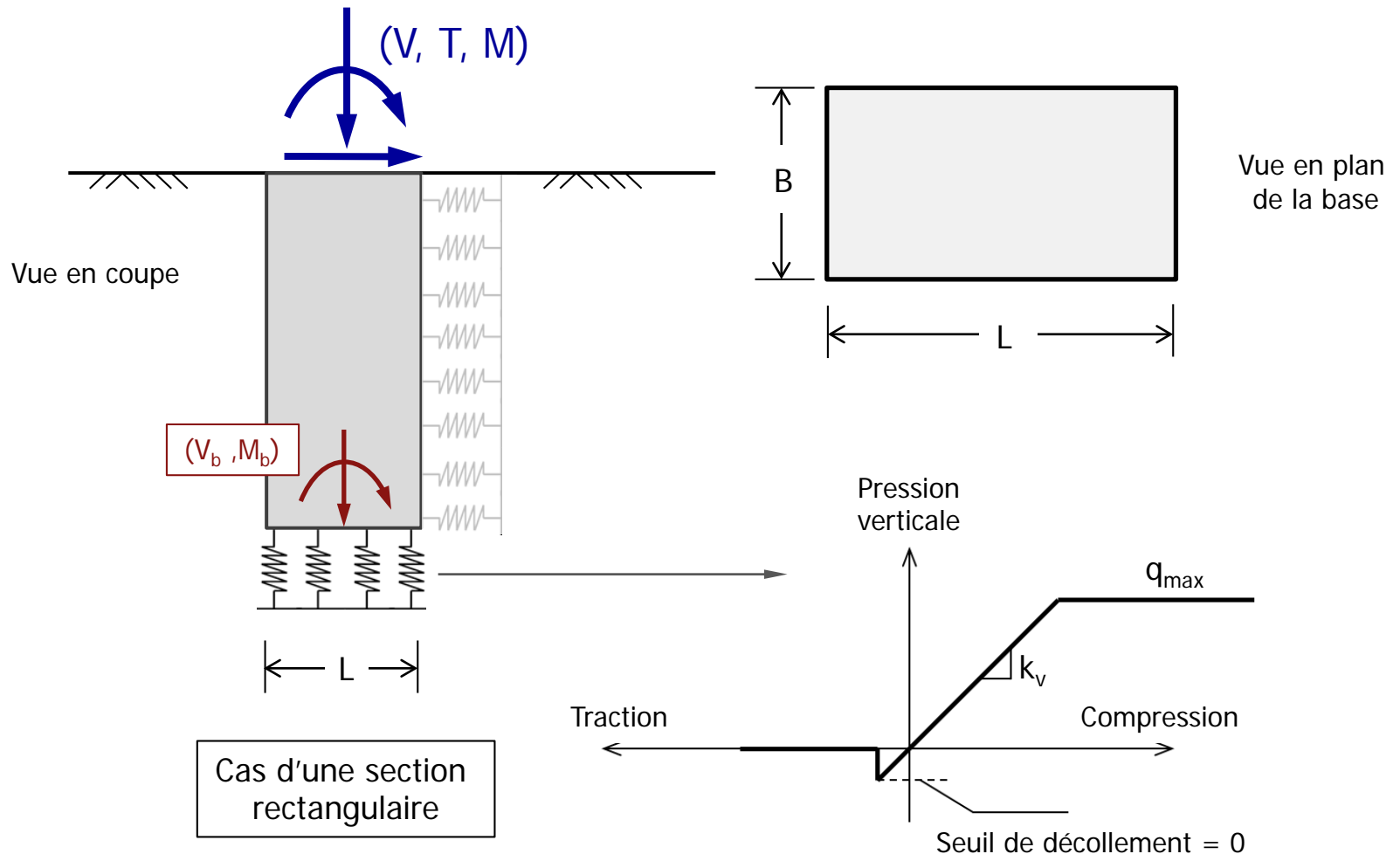
Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction verticale à la base



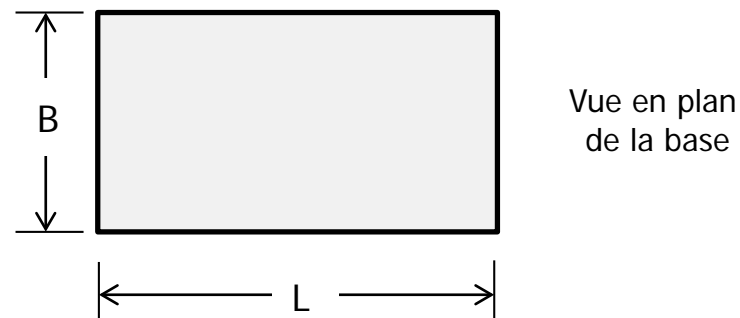
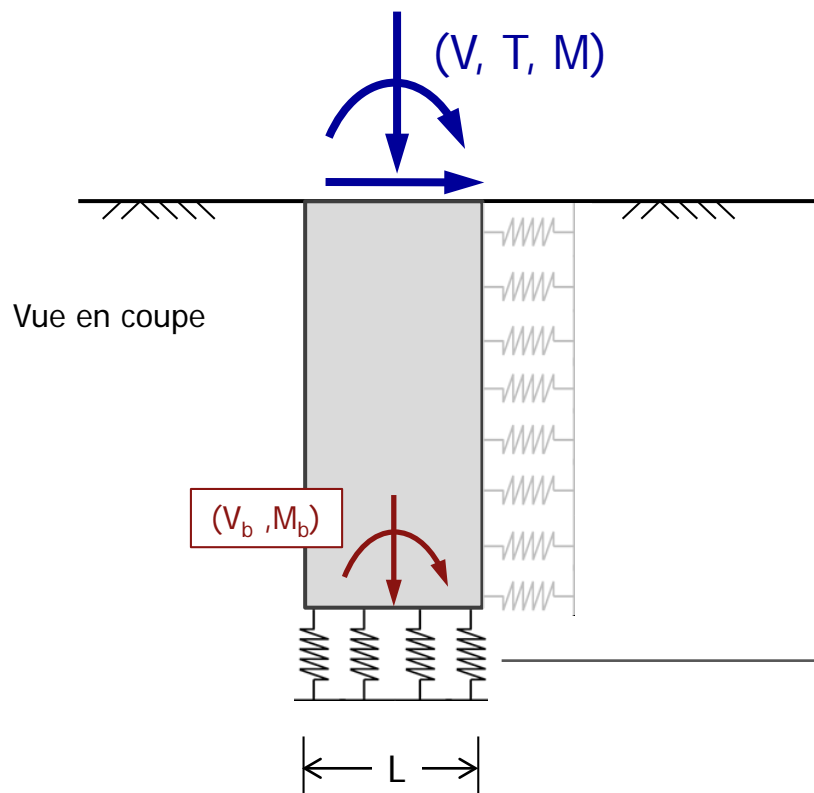
Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction verticale à la base



Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction verticale à la base



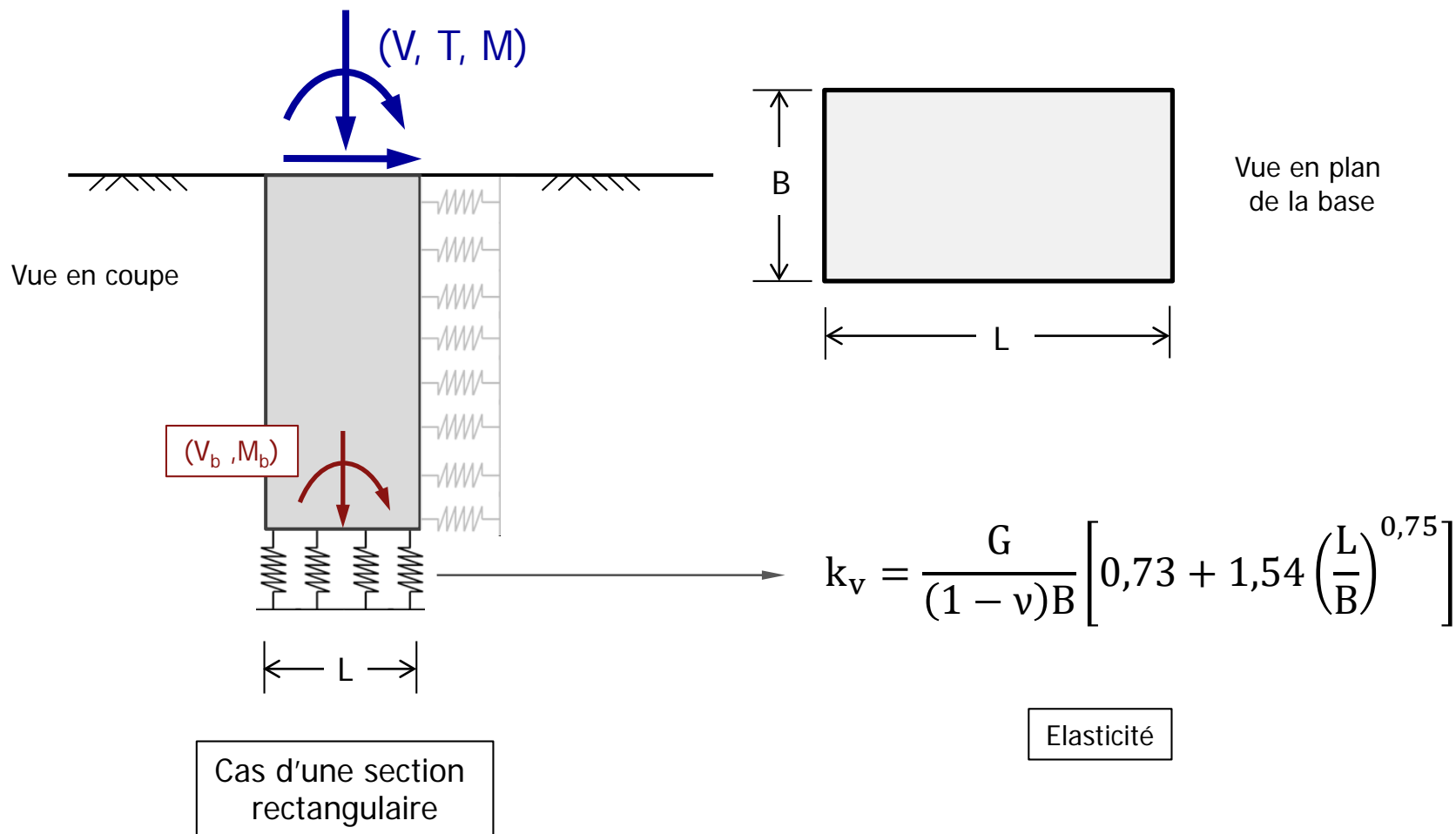
$$k_v = \mu_v \frac{9E_M}{\lambda_c B \alpha + 2B_0 \left(\frac{\lambda_d B}{B_0}\right)^\alpha} \quad \text{PMT}$$

Cas d'une section rectangulaire

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

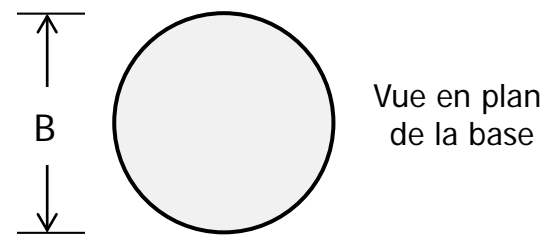
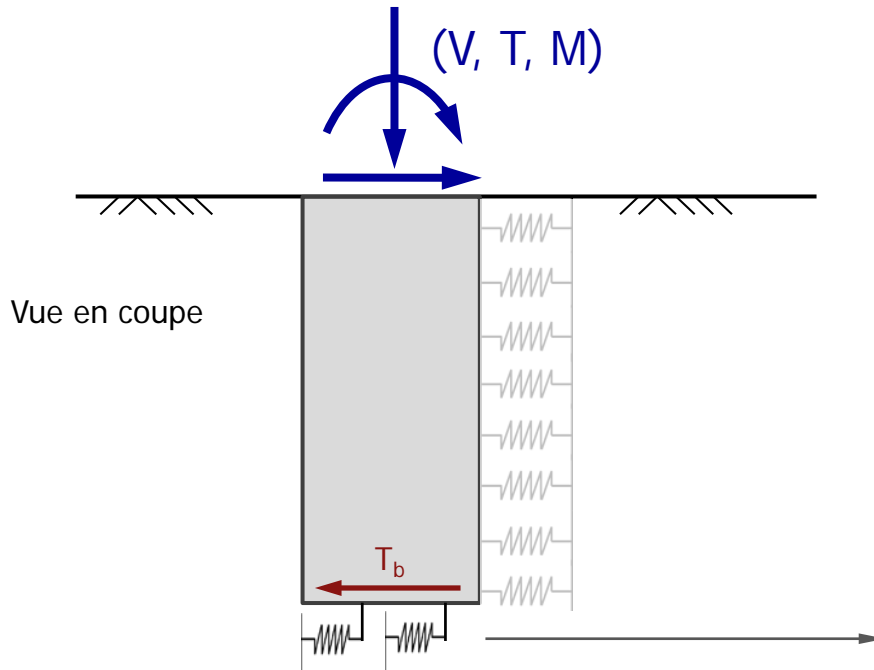
Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction verticale à la base

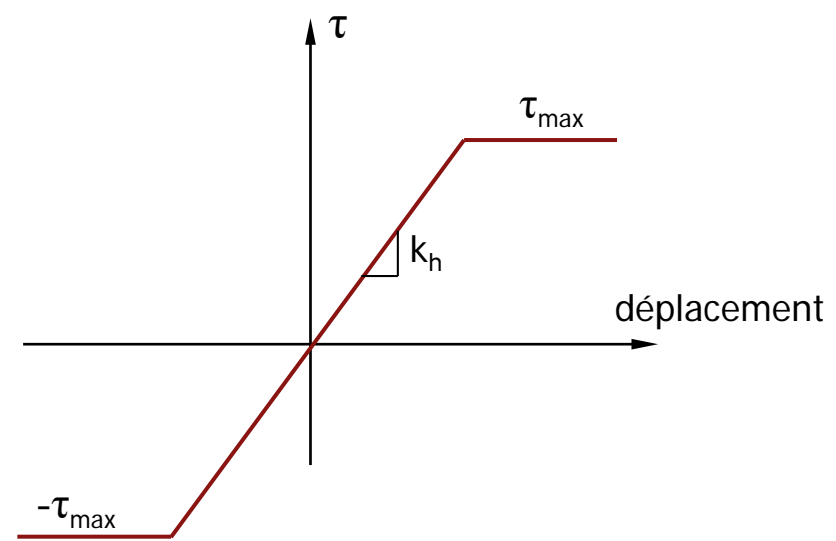


Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction tangentielle en pointe (généralement ignorée)

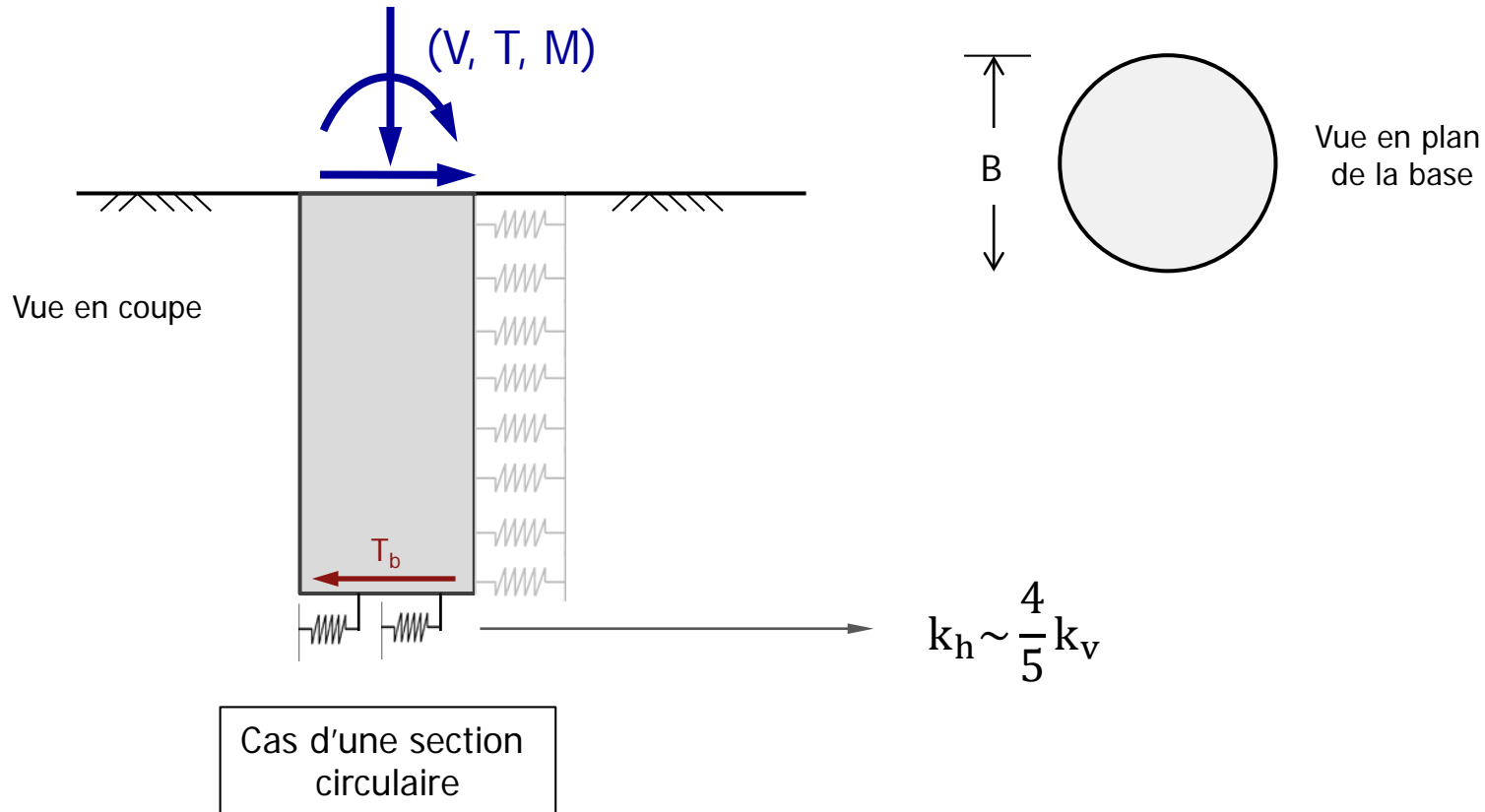


Cas d'une section circulaire



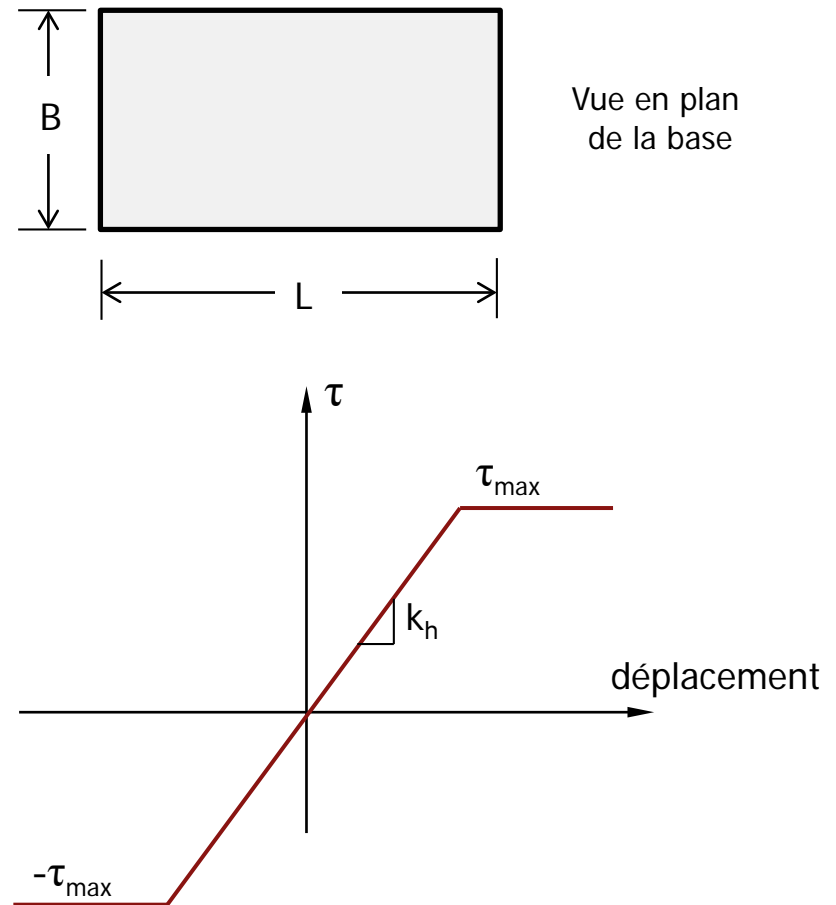
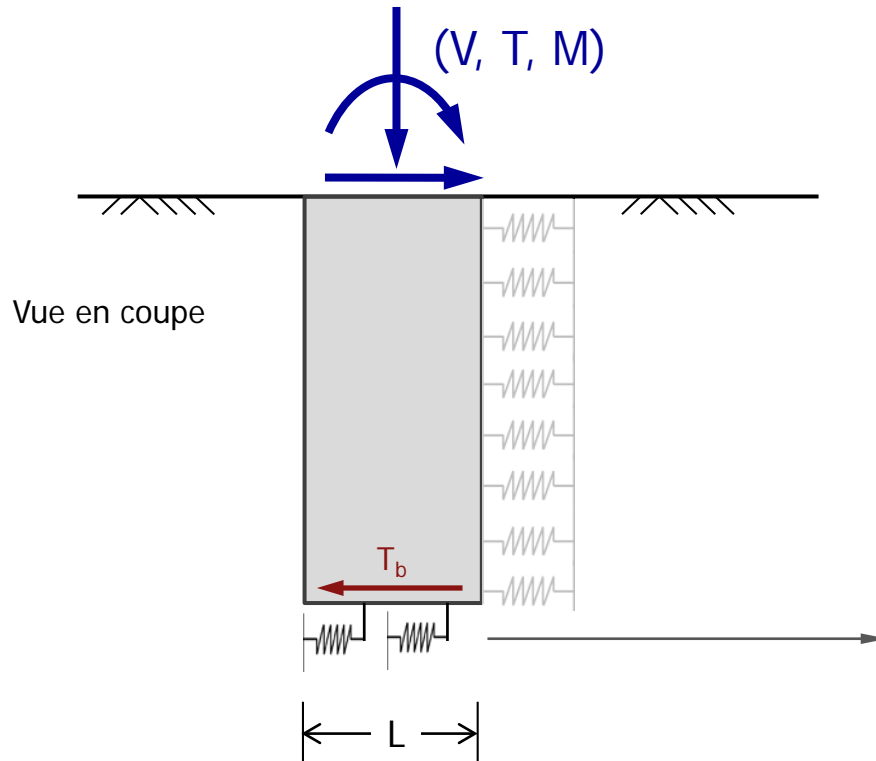
Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction tangentielle en pointe (généralement ignorée)



Principe de modélisation

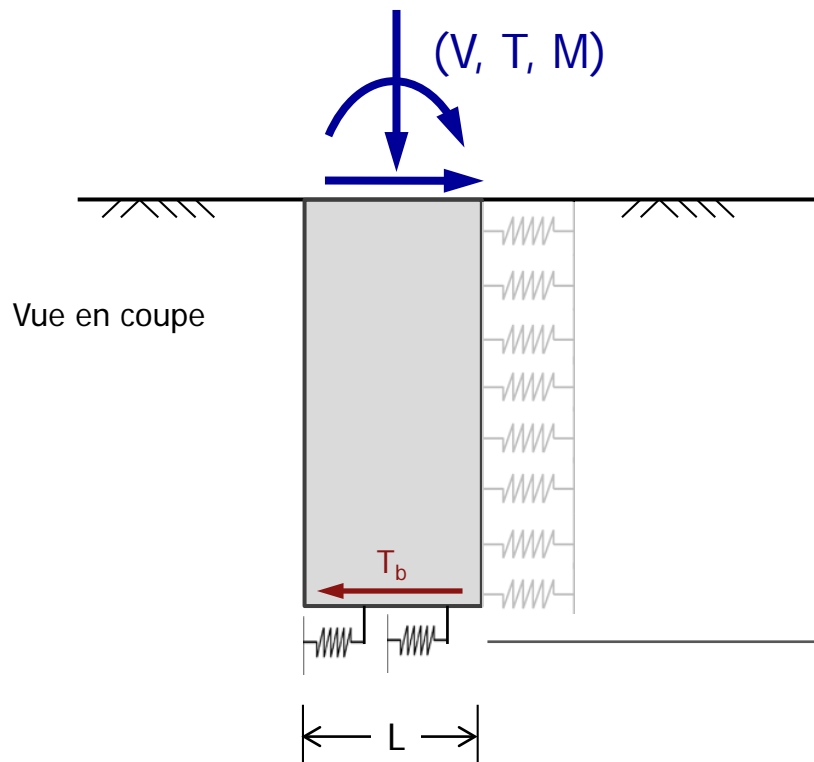
⇒ Loi de réaction tangentielle en pointe (généralement ignorée)



Cas d'une section rectangulaire

Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction tangentielle en pointe (généralement ignorée)



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

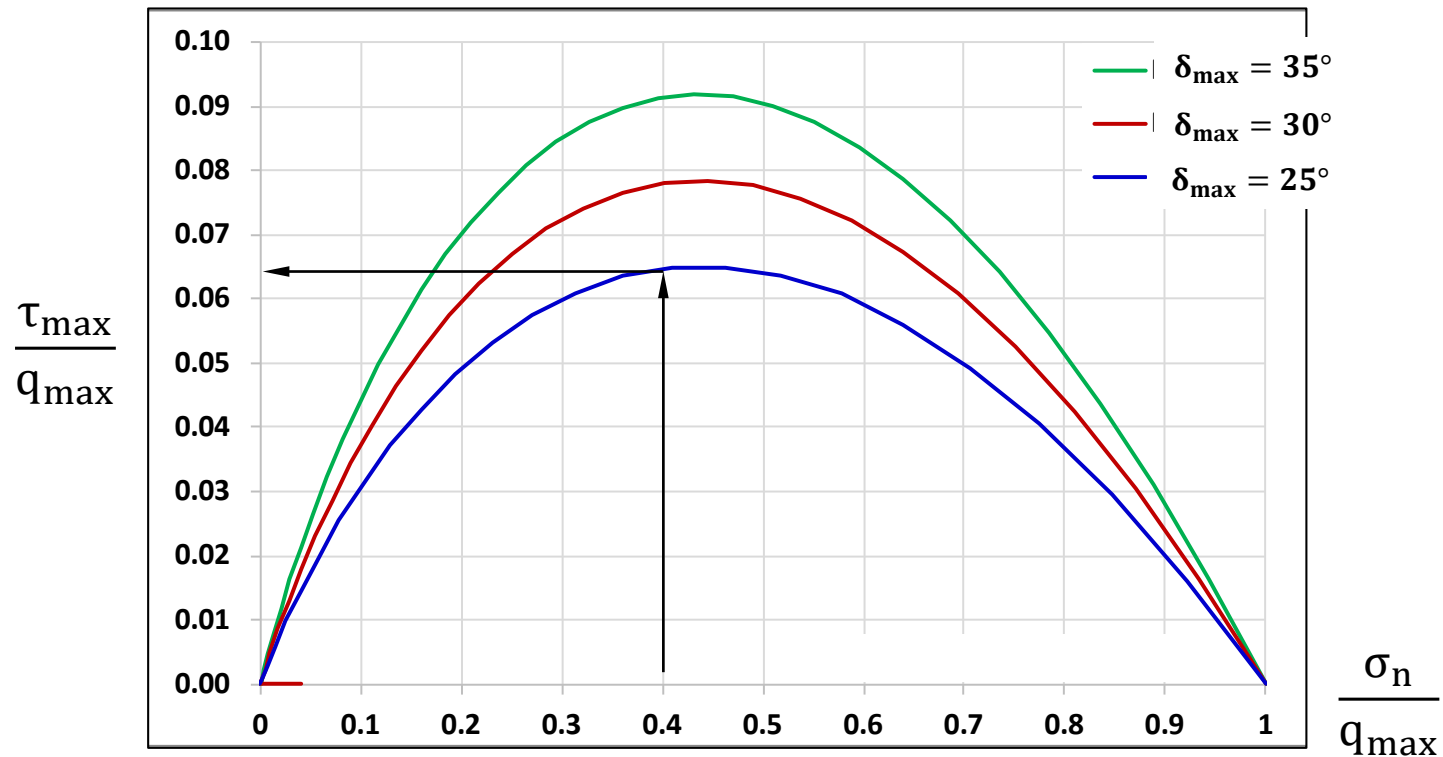
Cas d'une section rectangulaire

Principe de modélisation

⇒ Loi de réaction tangentielle en pointe (généralement ignorée)

$$\tau_{\max} = \tan \delta^* \cdot \sigma_n$$

$$\delta^* = \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma_n}{q_{\max}}} \right) \delta_{\max}$$



Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Terrain multicouche avec différenciation des termes « frontaux » et « tangentiels »

The screenshot displays the 'Définition du sol' (Soil Definition) window in the Foxta v4 software. On the left, a 3D model of a soil mass is shown with dimensions L (length), B (width), and H (height). A vertical axis Z is indicated on the left side of the model. The model is divided into three layers, each with a different color (yellow, blue, and red). The layers are labeled 'Couche 1', 'Couche 2', and 'Couche 3'. The model is subjected to a vertical load W and a horizontal load V . The soil is modeled with springs representing stiffness k_t (tangential) and k_r (frontal). The soil is also subjected to a vertical load M and a horizontal load H . The soil is modeled with springs representing stiffness k_t (tangential) and k_r (frontal). The soil is also subjected to a vertical load W and a horizontal load V .

The software interface shows the following parameters for the soil definition:

Dégradation à proximité de la surface

- Prise en compte d'une dégradation à proximité de la surface
- Cote du top de la zone de dégradation (m): 4.00
- Cote de la base de la zone de dégradation (m): 2.00
- Facteur de réduction x_s : 0.30

Loi de mobilisation de la réaction frontale p-y

N°	Nom	Couleur	Z _{base} [m]	k _{t1} [kPa/m]	p _{t1} [kPa]	k _{t2} [kPa/m]	p _{t2} [kPa]	B _{eq} [m]
1	Couche 1	Yellow	2.00	5,00E03	150,00	2,50E03	300,00	2,00
2	Couche 2	Blue	-1,00	1,00E04	200,00	5,00E03	500,00	2,00
3	Couche 3	Red	-4,00	5,00E04	300,00	2,00E04	200,00	2,00

Loi de mobilisation de la réaction tangentielle l-z

N°	Nom	Couleur	Z _{base} [m]	k _{t1} [kPa/m]	p _{t1} [kPa]	k _{t2} [kPa/m]	p _{t2} [kPa]	B _{eq} [m]
1	Couche 1	Yellow	2.00	1,00E03	20,00	2,00E02	40,00	4,00
2	Couche 2	Blue	-1,00	3,00E03	30,00	6,00E02	60,00	4,00
3	Couche 3	Red	-4,00	6,00E03	60,00	1,20E03	120,00	4,00

Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ DDC multiple + comportement non linéaire en pointe

Conditions aux limites et chargement

Cas de charge multiples en tête

N°	V [kN]	T [kN]	M [kN.m]
1	1000,00	400,00	0,00
2	800,00	200,00	400,00
3	1200,00	240,00	-200,00
4	500,00	320,00	-50,00
5	1500,00	360,00	50,00
6	1000,00	160,00	70,00
7	1000,00	100,00	80,00
8	1200,00	150,00	90,00
9	1100,00	200,00	-80,00
10	900,00	250,00	-100,00
11	800,00	260,00	-200,00
12	1500,00	-100,00	-300,00
13	1500,00	-50,00	20,00
14	1500,00	-150,00	40,00
15	1500,00	-200,00	100,00

Conditions en pied

Forme de la base: Rectangulaire

Dimensions: Longueur L (m) 6,00; Largeur B (m) 2,00

Raideur verticale en pointe: Raideur k_v (kN/m³) 10000,00; Valeur limite q_{max} (kPa) 1000,00

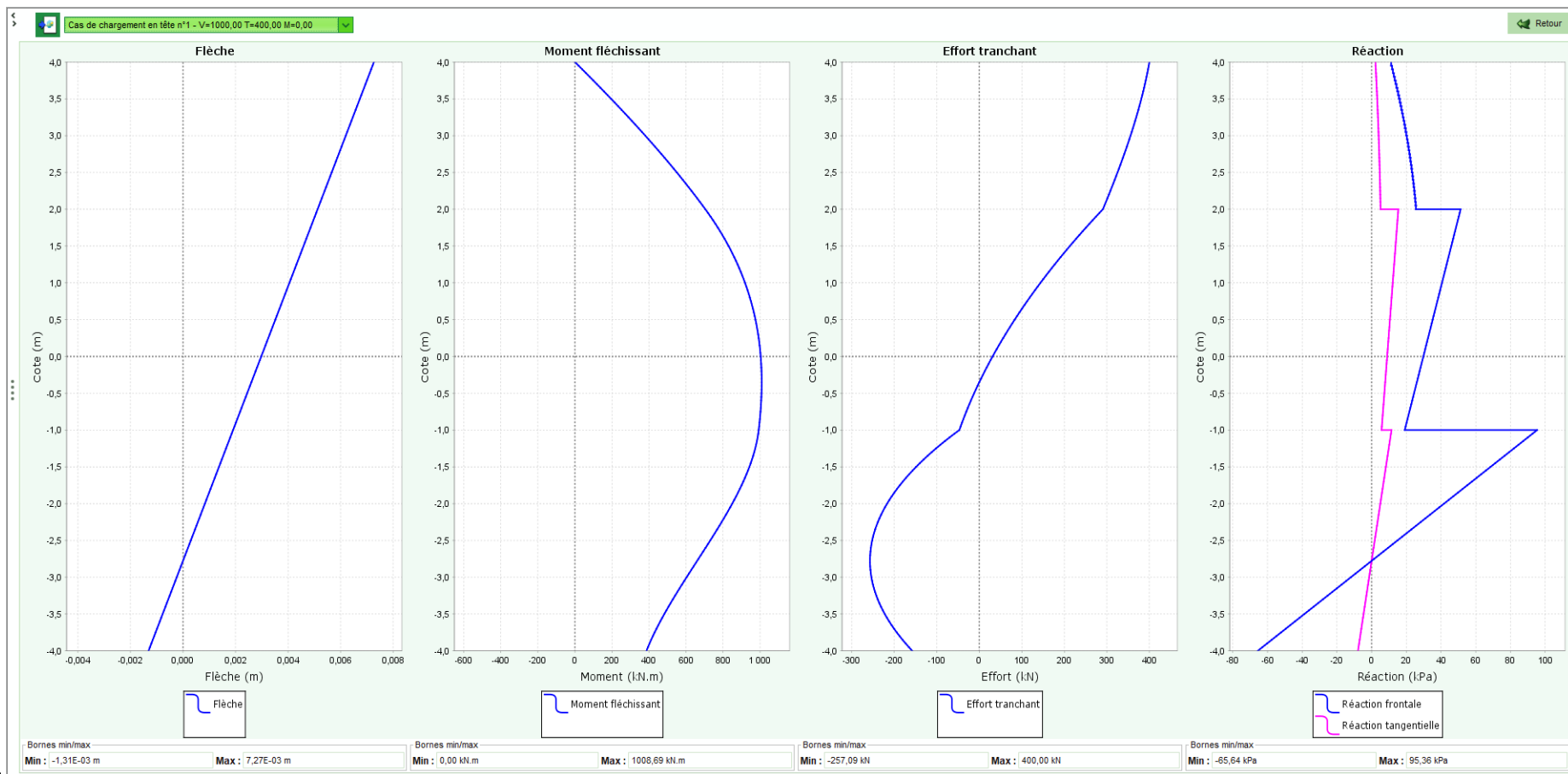
Raideur tangentielle en pointe: Raideur k_h (kN/m³) 10000,00; Valeur limite t_{max} (kPa) 700,00

Charges réparties normales au pieu: Activer les charges réparties

Loi élasto-plastique avec décollement

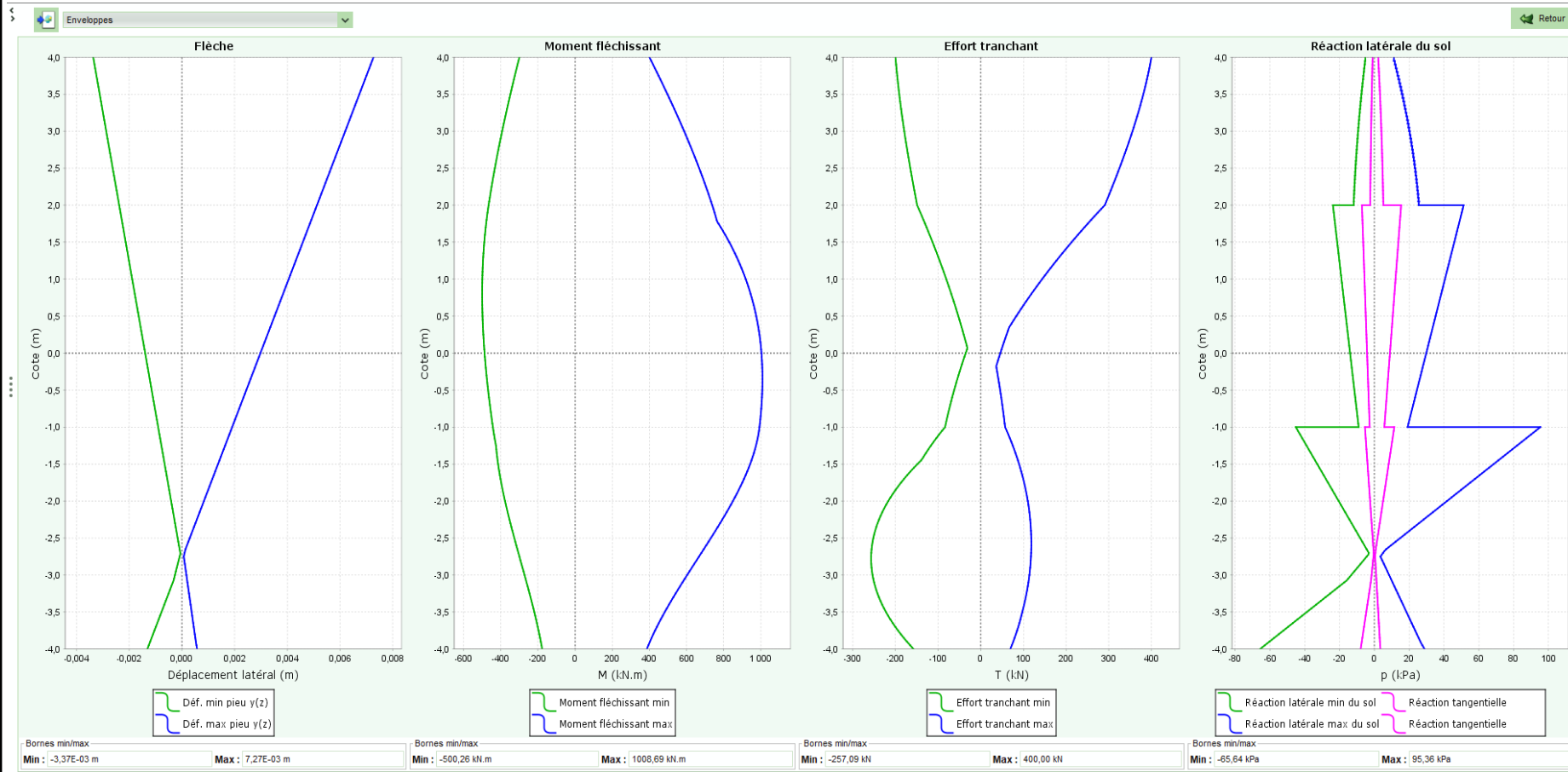
Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Diagrammes des déplacements, moments et efforts tranchants



Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Diagrammes des déplacements, moments et efforts tranchants



Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Bilan des efforts à la base de la fondation

Résultats clés

N° cas charge	V [kN]	T [kN]	M [kN.m]	Flèche _{tête} [cm]	Rotation _{tête} [rad]	Tassement _{tête} [cm]	Effort vert. _{piéd} [kN]	Effort horiz. _{piéd} [kN]	Moment _{piéd} [kN.m]	% comp.	Contr. _{max} [kPa]	Contr. _{min} [kPa]
1	1000,00	400,00	0,00	0,48	7,21E-04	0,03	1500,00	-28,42	777,41	0,72	1000,00	0,00
2	800,00	200,00	400,00	0,30	4,61E-04	0,03	1300,00	-24,14	572,47	0,84	773,16	0,00
3	1200,00	240,00	-200,00	0,23	3,39E-04	0,04	1700,00	-14,63	451,94	1,00	763,11	86,89
4	500,00	320,00	-50,00	0,39	5,84E-04	0,02	1000,00	-21,10	563,66	0,66	762,48	0,00
5	1500,00	360,00	50,00	0,42	6,25E-04	0,05	2000,00	-29,48	786,68	0,90	1000,00	0,00
6	1000,00	160,00	70,00	0,19	2,85E-04	0,04	1500,00	-15,08	379,51	1,00	658,92	91,08
7	1000,00	100,00	80,00	0,12	1,88E-04	0,04	1500,00	-10,38	251,13	1,00	562,88	187,12
8	1200,00	150,00	90,00	0,18	2,74E-04	0,04	1700,00	-14,78	365,16	1,00	698,19	151,81
9	1100,00	200,00	-80,00	0,21	3,07E-04	0,04	1600,00	-14,46	409,95	1,00	706,70	93,30
10	900,00	250,00	-100,00	0,26	3,86E-04	0,03	1400,00	-17,41	511,12	0,95	734,04	0,00
11	800,00	260,00	-200,00	0,26	3,75E-04	0,03	1300,00	-15,48	492,85	0,93	696,99	0,00
12	1500,00	-100,00	-300,00	-0,16	-2,52E-04	0,05	2000,00	16,14	-335,76	1,00	751,19	248,81
13	1500,00	-50,00	20,00	-0,05	-7,69E-05	0,05	2000,00	3,62	-102,49	1,00	576,67	423,32
14	1500,00	-150,00	40,00	-0,16	-2,36E-04	0,05	2000,00	11,37	-315,16	1,00	735,78	264,22
15	1500,00	-200,00	100,00	-0,21	-3,02E-04	0,05	2000,00	13,94	-402,26	1,00	800,94	199,06

Donnée d'entrée pour FONDSUP (vérification de portance en pied)

Exercice 01

⇒ Massif circulaire

The screenshot displays the software interface for a circular mass calculation. On the left, a cross-section diagram shows a central grey mass with a diameter of 4.00 m. The diagram is divided into three horizontal layers: a top yellow layer (0.00 m to 2.50 m), a middle cyan layer (2.50 m to 0.00 m), and a bottom blue layer (0.00 m to -1.50 m). The reference height is indicated as 4.00 m. Below the diagram, there are 'Options' and 'Visible' checkboxes, with 'Vue en coupe' selected.

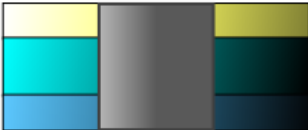
The right panel shows the 'Paramètres généraux' configuration window. It includes the following parameters:

- Titre du calcul: Massif circulaire
- Cote de référence (m): 4,00
- Pas du calcul (m): 0,05
- Poids propre de la fondation (kN): 50,00

Buttons at the bottom of the configuration window include 'Configurer le D.I.', 'Lancer le calcul', and 'Voir les résultats'.

Exercice 01

⇒ Massif circulaire



Cote de référence : 4.0 m
2.5 m
0.0 m
-1.5 m

✓ Massif rectangulaire
✓ Massif circulaire ✕
+

✓ Paramètres
✓ Couches
✓ Conditions aux limites et chargement

Définition du sol

Dégradation à proximité de la surface

Prise en compte d'une dégradation à proximité de la surface

? ?

Cote du toit de la zone de dégradation (m) 4,00

Cote de la base de la zone de dégradation (m) -1,00

Facteur de réduction x_β 0,50

Loi de mobilisation de la réaction frontale p-y

N°	Nom	Couleur	Z _{base} [m]	k _{f1} [kPa/m]	p _{f1} [kPa]	k _{f2} [kPa/m]	p _{f2} [kPa]	B _{eq} [m]
1	Couche 1		2,50	5,00E03	150,00	2,50E03	250,00	2,50
2	Couche 2		0,00	1,00E04	250,00	5,00E03	400,00	2,50
3	Couche 3		-1,50	1,50E04	300,00	7,50E03	500,00	2,50

? ?

Base de données

Loi de mobilisation de la réaction tangentielle t-z

N°	Nom	Couleur	Z _{base} [m]	k _{t1} [kPa/m]	p _{t1} [kPa]	k _{t2} [kPa/m]	p _{t2} [kPa]	P _{eq} [m]
1	Couche 1		2,50	0,00E00	1,00	0,00E00	1,00	1,00
2	Couche 2		0,00	0,00E00	1,00	0,00E00	1,00	1,00
3	Couche 3		-1,50	0,00E00	1,00	0,00E00	1,00	1,00

? ?

Options

Visible

Vue en coupe

Exercice 01

⇒ Massif circulaire

Massif rectangulaire
Massif circulaire
+

Paramètres
Couches
Conditions aux limites et chargement

Conditions aux limites et chargement

Cas de charge multiples en tête

N°	V [kN]	T [kN]	M [kN.m]
1	300,00	400,00	0,00
2	250,00	200,00	400,00
3	400,00	240,00	-200,00
4	150,00	320,00	-50,00

? ?

+
🗑️
🗑️
🔄
📄

Conditions en pied

Forme de la base Circulaire ? ?

Dimensions Diamètre B (m) 2,50

Raideur verticale en pointe Raideur k_v (kN/m³) 25000,00 Valeur limite q_{max} (kPa) 1500,00

Raideur tangentielle en pointe Raideur k_h (kN/m³) 20000,00 Rugosité limite δ_{max} (°) 30,00

Exercice 01

⇒ Massif circulaire

Assistant d'importation depuis le presse-papiers

Contenu du presse-papiers

Colonne 1	Colonne 2	Colonne 3
300	400	0
250	200	400
400	240	-200
150	320	-50
500	360	50
300	160	70
300	100	80
400	150	90
300	200	-80
250	250	-100
250	260	-200
500	-100	-300
500	-50	20
650	-150	40
160	-200	100

V [kN] T [kN] M [kN.m]

Options

Seules les cases écrites en noir seront importées.

Première ligne à importer: Ligne 1 Dernière ligne à importer: Ligne 15

Nombre de lignes à importer dans la table : 15 Nombre de colonnes à importer dans la table : 3 Nombre de lignes à créer dans la table : 0

Importer Annuler

Configurer le D.I. Lancer le calcul Voir les résultats

Exercice 02

⇒ Massif rectangulaire

Cote de référence : 4.0 m

2.0 m

-1.0 m

Massif rectangulaire **Massif circulaire**

Paramètres Couches Conditions aux limites et chargement

Définition du sol

Dégradation à proximité de la surface

Prise en compte d'une dégradation à proximité de la surface

Cote du toit de la zone de dégradation (m) :

Cote de la base de la zone de dégradation (m) :

Facteur de réduction x_b :

Loi de mobilisation de la réaction frontale p-y

N°	Nom	Couleur	Z _{base} [m]	k _{f1} [kPa/m]	p _{f1} [kPa]	k _{f2} [kPa/m]	p _{f2} [kPa]	B _{eq} [m]
1	Couche 1		2,00	5,00E03	150,00	2,50E03	250,00	2,00
2	Couche 2		-1,00	1,00E04	250,00	5,00E03	400,00	2,00

Loi de mobilisation de la réaction tangentielle t-z

N°	Nom	Couleur	Z _{base} [m]	k _{t1} [kPa/m]	p _{t1} [kPa]	k _{t2} [kPa/m]	p _{t2} [kPa]	P _{eq} [m]
1	Couche 1		2,00	2,50E03	20,00	5,00E02	40,00	4,00
2	Couche 2		-1,00	5,00E03	30,00	1,00E03	60,00	4,00

F. Cuira – 2020

Page 41

Exercice 02

⇒ Massif rectangulaire

Paramètres
 Couches
 Conditions aux limites et chargement

Conditions aux limites et chargement

Cas de charge multiples en tête

N°	V [kN]	T [kN]	M [kN.m]
12	650,00	-100,00	-300,00
13	650,00	-50,00	20,00
14	650,00	-150,00	40,00
15	160,00	-200,00	100,00

Conditions en pied

Forme de la base: Rectangulaire

Dimensions

Longueur L (m)	<input style="width: 80px;" type="text" value="6,00"/>	Largeur B (m)	<input style="width: 80px;" type="text" value="2,00"/>
----------------	--	---------------	--

Raideur verticale en pointe

Raideur k_v (kN/m ³)	<input style="width: 80px;" type="text" value="10000,00"/>	Valeur limite q_{max} (kPa)	<input style="width: 80px;" type="text" value="1000,00"/>
------------------------------------	--	-------------------------------	---

Raideur tangentielle en pointe

Raideur k_h (kN/m ³)	<input style="width: 80px;" type="text" value="8000,00"/>	Rugosité limite δ_{max} (°)	<input style="width: 80px;" type="text" value="30,00"/>
------------------------------------	---	------------------------------------	---