

Groupe de Travail "Fondations d'éoliennes"

Approche pour le dimensionnement des renforcements de sol par inclusions rigides

Cyril Plomteux - MENARD

Journée du 20 octobre 2009

1. Présentation du principe de la solution de renforcement de sol par inclusions rigides sous fondation d'éolienne:

- Coupe type
- Matelas de répartition
- Implantation type des colonnes

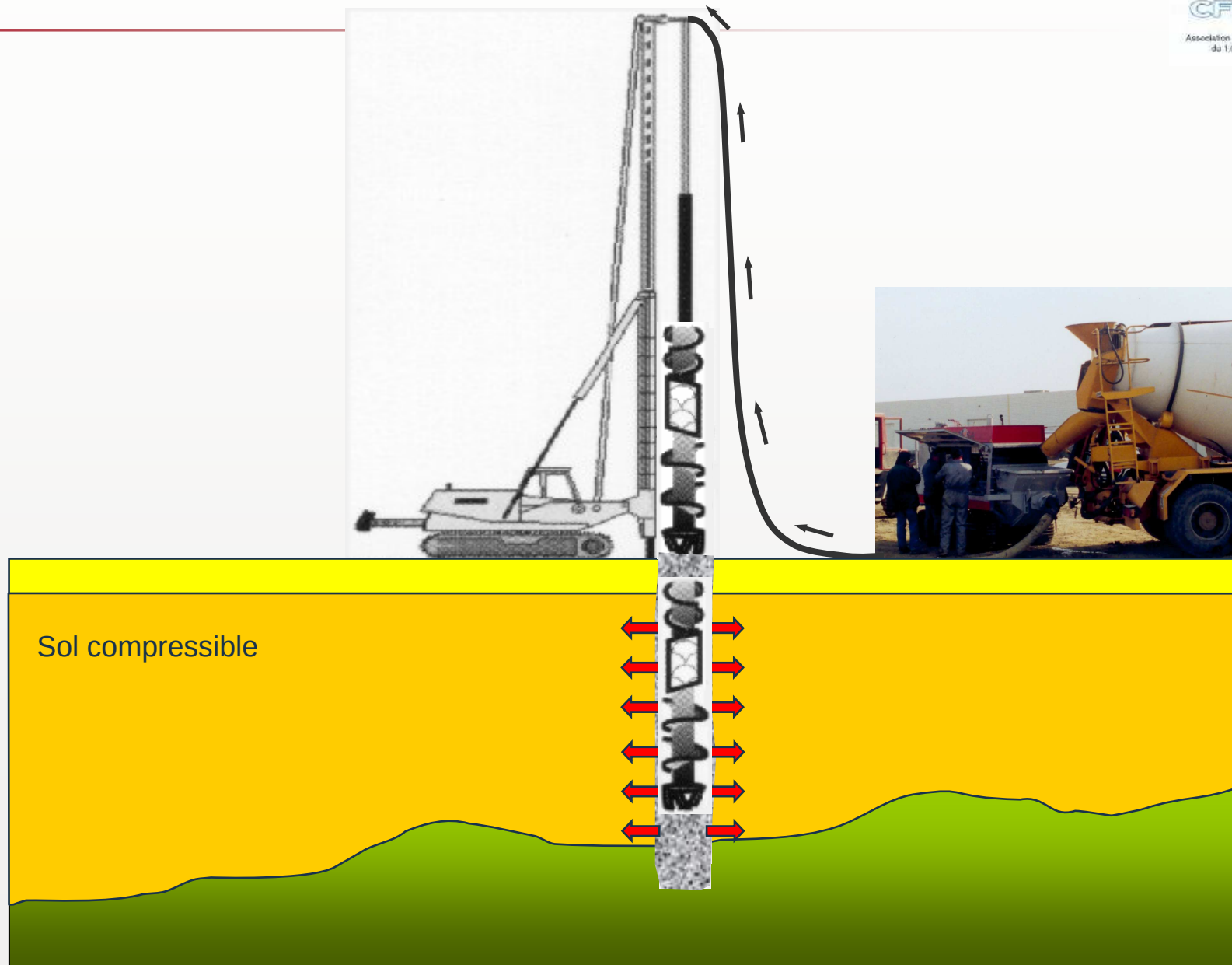
2. Spécifications techniques spécifiques des éoliennes viss-à-vis des inclusions rigides:

- Capacité portante ELS/ELU et contraintes appliquées
- Tassements admissibles
- $K_{\phi, \text{dyn}}$, efforts cycliques et résonance du système
-

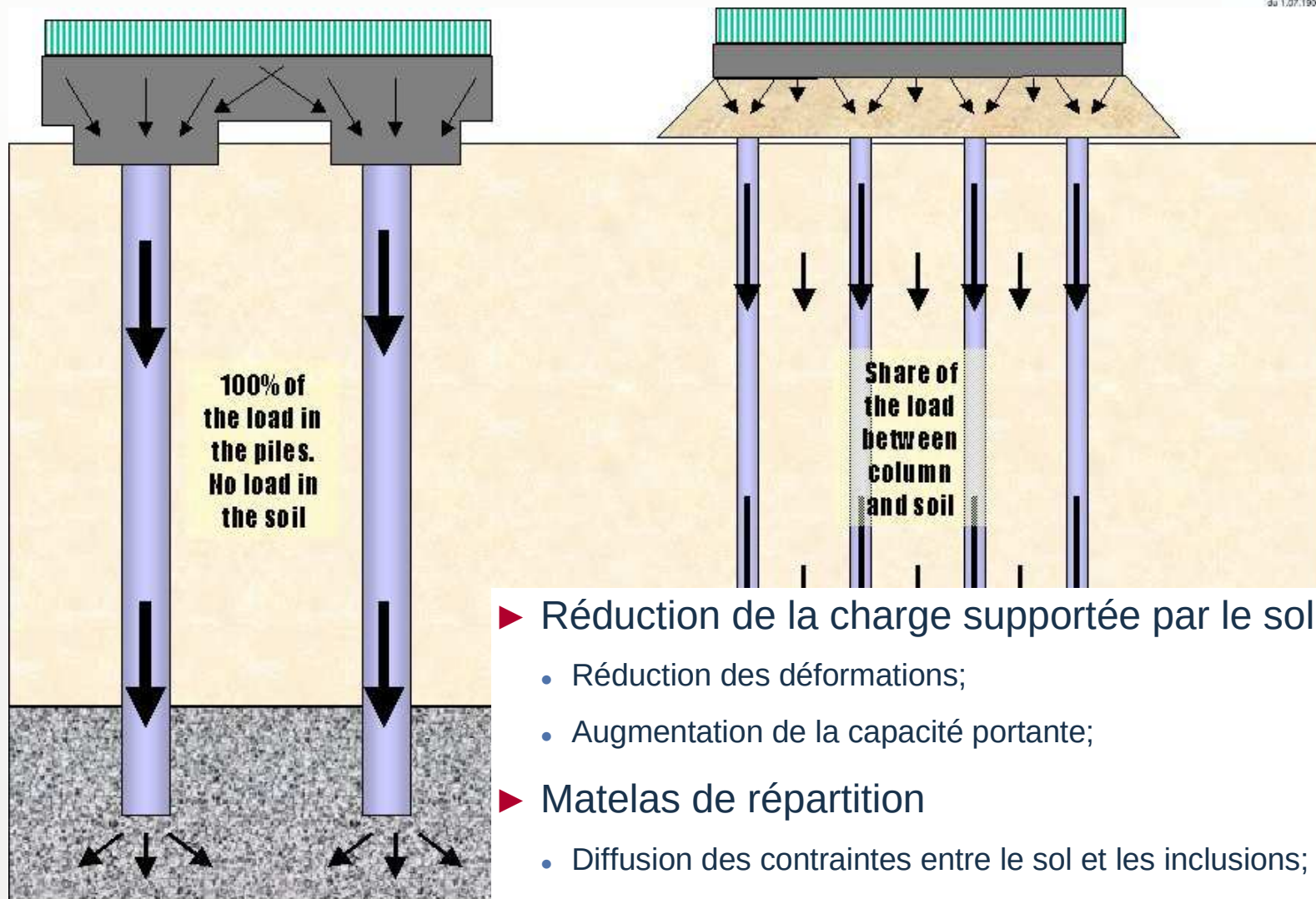
3. Dimensionnement et vérification du renforcement de sol:

- Répartition des contraintes dans le matelas
- Transmission des efforts verticaux
- Transmission des efforts horizontaux et cisaillement admissibles

Renforcement de sol par Inclusions Rigides

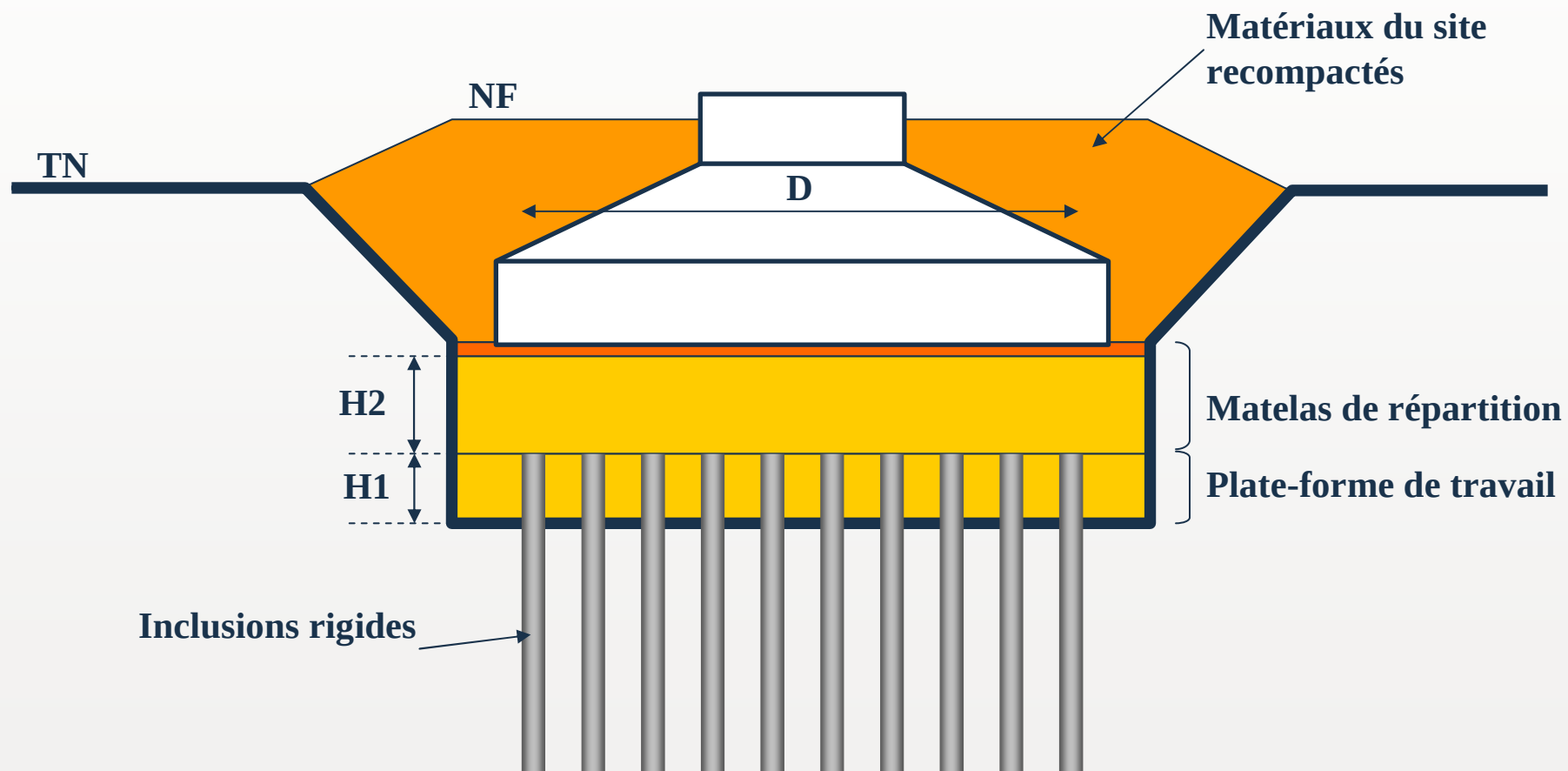


Renforcement de sol par Inclusions Rigides

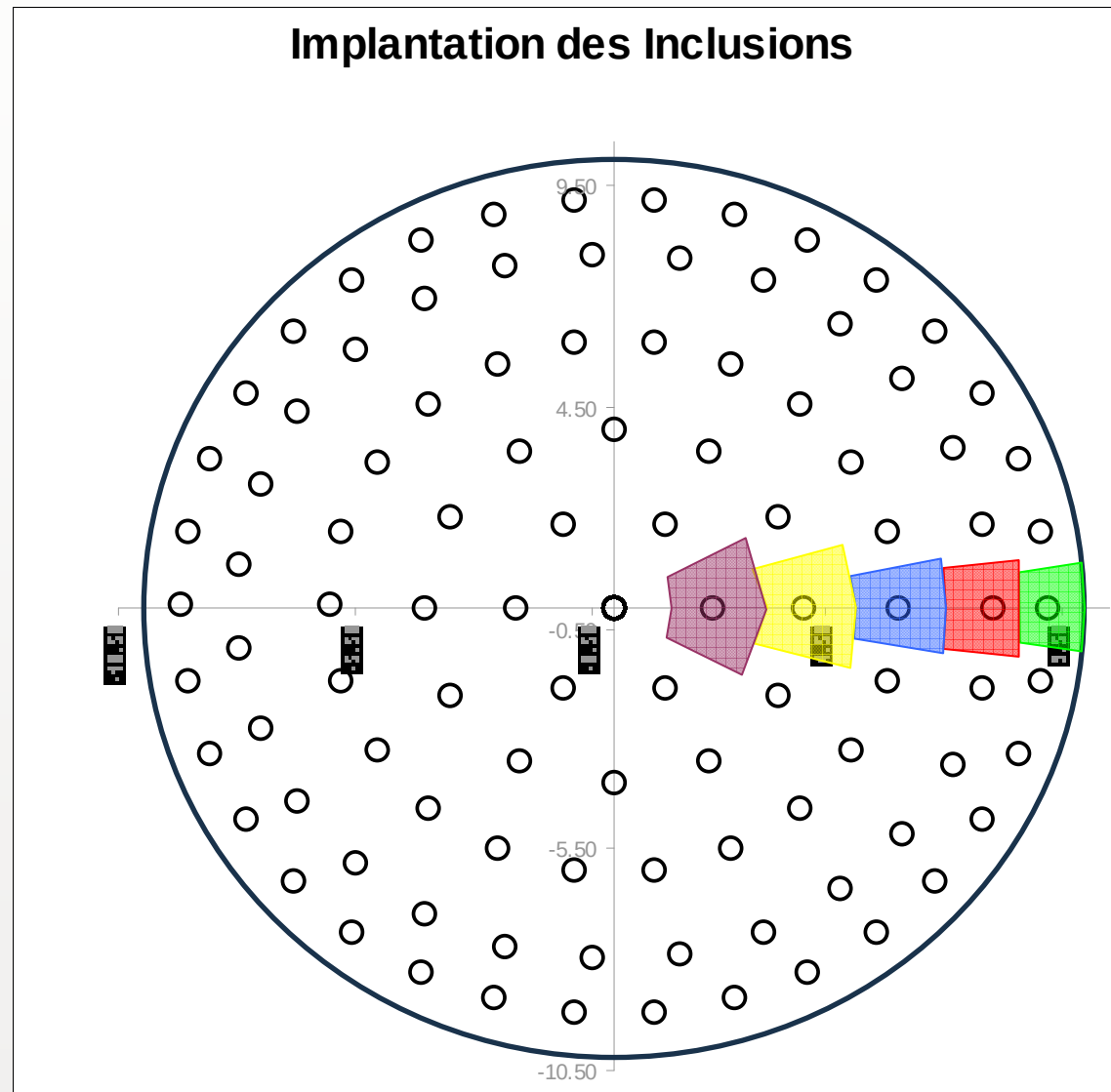


- ▶ Réduction de la charge supportée par le sol
 - Réduction des déformations;
 - Augmentation de la capacité portante;
- ▶ Matelas de répartition
 - Diffusion des contraintes entre le sol et les inclusions;
 - Effet fusible vis-à-vis des efforts horizontaux et des vibrations;

Renforcement de sol par Inclusions Rigides



Renforcement de sol par Inclusions Rigides









Sommaire



1. Présentation du principe de la solution de renforcement de sol par inclusions rigides sous fondation d'éolienne:

- Coupe type
- Matelas de répartition
- Implantation type des colonnes

2. Spécifications techniques spécifiques des éoliennes vis-à-vis des inclusions rigides:

- Capacité portante ELS/ELU et contraintes appliquées
- Tassements admissibles
- $K_{\phi, \text{dyn}}$, efforts cycliques et résonance du système

3. Dimensionnement et vérification du renforcement de sol:

- Répartition des contraintes dans le matelas
- Transmission des efforts verticaux
- Transmission des efforts horizontaux et cisaillement admissibles

Spécifications techniques



- Spécifications techniques spécifiques d'une fondation d'éolienne
 - 1. Capacité portante du sol ELS / ELU : typiquement 250 kPa / 400 kPa
 - 2. Coefficients de réaction équivalents en vertical K_v , en horizontal K_h et en rotation K_ϕ du sol renforcé (ou module de déformation équivalent E_v et E_h)
 - 3. Tassements différentiels admissibles (20 ans) : typiquement < 3 mm/m
 - 4. Angle de frottement sous la fondation
 - 5. Raideur en rotation équivalente du sol renforcé K_ϕ en conditions "dynamiques" (petites déformations) c'est à dire pour $\varepsilon = 10^{-3} / 10^{-5}$ de manière à éviter la résonance du système : valeur minimale à obtenir

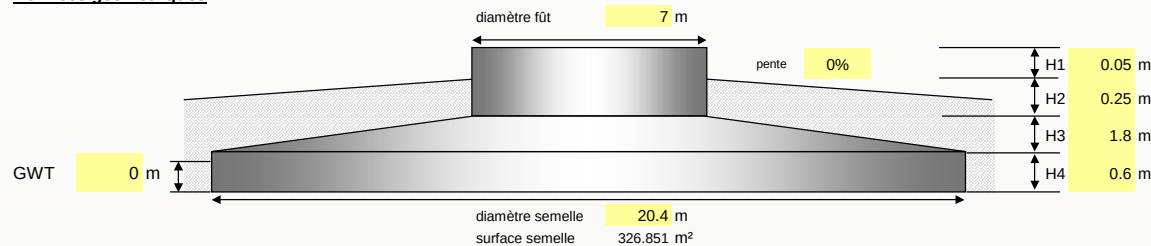
Contraintes appliquées – Capacité portante

hypothèses

densités :
béton armé 2.5 T/m³
terres sur assiette 1.8 T/m³



Données géométriques



Dimensions semelle

volume socle	1.9242 m ³	Poids massif	12 354 kN
volume fût	9.6211 m ³		
volume assiette	482.61 m ³	Poids terres	6 731 kN
volume total	494.15 m ³		
Volume terres sur assiette	373.93 m ³	Poids total	19 084 kN

Efforts sur socle (non pondérés)

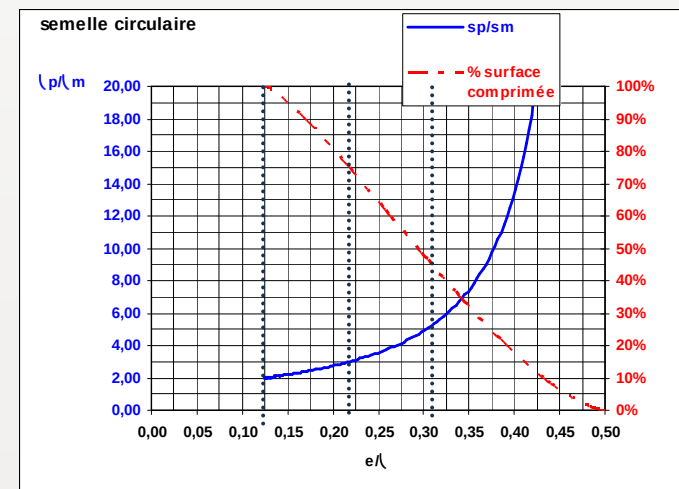
(Entrer les cas de charges dans l'ordre alphabétique)

Cas	Type	N (kN)	H (kN)	M (kN.m)	Mtorsion (kN.m)	Vent (H et M)	C.P. mât (N)	Poids morts (BA + terre)	Eau
1	1-1.5f elu	4370	1100	102820	5490	1.50	1.35	1.35	1.00
2	2-1.5f elu	4370	1100	102820	650	1.50	1.00	1.00	1.18
3	3-2.2b elu	4340	1170	103140	3200	1.10	1.00	1.00	1.00
4	4-1.5p els	4400	1120	101690	2150	1.00	1.00	1.00	1.00
5	5-lift-off els	4500	670	54310	3580	1.00	1.00	1.00	1.00
6									
7									

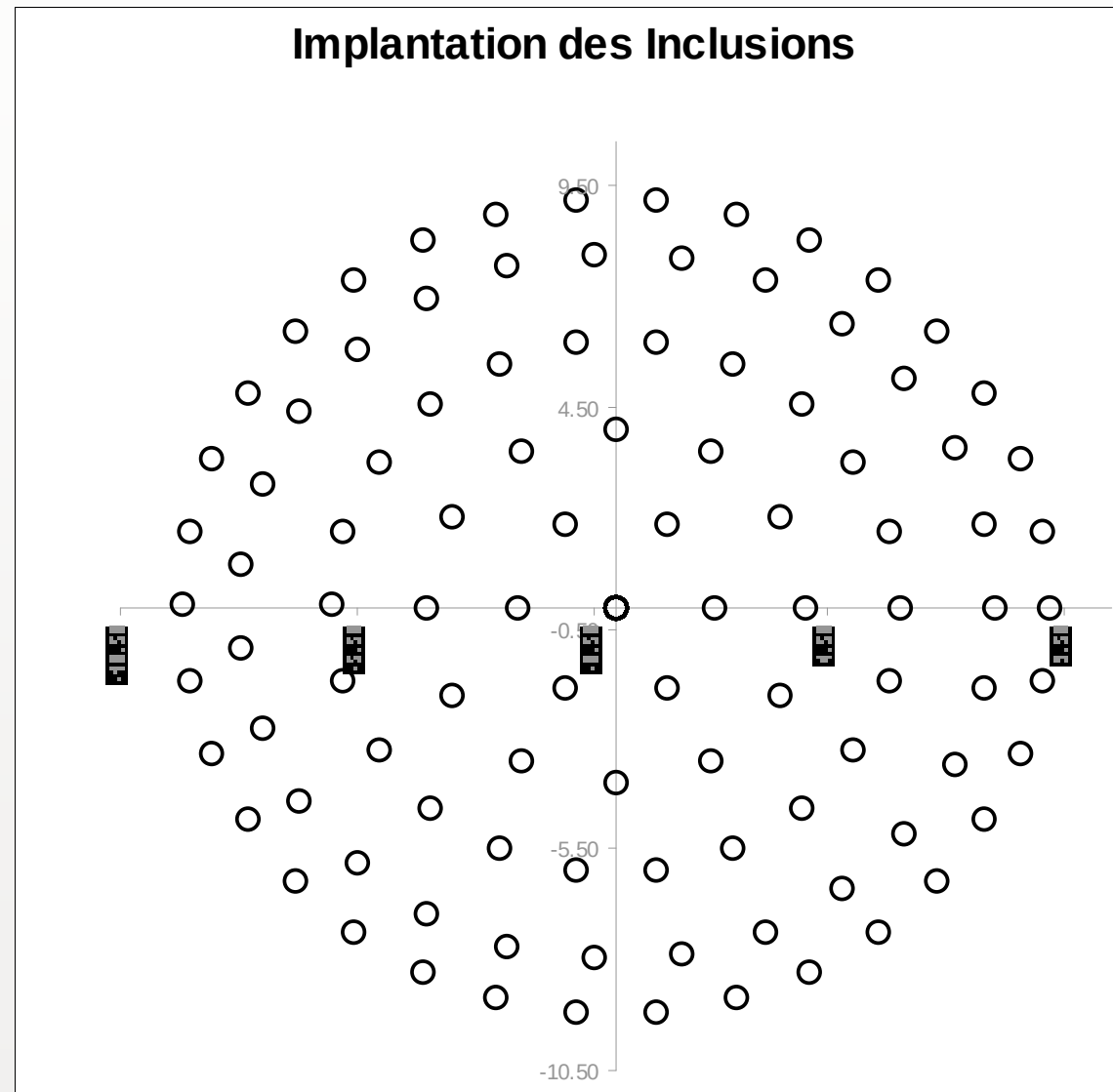
Résultats

Cas	Exentricité (m)	% comprimé	σ_{max} (kPa)	σ_{min} (kPa)	σ_{ref} (kPa)	Sref (m²)	Qref (kN)	d0 (m)	
1	1-1.5f	5.01	68%	329.25	0.00	223.43	221.68	49 530	0.0062
2	2-1.5f	6.77	45%	449.74	0.00	288.89	146.73	42 391	0.0062
3	3-2.2b	4.99	68%	243.58	0.00	165.29	222.53	36 782	0.0048
4	4-1.5p	4.46	75%	212.58	0.00	143.70	245.29	35 249	0.0042
5	5-lift-off	2.38	100%	139.49	4.82	96.00	326.85	31 379	0.0025
6	0								
7	0								

- ▶ Cas de charges dimensionnant à l'ELS qp, ELS rare, à l'ELU fond et ELU acc,
- ▶ Semelle parfois partiellement décomprimée sous certains cas de charges,
- ▶ Augmentation très significative des contraintes en fonction du pourcentage comprimé,

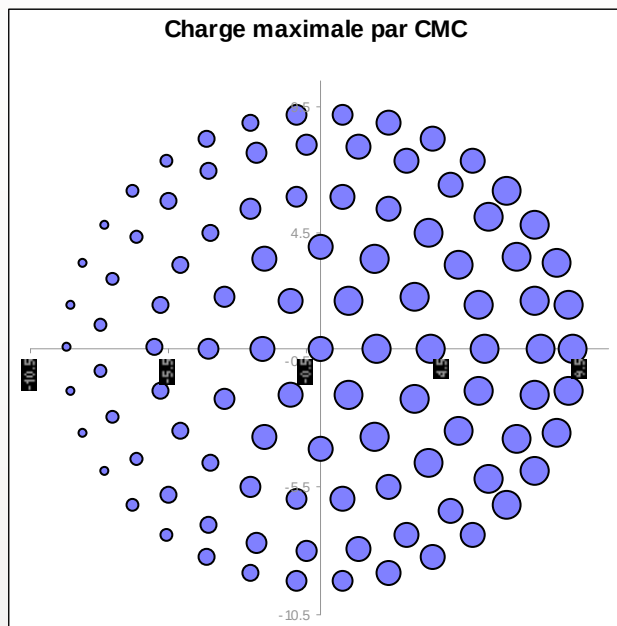


Contraintes appliquées – Capacité portante

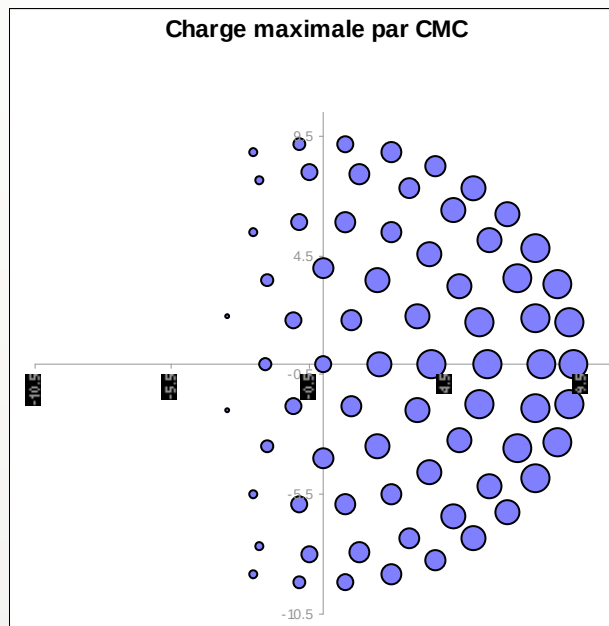


Contraintes appliquées – Capacité portante

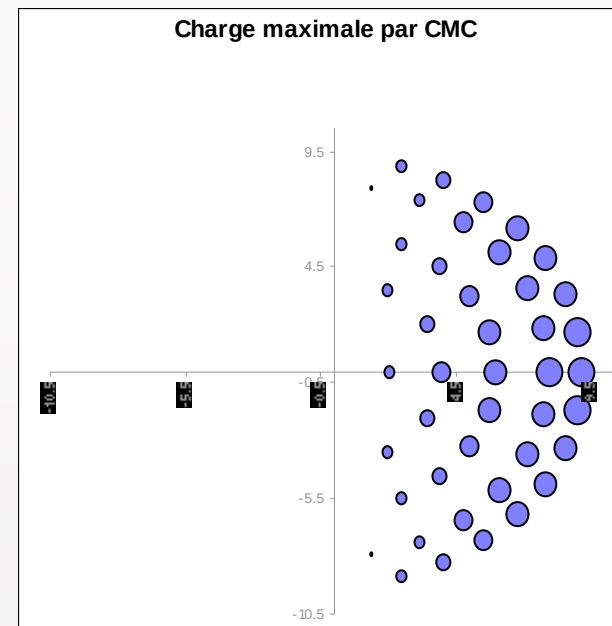
► ELS qp – DLC1.0



► ELS rare – DLC 1.5



► ELU fond – DLC 1.5

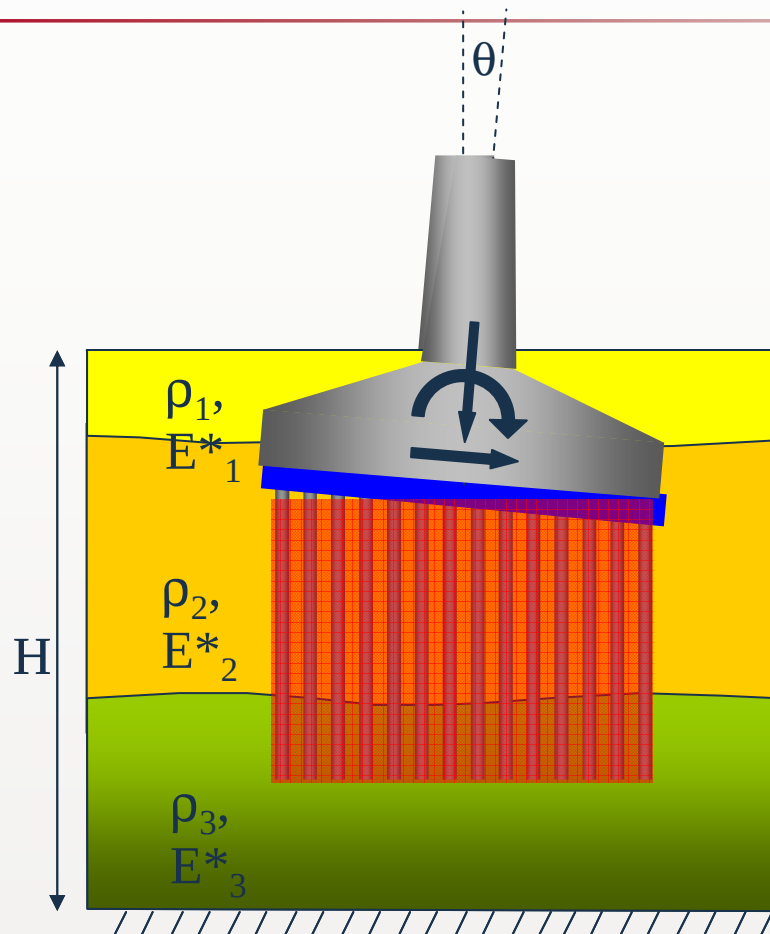


R	NB CMC	Qmin	Qmax
9.2	34	26	307
8	27	50	316
6	22	95	326
4	12	159	342
2.1	6	218	322
0	1	212	212

R	NB CMC	Qmin	Qmax
9.2	34	53	457
8	27	2	455
6	22	5	437
4	12	3	417
2.1	6	109	343
0	1	178	178

R	NB CMC	Qmin	Qmax
9.2	34	175	927
8	27	53	868
6	22	217	715
4	12	176	514
2.1	6	16	207
0	1	0	0

Déplacements de la fondation

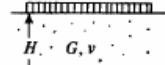
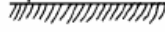


$$M = K_{\phi} \cdot \theta$$

$$V = K_V \cdot \Delta h$$

$$H = K_H \cdot d_r$$

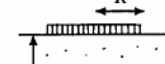
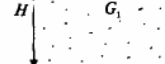
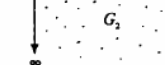
Table 3. Static stiffnesses of rigid circular foundation on a stratum-over-rigid-base*

Type of loading	Static stiffness	Range of validity†	Soil profile
Vertical:	$K_v = \frac{4GR}{1-\nu} \left(1 + 1.28 \frac{R}{H} \right)$	$H/R > 2$	
Horizontal:	$K_h = \frac{8GR}{2-\nu} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{R}{H} \right)$	$H/R > 1$	
Rocking:	$K_r = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \left(1 + \frac{1}{6} \frac{R}{H} \right)$	$4 > H/R > 1$	
Torsion:	$K_t = \frac{16}{3} GR^3$	$H/R > 1.25$	

* Adapted from Kausel³³ and Kausel *et al.*³⁰

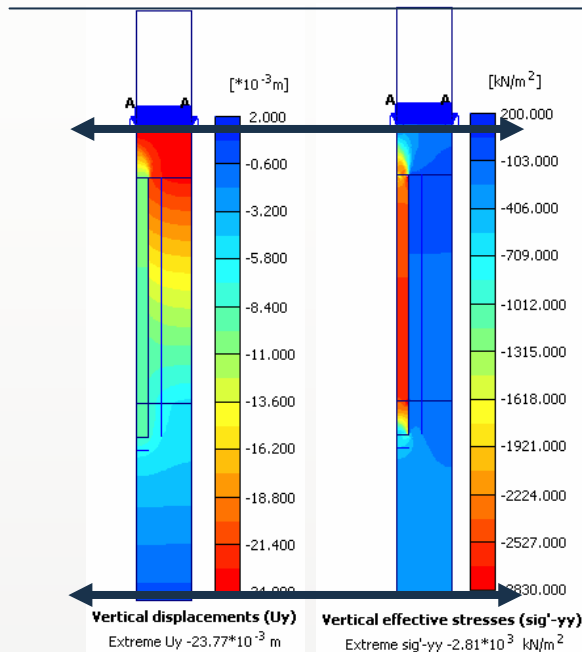
† For $H/R < 2$ or 1 these expressions would still provide reasonable estimates of the actual static stiffnesses

Table 5. Static stiffnesses of circular foundations on a stratum-over-halfspace*

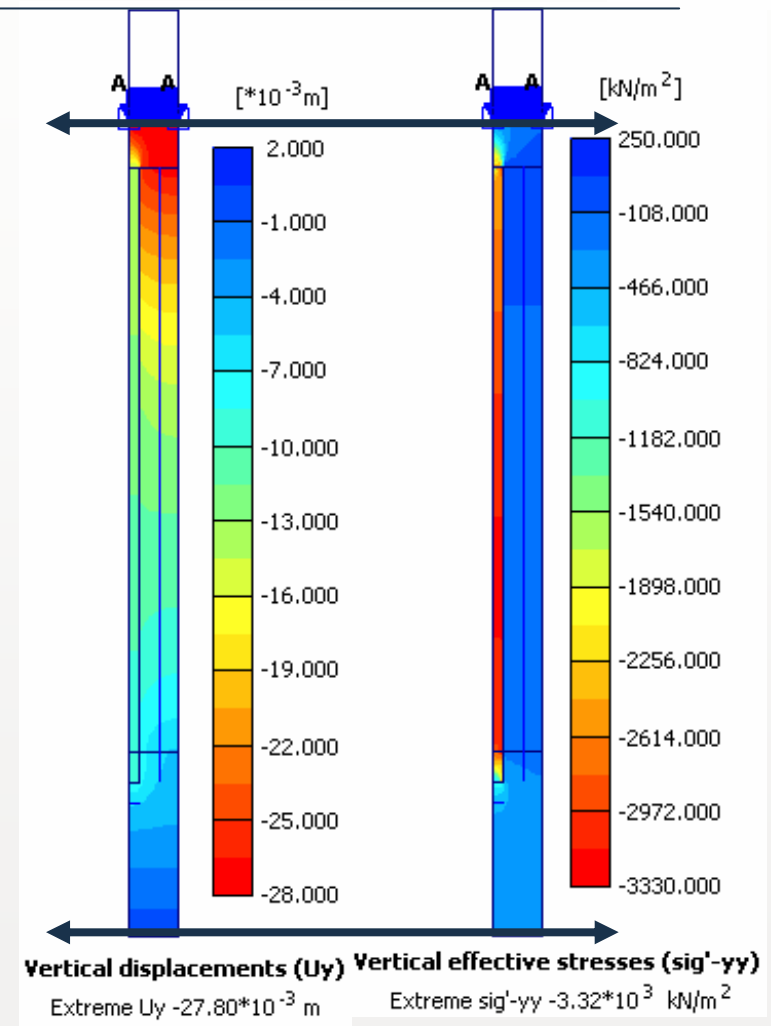
Type of loading	Static stiffness*	Range of validity	Profile
Vertical:	$\frac{4G_1 R}{1-\nu_1} \cdot \frac{1 + 1.28 \frac{R}{H}}{1 + 1.28 \frac{R}{H} \frac{G_1}{G_2}}$	$1 < \frac{H}{R} < 5$	
Horizontal:	$\frac{8G_1 R}{2-\nu_1} \cdot \frac{1 + \frac{1}{2} \frac{R}{H}}{1 + \frac{1}{2} \frac{R}{H} \frac{G_1}{G_2}}$	$1 < \frac{H}{R} < 4$	
Rocking:	$\frac{8G_1 R^3}{3(1-\nu_1)} \cdot \frac{1 + \frac{1}{6} \frac{R}{H}}{1 + \frac{1}{6} \frac{R}{H} \frac{G_1}{G_2}}$	$0.75 < \frac{H}{R} < 2$	

* Derived by the author on the basis of results provided by Hadjian and Luco³⁷

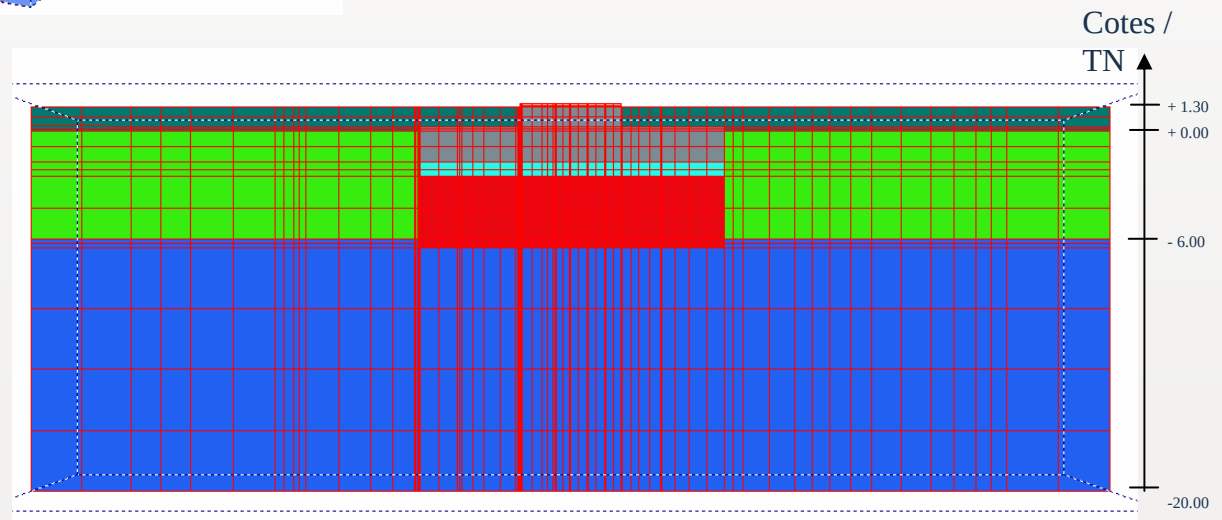
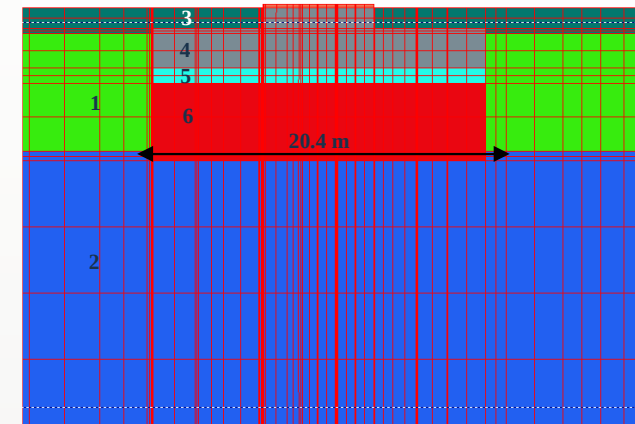
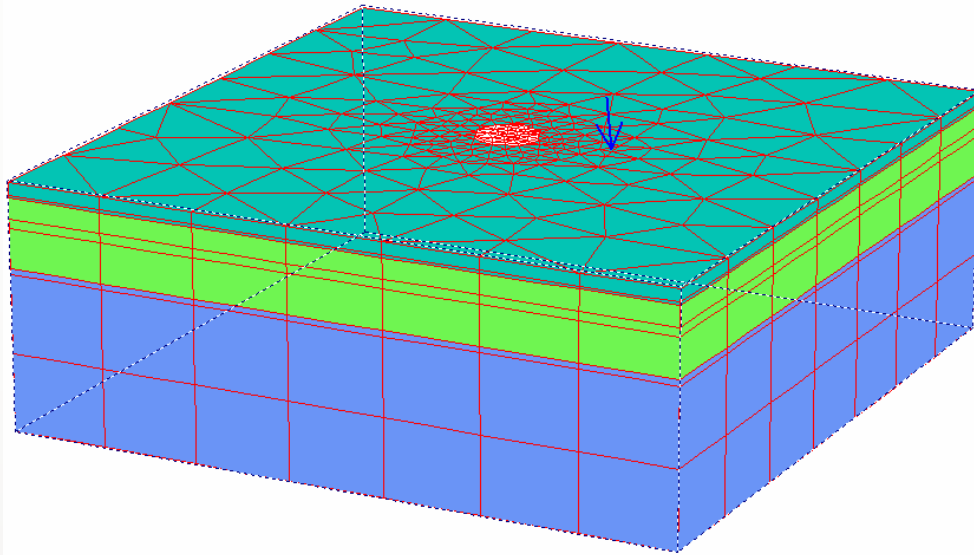
Déplacements de la fondation



$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\sigma}{E_{oed}}$$

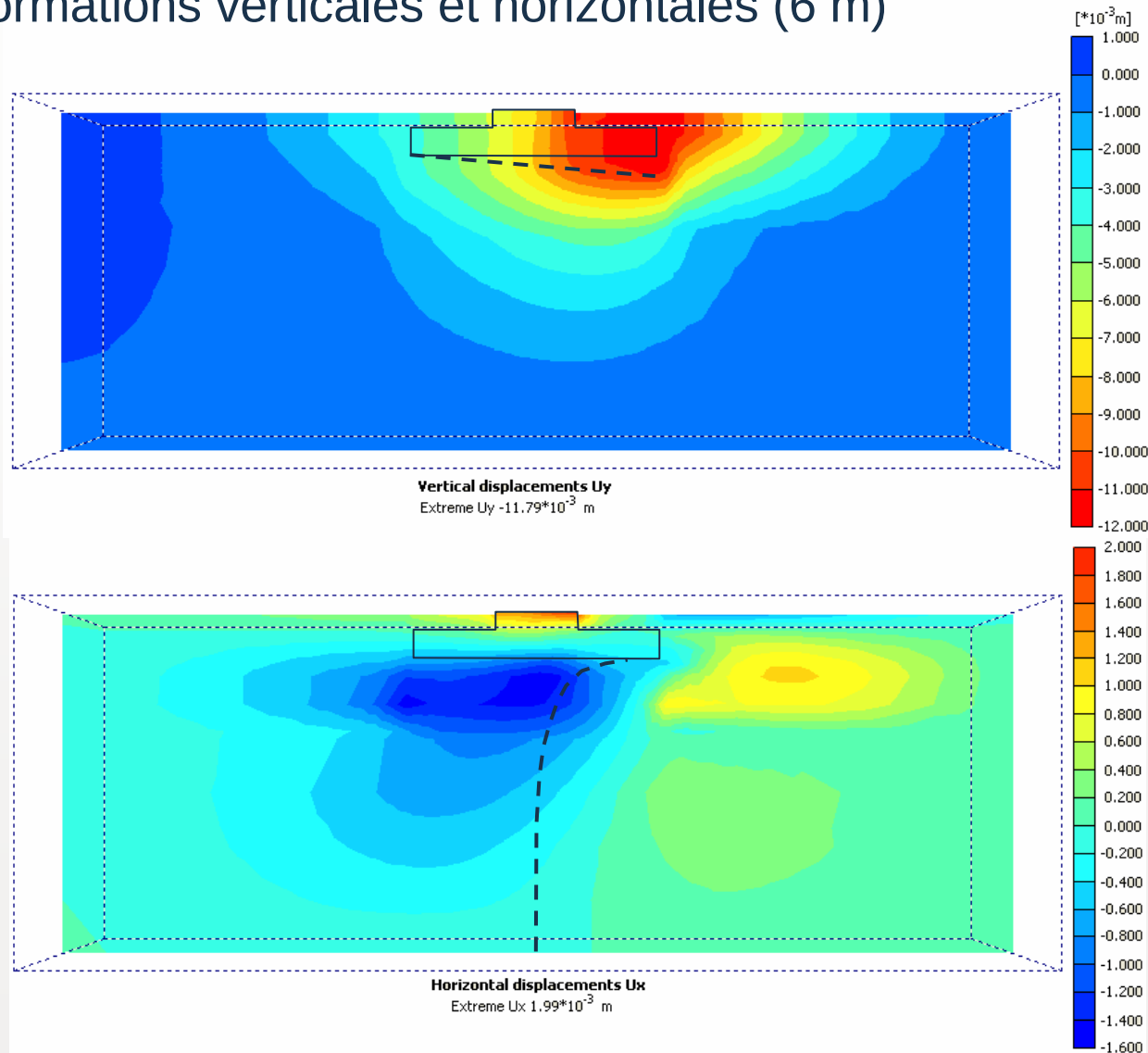


Déplacements de la fondation

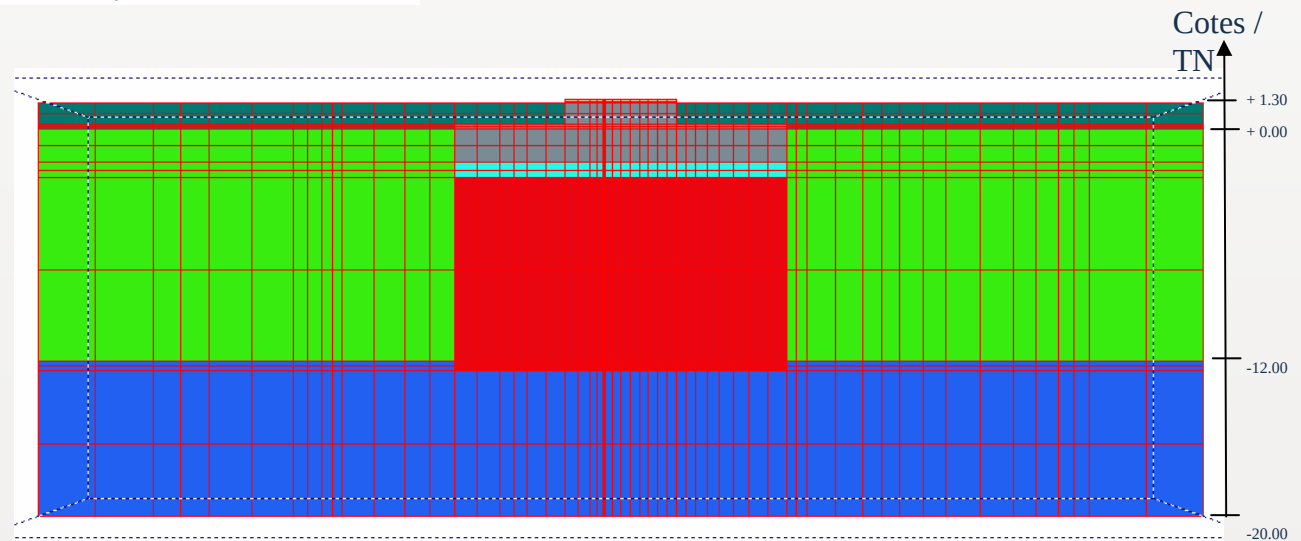
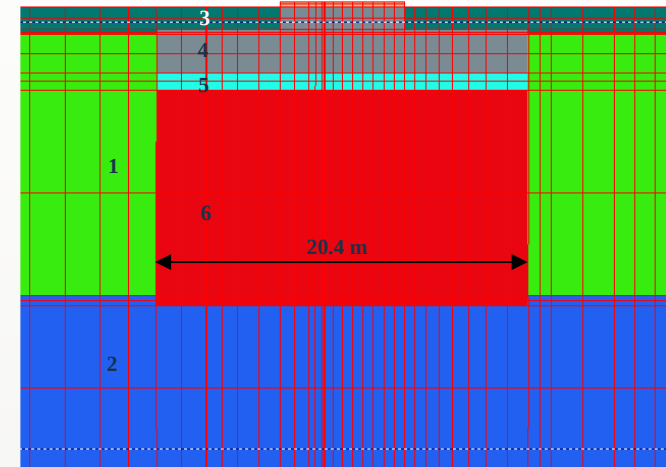
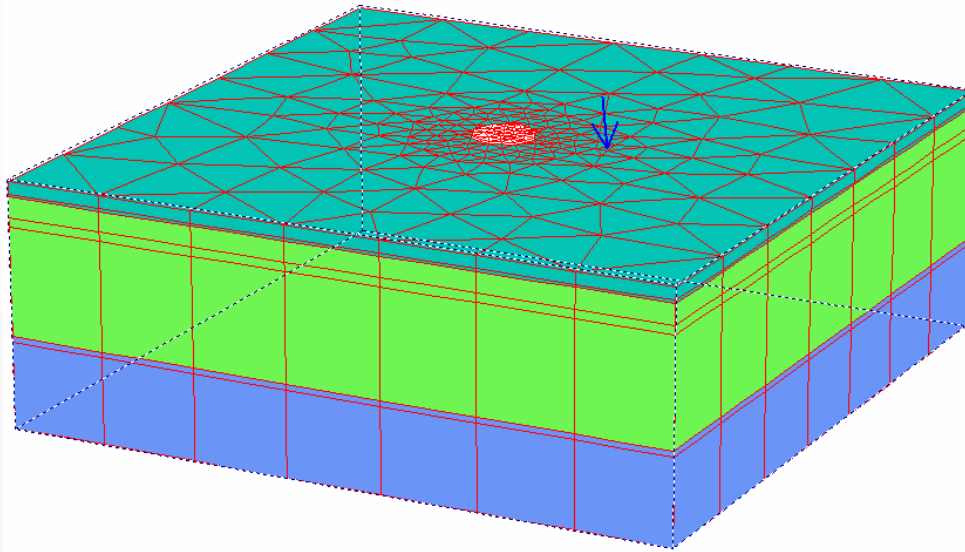


Déplacements de la fondation

- Déformations verticales et horizontales (6 m)

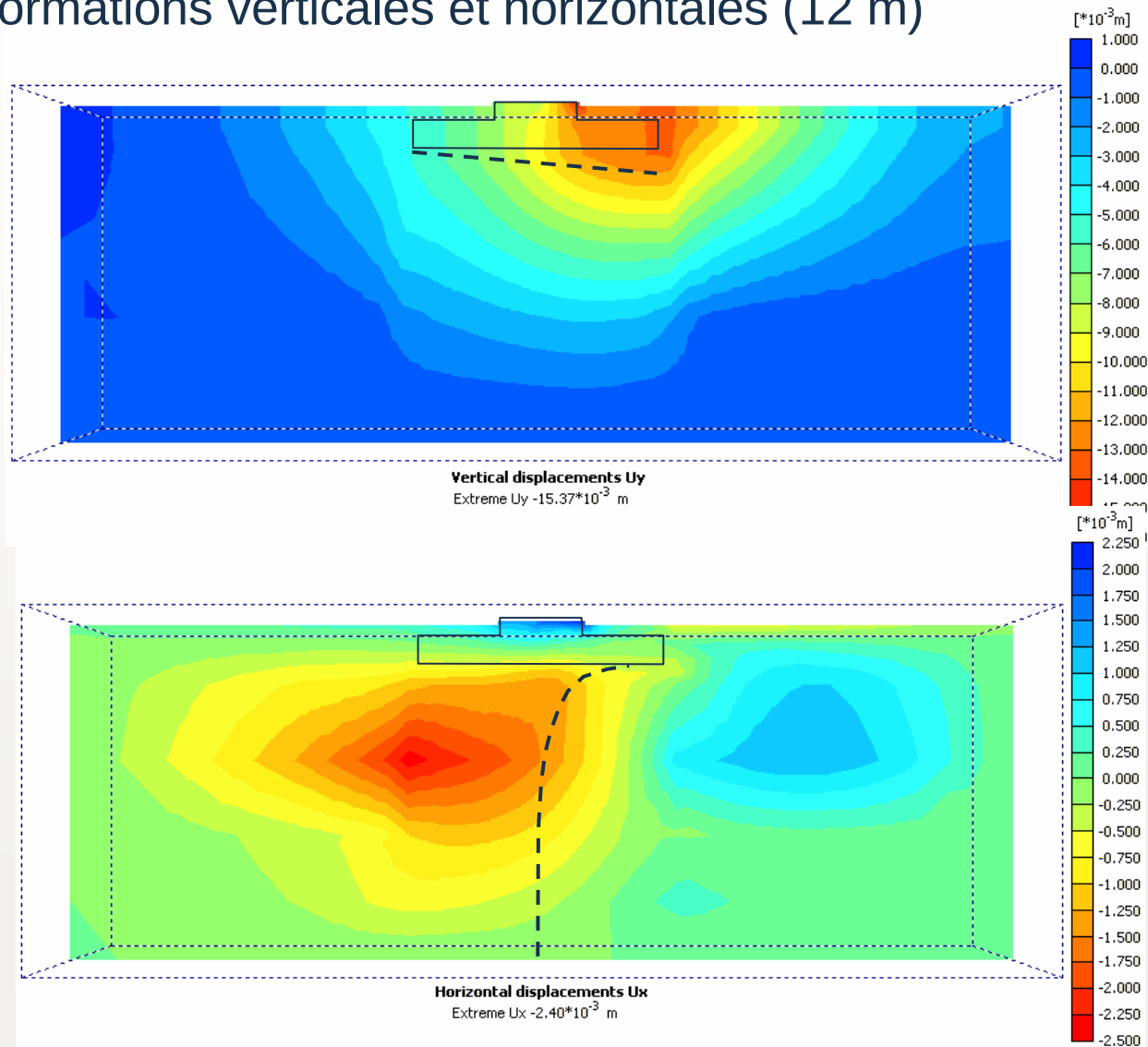


Déplacements de la fondation



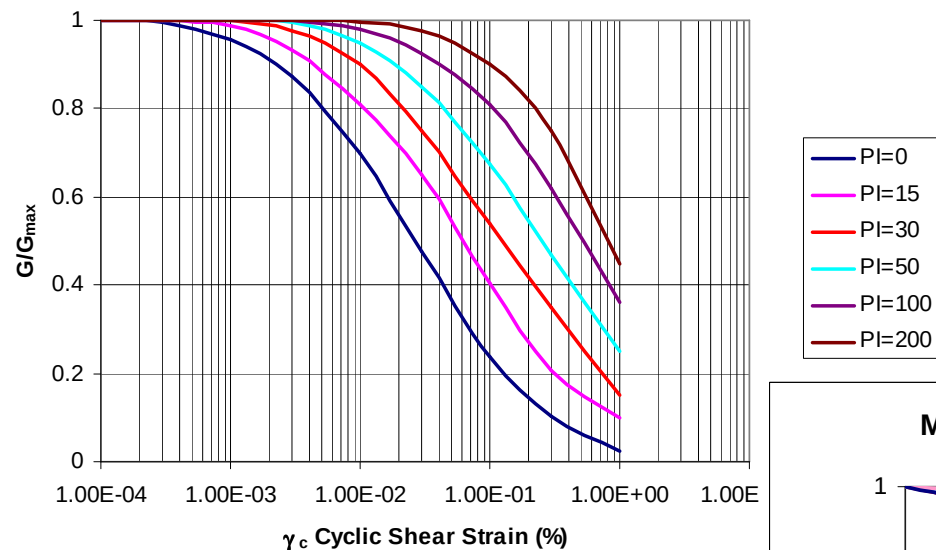
Déplacements de la fondation

- Déformations verticales et horizontales (12 m)

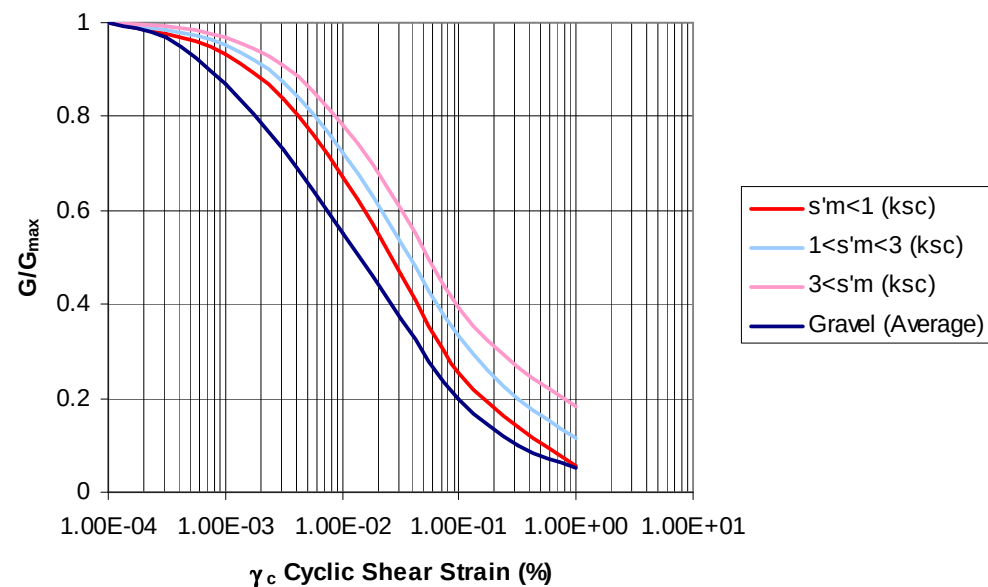


Comportement en petites déformations

Modulus Degradation Curve (Vucetic & Dobry, 1991)



Modulus Degradation Curve (Seed et al., 1984)

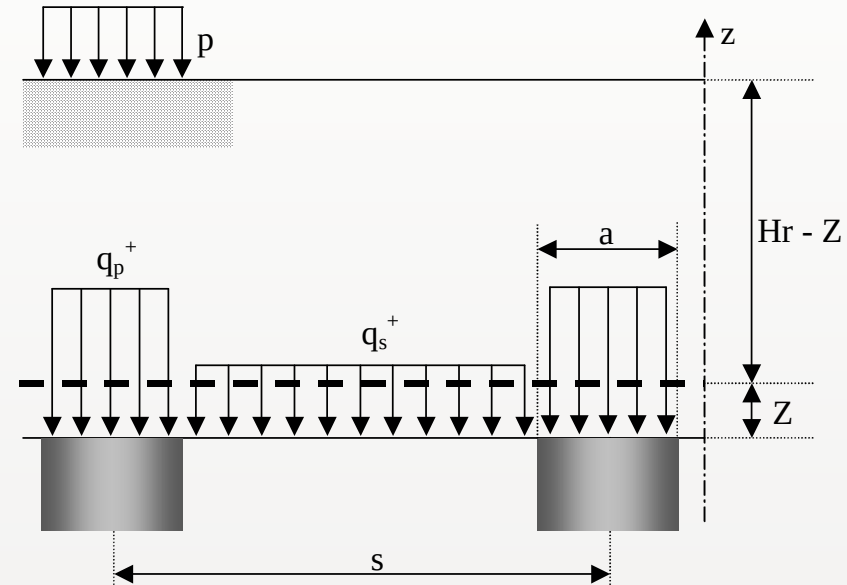
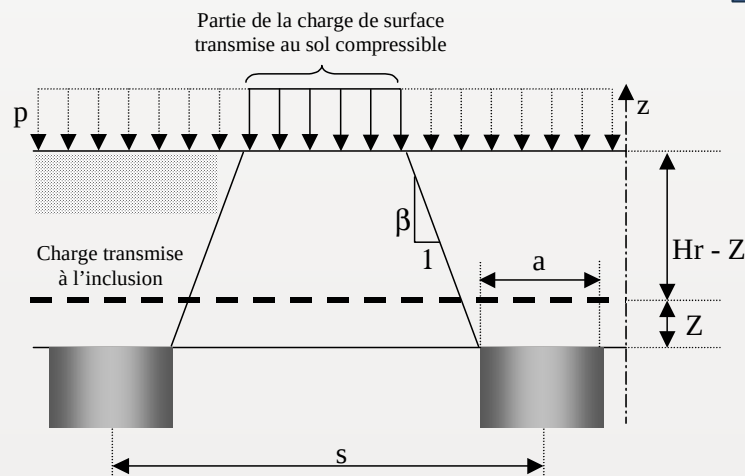
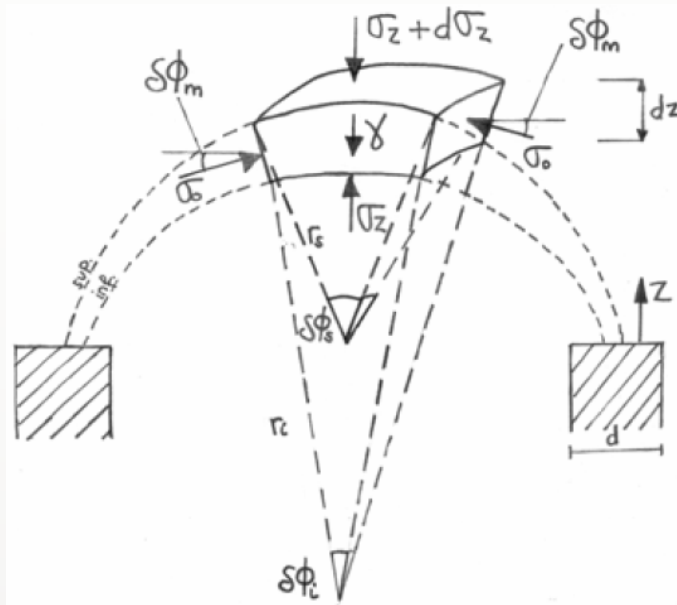


Sommaire



1. Présentation du principe de la solution de renforcement de sol par inclusions rigides sous fondation d'éolienne:
 - Implantation type des colonnes
 - matelas de répartition
 - coupe type
2. Spécifications techniques spécifiques des éoliennes viss-à-vis des inclusions rigides:
 - Capacité portante ELS/ELU et contraintes appliquées
 - Tassements admissibles
 - $K_{\phi, \text{dyn}}$, efforts cycliques et résonance du système
3. **Dimensionnement et vérification du renforcement de sol:**
 - Répartition des contraintes dans le matelas
 - Transmission des efforts verticaux
 - Transmission des efforts horizontaux et cisaillement admissibles

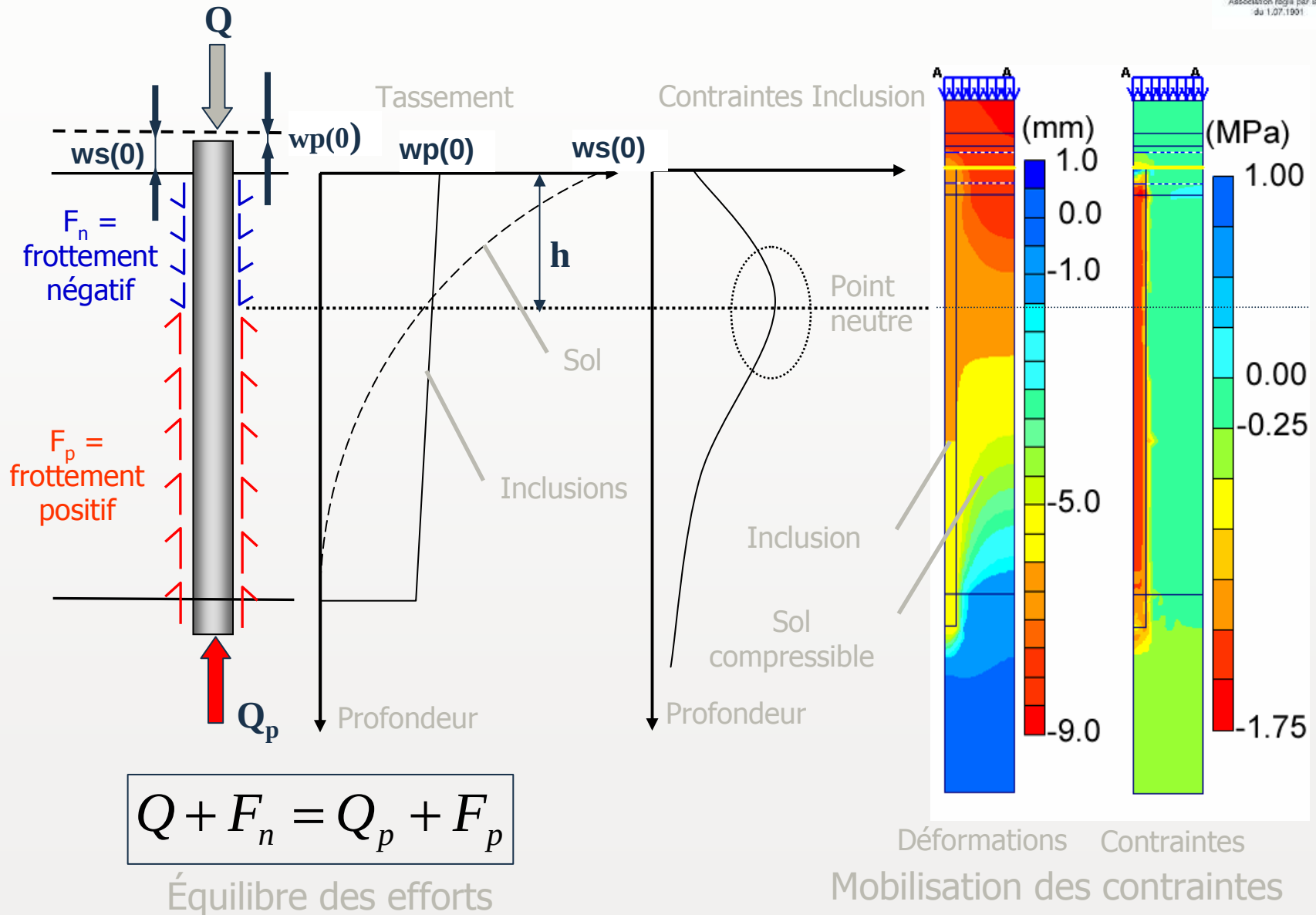
Répartition des contraintes dans le matelas



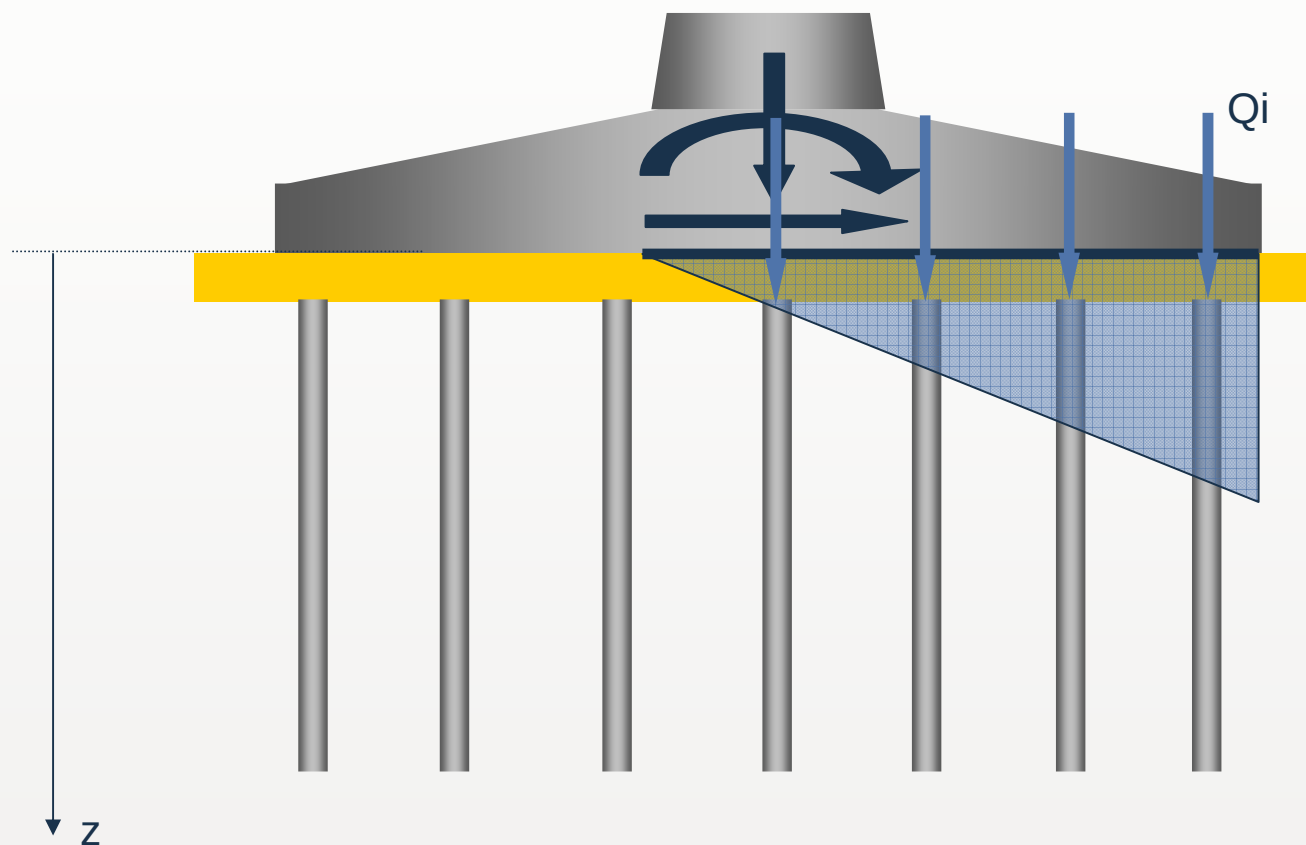
$$E = \frac{Q_p^+}{A(\gamma H_r + p)} = \frac{q_p^+ \cdot A_p}{A(\gamma H_r + p)}$$

$$SSR = \frac{Q_s^+}{(A - A_p)(\gamma H_r + p)} = \frac{q_s^+ \cdot (A - A_p)}{(A - A_p)(\gamma H_r + p)} = \frac{q_s^+}{\gamma H_r + p}$$

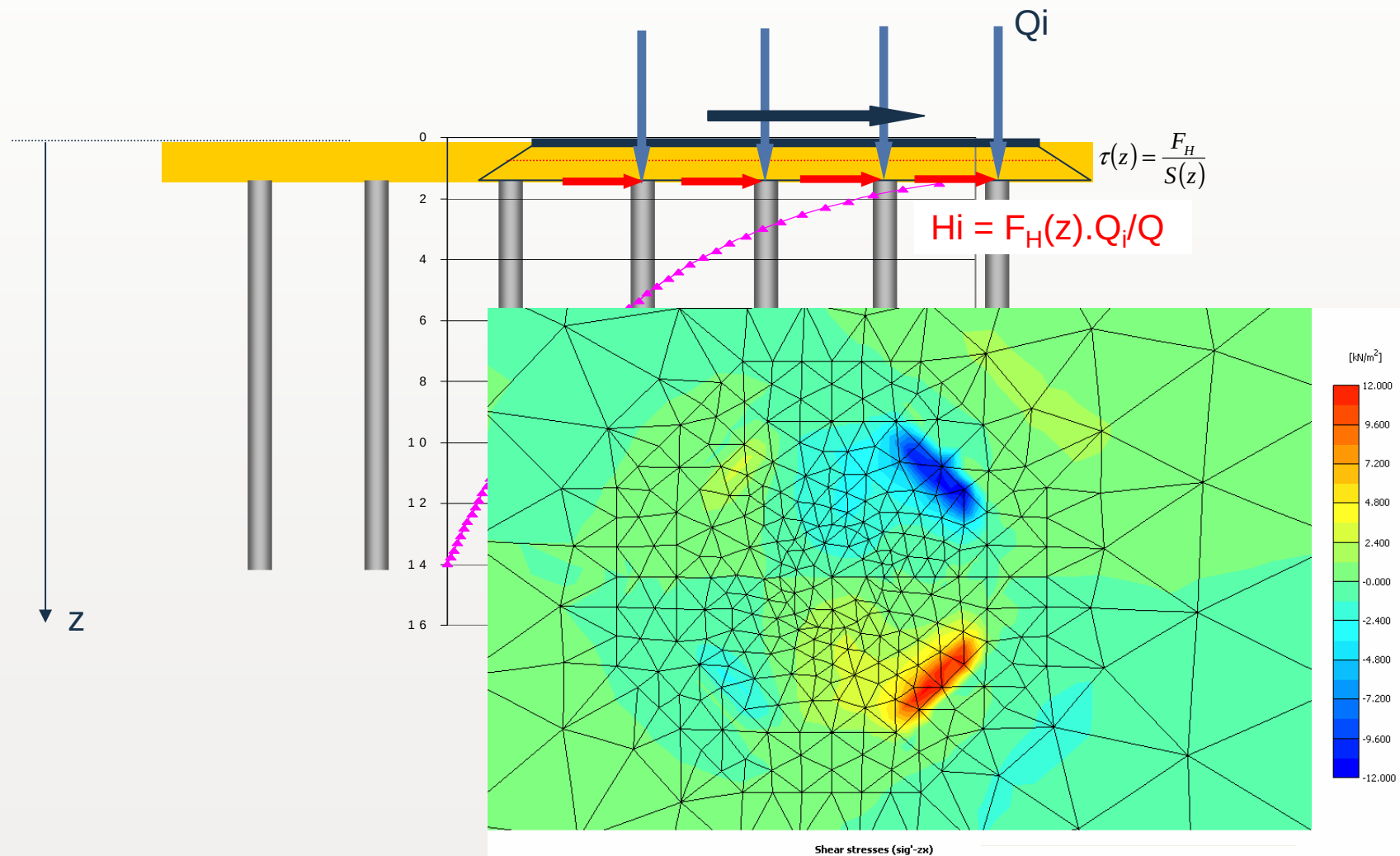
Transmission des efforts verticaux



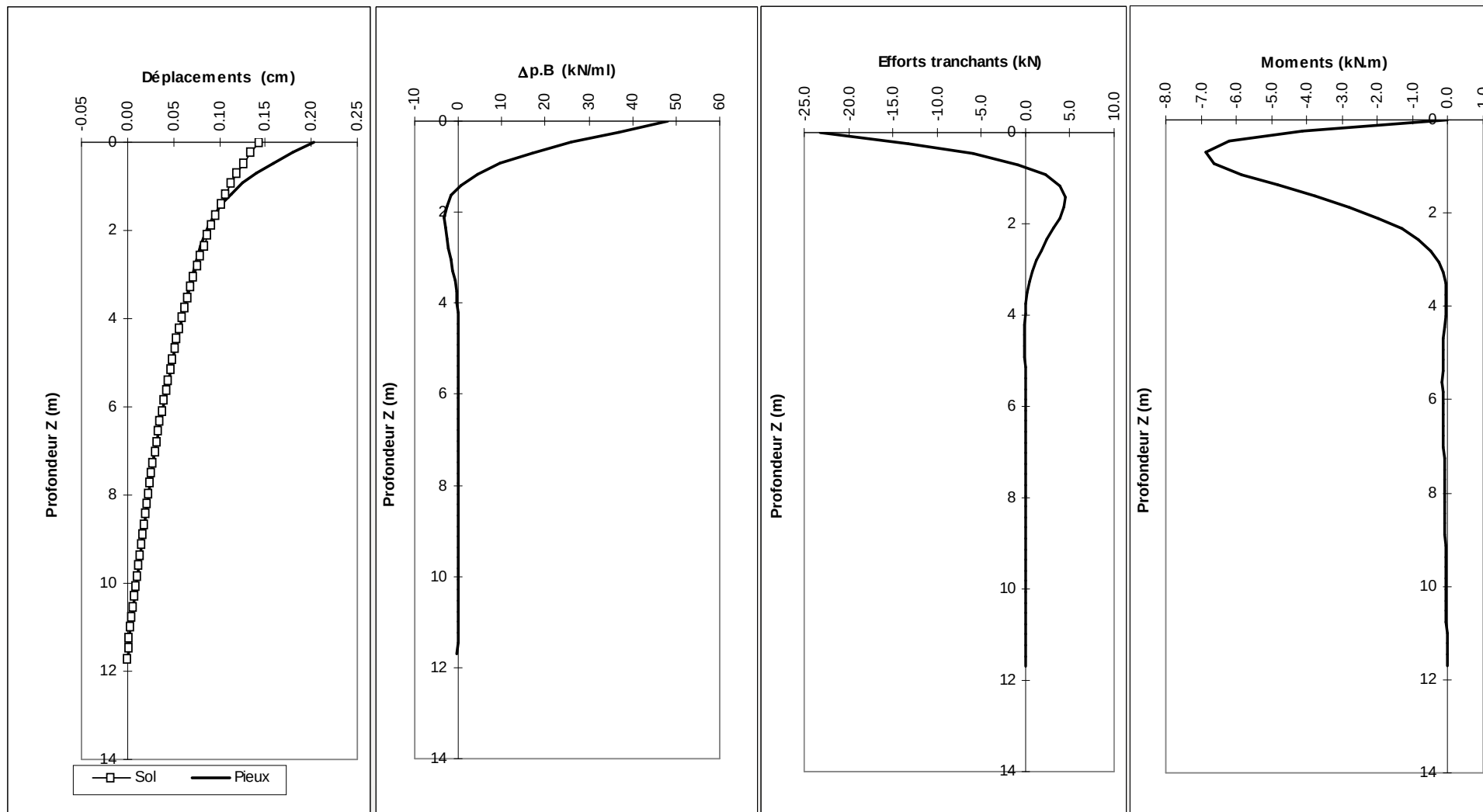
Transmission des efforts horizontaux



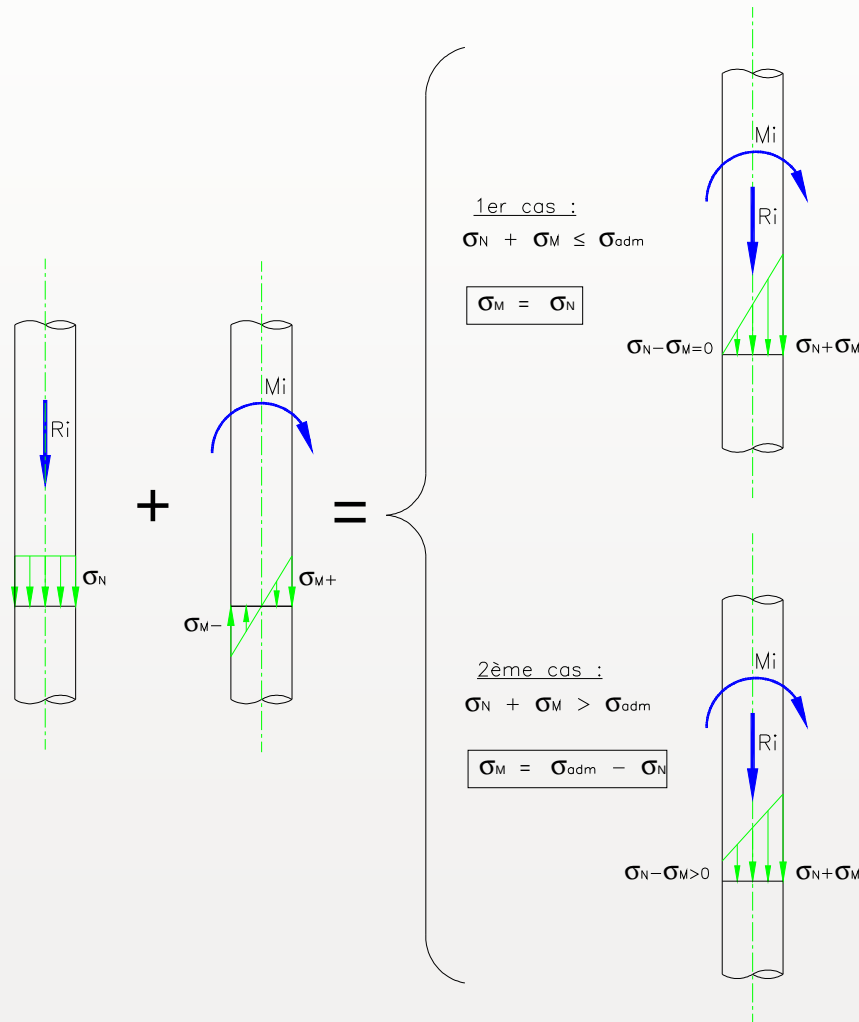
Transmission des efforts horizontaux



Transmission des efforts horizontaux



Transmission des efforts horizontaux



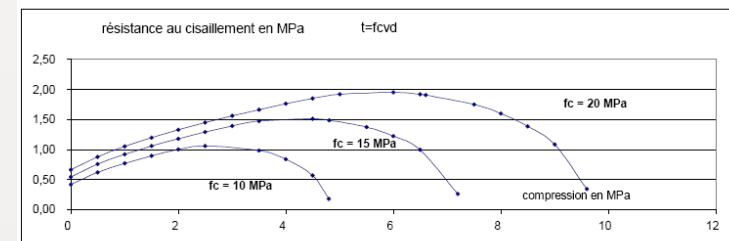
III SECTION 12 STRUCTURE EN BETON NON ARME OU FAIBLEMENT ARME

variable pour pieu $\Phi > 600\text{mm}$ sans effet dynamique et si $N_{ed}/A_c < 0.3f_{ck}$

caractéristique	résistance en traction				en compression	au cisaillement		
	f_{ct}	f_{ct}^*	f_{ctm}	f_{ctk}	f_{cd}	σ_{ctm}	σ	$\tau = f_{c,vd}$
	$f_{ct}/1.2/1.15$	$0.3\eta_f f_{ck}^{(2/3)}$	$0.7f_{ctm}$	$0.7\eta_f f_{ctm}/0.9/1.5$	$f_{ct}/1.5$			
10	7,25	1,12	0,79	0,42	4,83	1,86	0,00	0,42
10	7,25	1,12	0,79	0,42	4,83	1,86	0,50	0,62
10	7,25	1,12	0,79	0,42	4,83	1,86	1,00	0,77
10	7,25	1,12	0,79	0,42	4,83	1,86	1,50	0,90
10	7,25	1,12	0,79	0,42	4,83	1,86	2,00	1,00
10	7,25	1,12	0,79	0,42	4,83	1,86	2,50	1,06
10	7,25	1,12	0,79	0,42	4,83	1,86	3,50	0,99
10	7,25	1,12	0,79	0,42	4,83	1,86	4,00	0,84
10	7,25	1,12	0,79	0,42	4,83	1,86	4,50	0,57
10	7,25	1,12	0,79	0,42	4,83	1,86	4,80	0,18

15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	0,00	0,55
15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	0,50	0,76
15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	1,00	0,92
15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	1,50	1,06
15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	2,00	1,18
15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	2,50	1,29
15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	3,00	1,40
15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	3,50	1,48
15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	4,50	1,51
15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	4,81	1,49
15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	5,50	1,38
15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	6,00	1,23
15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	6,50	1,00
15	10,87	1,47	1,03	0,55	7,25	3,11	7,20	0,26

20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	0,00	0,67
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	0,50	0,88
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	1,00	1,05
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	1,50	1,20
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	2,00	1,33
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	2,50	1,45
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	3,00	1,56
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	3,50	1,67
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	4,00	1,76
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	4,50	1,85
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	5,00	1,92
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	6,00	1,95
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	6,50	1,92
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	6,60	1,91
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	7,50	1,75
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	8,00	1,60
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	8,50	1,39
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	9,00	1,09
20	14,49	1,78	1,25	0,67	9,66	4,42	9,60	0,35



Conclusions



- ▶ Solution économique permettant un bon contrôle des déformations de l'ouvrage,
- ▶ Sollicitations et paramètres de dimensionnement « inhabituels »,
- ▶ Justification vis-à-vis des efforts verticaux, des efforts horizontaux et des moments,
- ▶ Capacité portante à vérifier par rapport à tous les cas de charge ELS et ELU,
- ▶ Les déformations doivent être contrôlées sur toute la durée de vie de l'ouvrage malgré les efforts variables et les vibrations,