

Groupe de Travail "Fondations d'éoliennes"

Approche pour le dimensionnement des renforcements de sol
par colonnes ballastées

EOLIENNE



Serge Lambert KELLER Fondations Spéciales

Journée du 20 octobre 2009

Projet de Recommandations : Le Sommaire



Chapitre	1	Principes généraux
Chapitre	2	Caractéristiques du traitement
Chapitre	3	Vérification de la portance et du glissement
Chapitre	4	Calcul des déformations
Chapitre	5	Vérifications et contrôles
Chapitre	6	Exemples

Projet de Recommandations : Le Sommaire

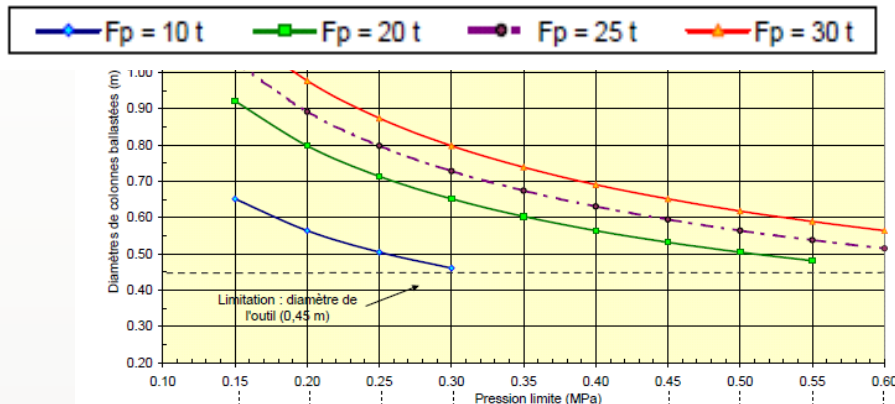


Chapitre	1	Principes généraux
Chapitre	2	Caractéristiques du traitement
Chapitre	3	Vérification de la portance et du glissement
Chapitre	4	Calcul des déformations
Chapitre	5	Vérifications et contrôles
Chapitre	6	Exemples

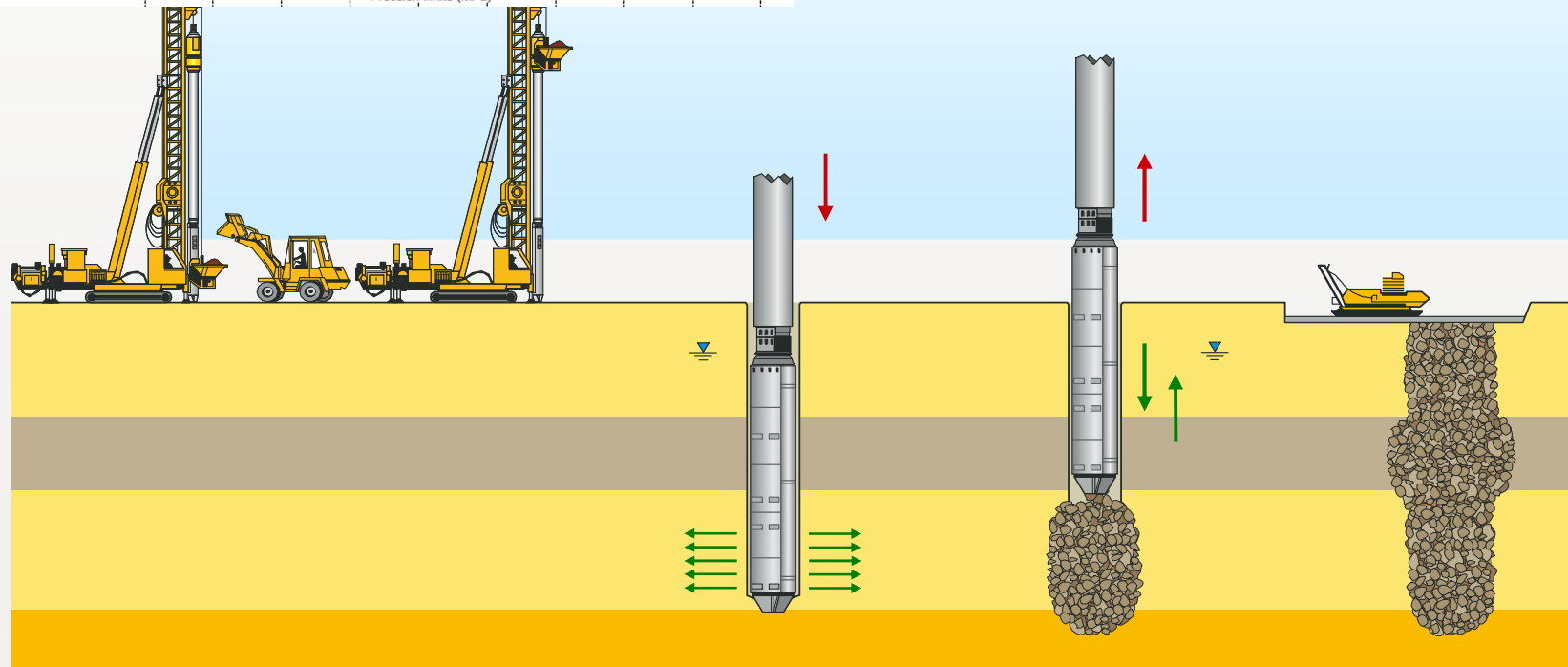
1. Principes généraux ► Procédure d'exécution

KELLER

Evolution du diamètre des colonnes ballastées en fonction de la compacité du terrain

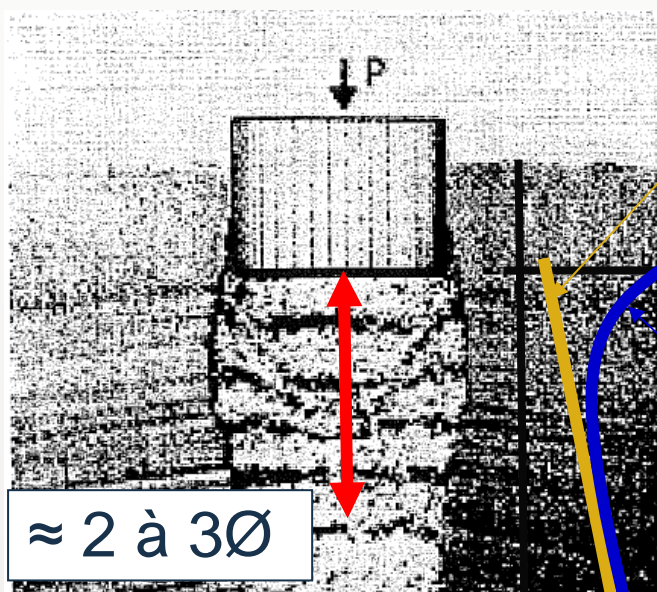


- matériau granulaire refoulé
- diamètres importants et variables en fonction de l'hétérogénéité du sol
- état de contraintes dans le sol fortement modifié par le refoulement
- amélioration des caractéristiques dans certains type de sol



1. Principes généraux /Rappel du comportement des CB

- répartition des charges entre le sol et les colonnes ballastées en fonction des raideurs verticales
- le comportement du sol d'une colonne ballastée isolée est différent d'un groupe de colonnes sous une semelle (notion de 1,5 B):

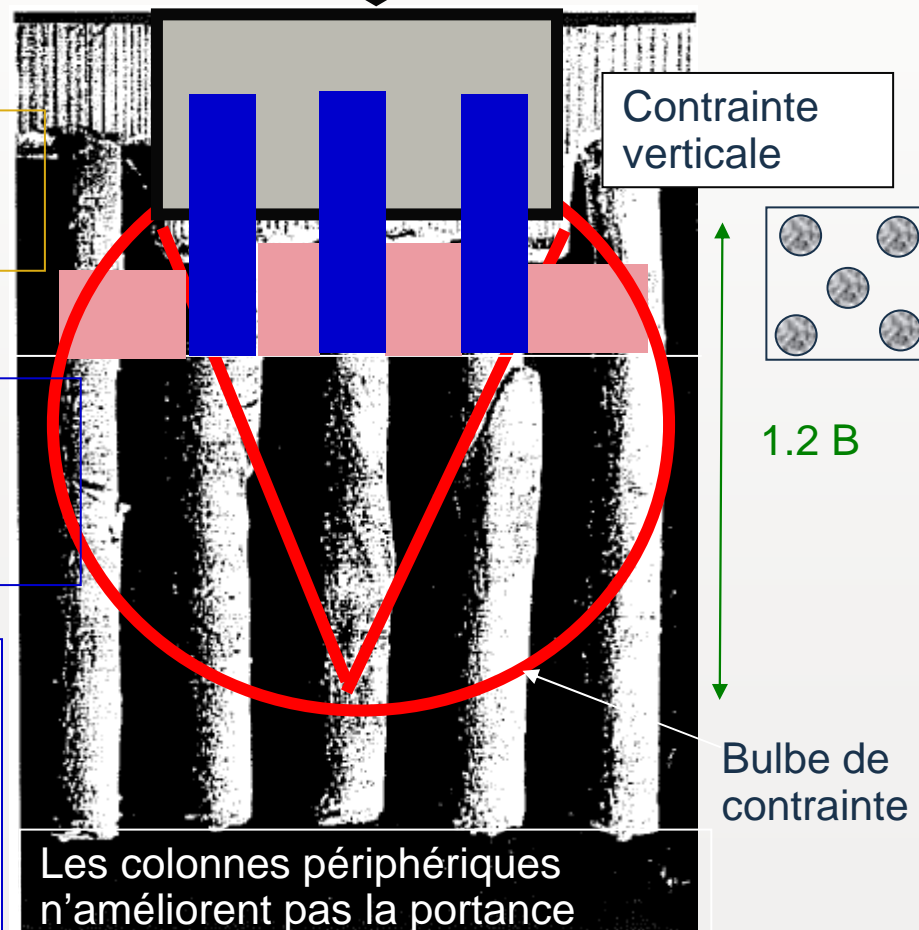


Contrainte
verticale
dans le sol

Contrainte
verticale
dans la
colonne

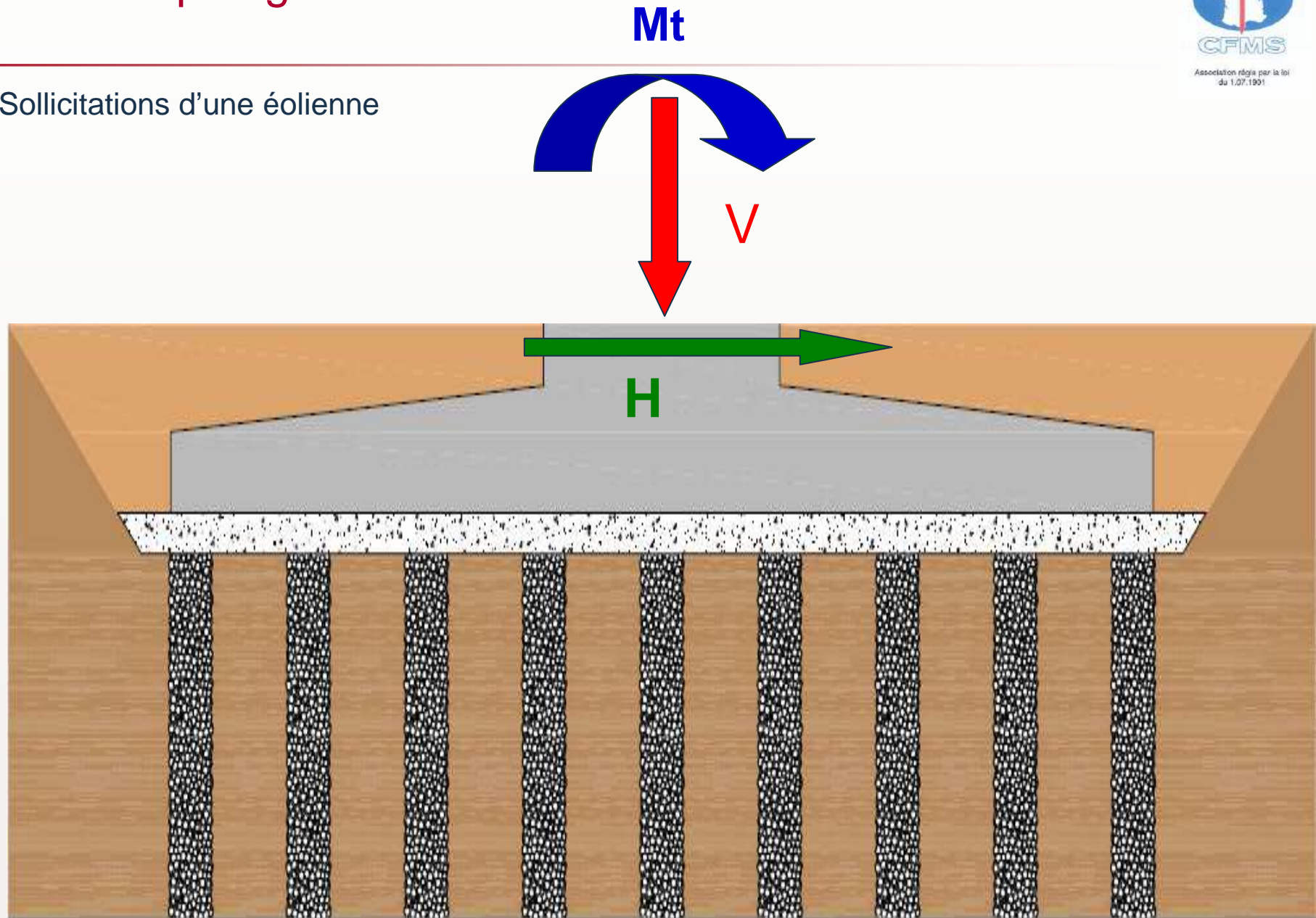
Etreinte latérale fonction de:

- des caractéristiques du sol
- la profondeur (poids des terres)
- la modification de l'état de contrainte du sol
- de la surcharge en périphérie de la CB



1. Principes généraux

Sollicitations d'une éolienne



Projet de Recommandations : Le Sommaire



Chapitre	1	Principes généraux
Chapitre	2	Caractéristiques du traitement
Chapitre	3	Vérification de la portance et du glissement
Chapitre	4	Calcul des déformations
Chapitre	5	Vérifications et contrôles
Chapitre	6	Exemples

2. Caractéristiques du traitement

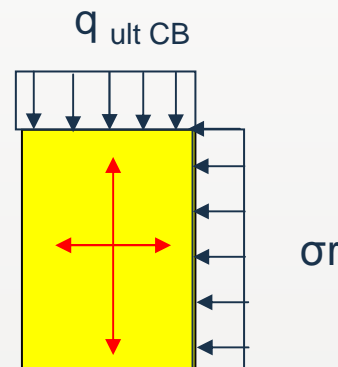
CARACTERISTIQUES DE LA COLONNE BALLASTEE ISOLEE

► **Contrainte maximale** admissible dans une **colonne isolée**

- **Rupture par expansion latérale (sur 1.5 B maximum)**

Colonne: $q_{ult.CB} = 1/Ka(colonne) \sigma_r = \tan^2 (\pi/4 + \varphi'_c /2) \sigma_r$

σ_r = lié à PI dans un sol vierge non chargé et qui n'a pas subi de modification d'état de contrainte par le refoulement de gravier latéralement



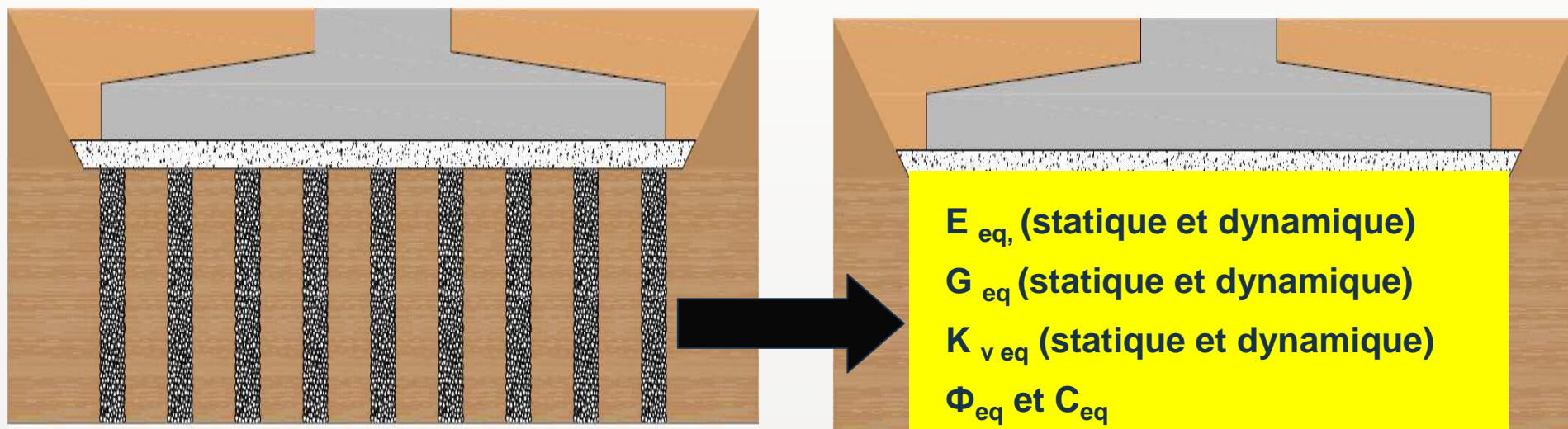
- **Rupture par poinçonnement** (cas rare des colonnes courtes et flottantes)

► **Module de déformation statique** à 10^{-2} de la colonne ballastée

► **Module de déformation dynamique** à 10^{-4} de la colonne ballastée

2. Caractéristiques du traitement

CARACTERISTIQUES EQUIVALENTES DU SOL RENFORCE PAR COLONNE BALLASTEE



Définition des paramètres équivalents par des :

- **Approches très simples** moyennes entre le sol et les colonnes ballastées (gravier)
- **Approches plus rigoureuses** méthodes analytiques (Recommandations cb, Priebe,...)
- **Approches plus complexes** méthodes numériques (éléments finis, différences finies,...)

2. Caractéristiques du traitement



- ▶ **Quelles sont les objectifs fixés par le fabricant d'éolienne et le BE structure pour le renforcement de sol ?**
- Définir un sol avec des **caractéristiques équivalentes** (moyennes de caractéristiques mécaniques, modélisation à partir de méthodes analytiques ou numériques)
- Dimensionnement des massifs par le BE structure comme un **massif embase poids superficiel classique** (peu de différence entre les coefficients de réaction de la CB et le sol)

Projet de Recommandations : Le Sommaire



Chapitre	1	Principes généraux
Chapitre	2	Caractéristiques du traitement
Chapitre	3	Vérification de la portance et du glissement
Chapitre	4	Calcul des déformations
Chapitre	5	Vérifications et contrôles
Chapitre	6	Exemples

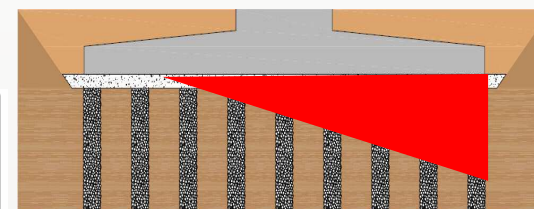
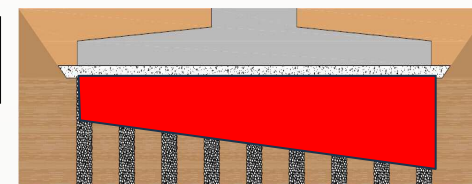
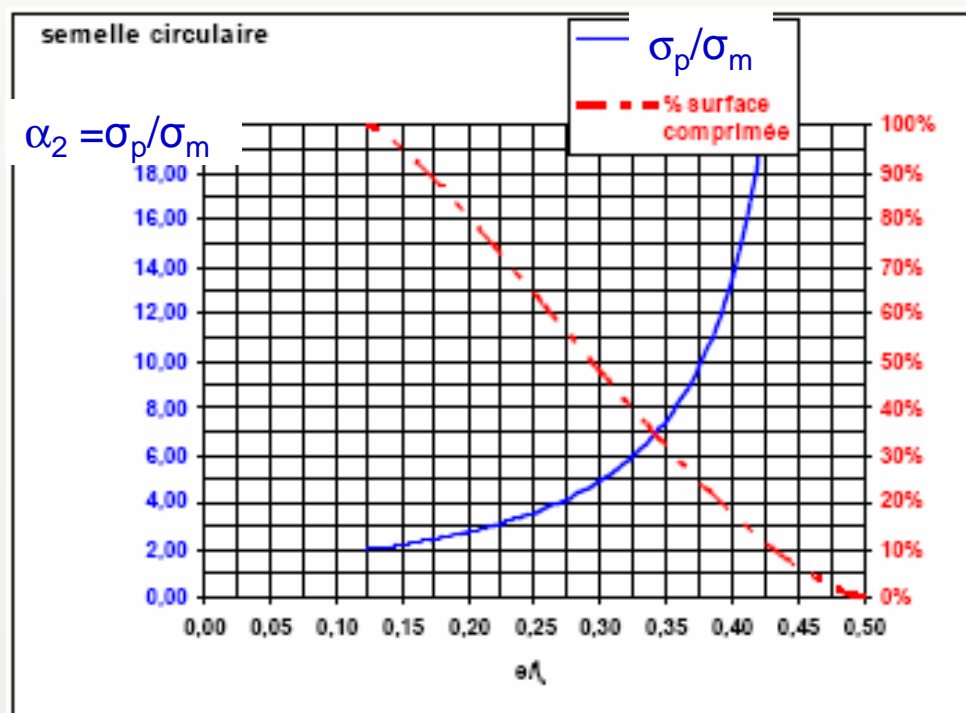
3. Vérification de la portance et du glissement

Non rupture par perte de la capacité portante

Surface entièrement comprimée: $\text{réf} = (3 \cdot \sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 4$

quand $\sigma_{\min} = 0$:

$$q_{\text{ref}} = 3 \cdot \alpha_2 \cdot \sigma_{\max} / 4$$



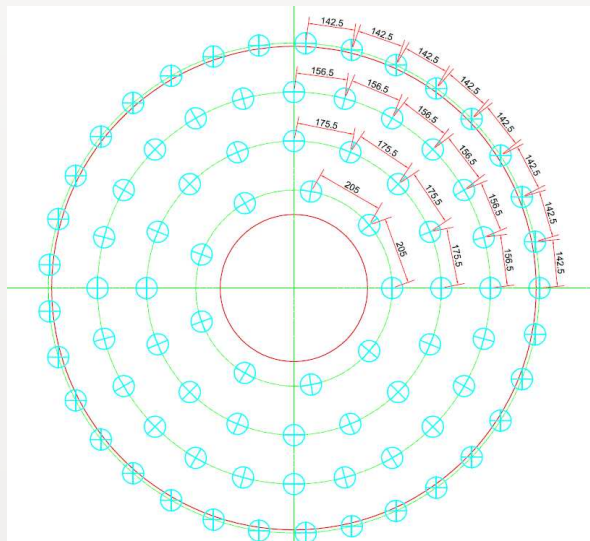
3. Vérification de la portance et du glissement

Non rupture par perte de la capacité portante

Critère de portance globale

$$\{ n A_{cb} q_{a\ cb\ ELS} + (Ss - n A_{cb}) q'_{a\ ELS\ sol} \} > q_{refELLS} \times Ss \text{ à l'ELS}$$

$$\{ n A_{cb} q_{a\ cb\ ELU} + (Ss - n A_{cb}) q'_{a\ ELU\ sol} \} > q_{refELU} \times Ss \text{ à l'ELU}$$



$$q'_{a\ sol} = k_p p_{le} / \gamma_s + q'_{o}$$

$$\text{OU } q_{a\ sol} = k_c q_{ce} / \gamma_s + q'_{o}$$

avec

$$\gamma_s = 3 \text{ à l'ELS et } 2 \text{ à l'ELU}$$

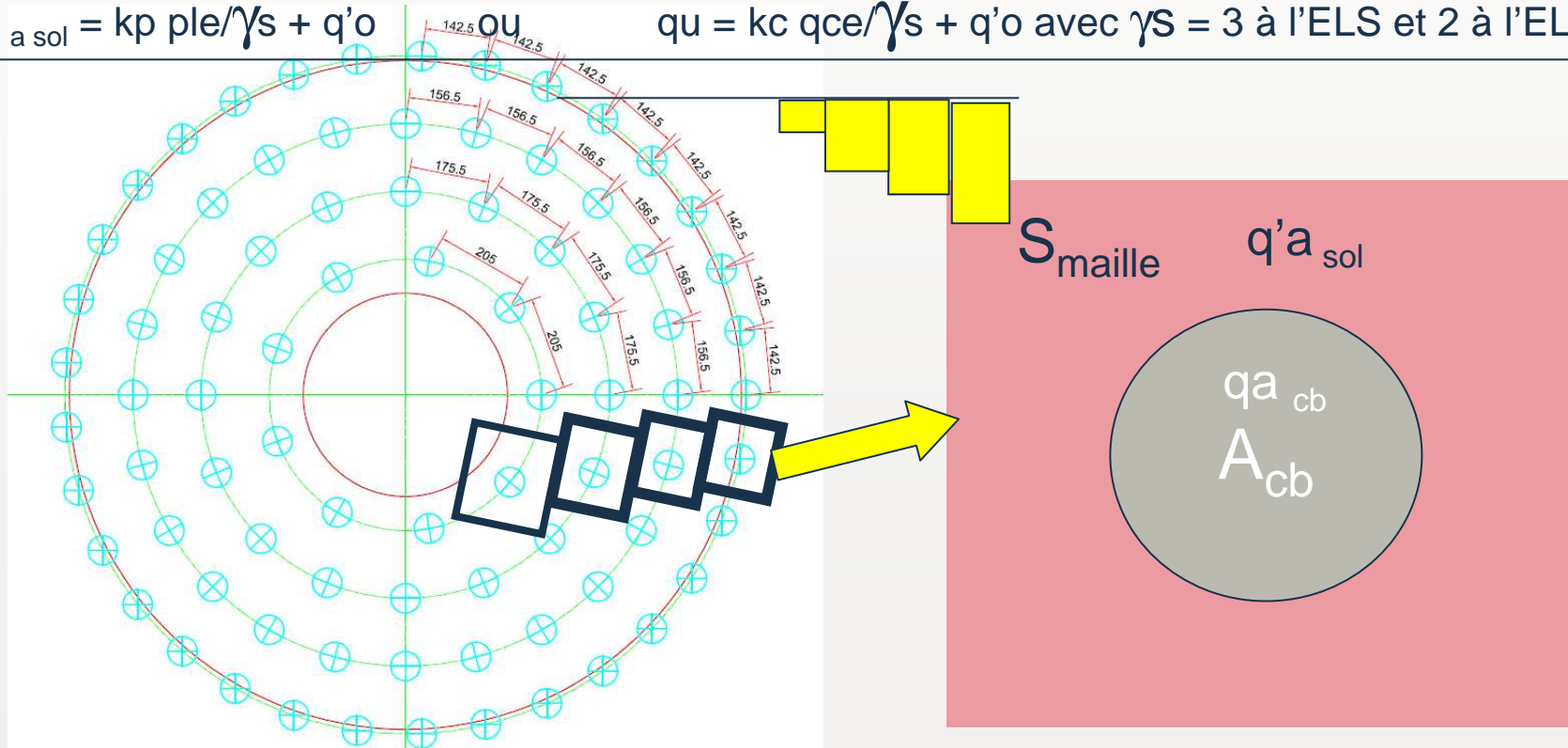
3. Vérification de la portance et du glissement

Critère de portance locale

$$\{A_{cb} q_{a\ cb\ ELS} + (S_{maille} - A_{cb}) q'_{a\ ELS\ sol}\} > q_{maille\ ELS} \times S_{maille} \text{ à l'ELS}$$

$$\{A_{cb} q_{a\ cb\ ELU} + (S_{maille} - A_{cb}) q'_{a\ ELU\ sol}\} > q_{maille\ ELU} \times S_{maille} \text{ à l'ELU}$$

$$q'_{a\ sol} = k_p p_{le} / \gamma_s + q'_o \quad \text{ou} \quad q_u = k_c q_{ce} / \gamma_s + q'_o \text{ avec } \gamma_s = 3 \text{ à l'ELS et } 2 \text{ à l'ELU}$$



3. Vérification de la portance et du glissement



Non rupture par glissement

$$H_{ELUacc} < Q_{min} \times tg \delta^* / \gamma_s,$$

où δ^ est l'angle de frottement entre la semelle et le sol renforcé par colonne ballastée qu'on assimile à l'angle de frottement φ^* du sol renforcé par colonnes ballastées*

*γ_s coefficient de sécurité de
1,2 sous combinaisons fondamentales et
1,1 sous combinaisons accidentelles.*

Projet de Recommandations : Le Sommaire

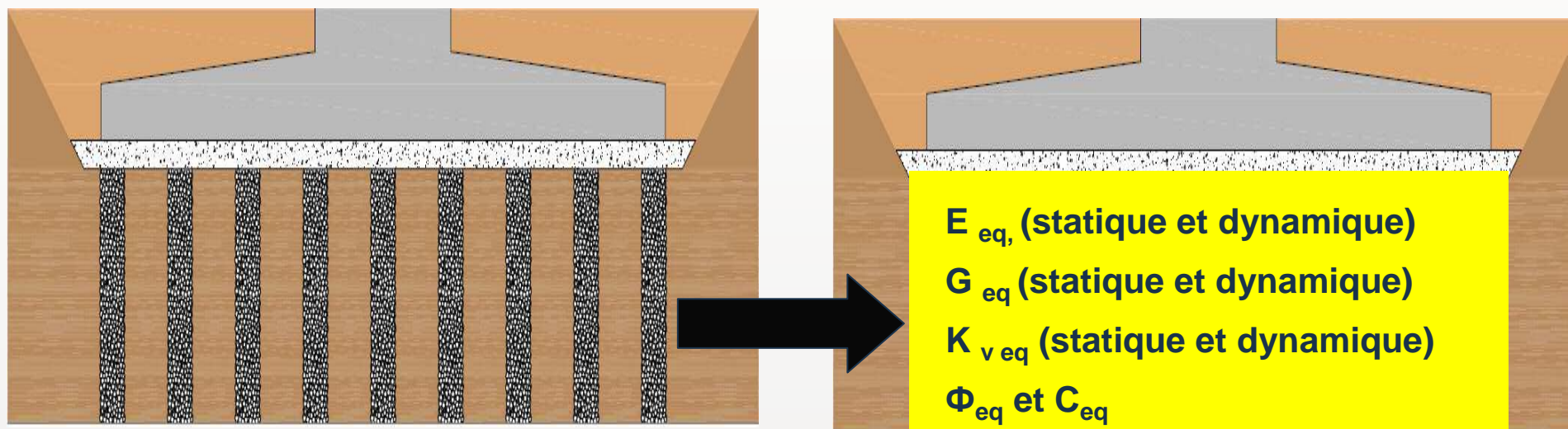


Chapitre	1	Principes généraux
Chapitre	2	Caractéristiques du traitement
Chapitre	3	Vérification de la portance et du glissement
Chapitre	4	Calcul des déformations
Chapitre	5	Vérifications et contrôles
Chapitre	6	Exemples

4. Calcul des déformations

La vérification et la définition des paramètres équivalents par :

- **Approche simple** des moyennes entre le sol et les colonnes ballastées (Pré étude)
- **Approche plus rigoureuse** calcul analytique ou aux éléments finis



Les paramètres équivalents vont permettre d'effectuer un calcul en 3 dimensions en appliquant V, H, Mt afin de déterminer la rotation du massif

4. Calcul des déformations

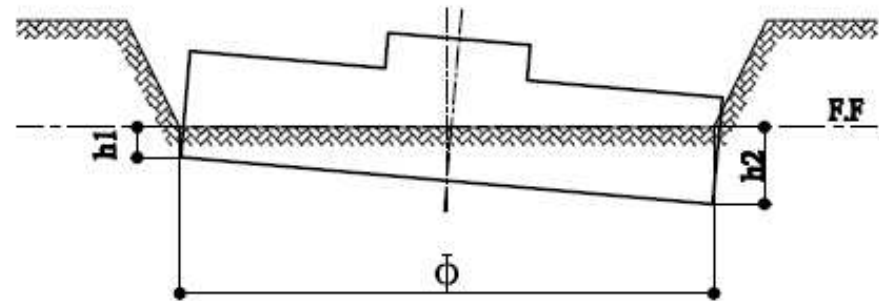
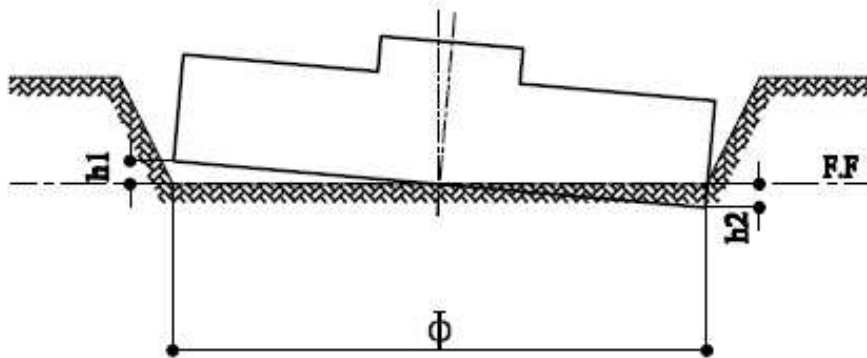
Tassement global (10^{-3} et 10^{-2})

sous une charge apportant une contrainte q , on peut calculer le tassement w , et donc déterminer **une raideur $K_{vs} = q / w$ statique**

Rotation

Le calcul de la rotation est donnée selon la formule suivante :

$$\varphi = (h_2 - h_1) / \Phi$$



4. Calcul des déformations



► Critère de raideur en rotation K_{ϕ} dyn

Les constructeurs imposent une valeur minimale de la raideur en rotation à petite déformation (de 10^{-5} à 10^{-3}) « K_{ϕ} dyn » pour éviter les phénomènes de couplage avec les parties mécaniques de la machine.

Projet de Recommandations : Le Sommaire



Chapitre	1	Principes généraux
Chapitre	2	Caractéristiques du traitement
Chapitre	3	Vérification de la portance et du glissement
Chapitre	4	Calcul des déformations
Chapitre	5	Vérifications et contrôles
Chapitre	6	Exemples

Contrôle par des sondages dans les colonnes et des essais de chargement

Fluide de lançage	AIR avec enregistrement de paramètres
Contrôle Diamètre	1 par tranche de 50 colonnes jusqu'à 100, minimum 3
Contrôle Compacité	1/80 sous radier avec un minimum de 5
Essai Chargement	1 essai jusqu'à 2 000 m et 400 colonnes, et un autre au moins au-delà.

Projet de Recommandations : Le Sommaire



Chapitre	1	Principes généraux
Chapitre	2	Caractéristiques du traitement
Chapitre	3	Vérification de la portance et du glissement
Chapitre	4	Calcul des déformations
Chapitre	5	Vérifications et contrôles
Chapitre	6	Exemples

5. Exemples



REFERENCES

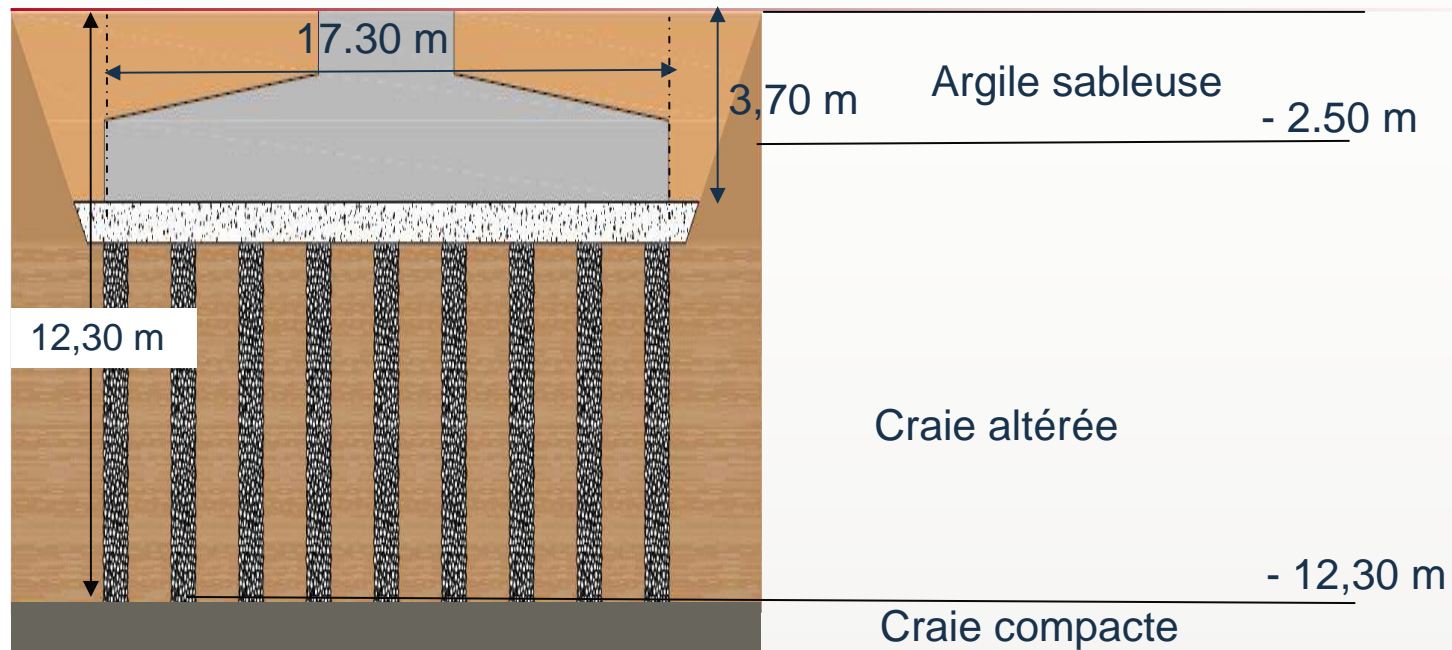
- ▶ Premier chantier : 1995 (à Grevenbroich en Allemagne)
- ▶ ces 14 dernières années plus 250 éoliennes sur colonnes ballastées !

Exemples

► Exemples de deux chantiers en France

- Parc Eolien de Brailly-Cornehotte (80)
- Parc Eolien de RAMBURES (80)

Parc Eolien de Brailly-Cornehotte (80)



Couches	Profondeur de la base / TN	Epaisseur de la couche	E _M (MPa)	P ₁ (MPa)	α	c (kPa)	φ (°)
Argile sableuse marron	2,5 m	2,5 m	6	0,5	2/3	5	25
Craie molle altérée	3,5 m	1 m	6,3	0,63	1/2	2	27
	5 m	1,5 m	22,1	0,73	2/3	2	27
	8 m	3 m	4,9	0,51	1/2	3	27
	10 m	2 m	2,4	0,22	1/2	3	27
	11,5 m	1,5 m	6	0,54	1/2	3	27
	12,3 m	0,8 m	2,47	1,4	2/3	5	30
Craie blanche	> 25 m	> 12,7 m	56,67	4,31	1/2	10	35

Parc Eolien de Brailly-Cornehotte (80)

CAS DE CHARGES	F_{XY} (KN)	F_Z (KN)	M_{XY} (KN.m)
DLC 1.0. (QP)	490	15 329 - 21 583	40 272
DLC 6.2. (acc.)	820	15 329 - 21 733	70 196

Cas de charge	Facteurs partiels de pondération sur sollicitations *				
	Etats Limites	F_Z	H	M_{XY}	Eau
DLC _{QP}	ELU _{Fond}	1,0 ou 1,35	1,8	1,8	1,125 x 1,05
	ELS _{perm}	1,0	1,0	1,0	1,0
DLC _{Rare}	ELU _{Fond}	1,0 ou 1,35	1,5	1,5	1,125 x 1,05
	ELS _{Rare}	1,0	1,0	1,0	1,0
DLC _{Acc}	ELU _{Acc}	0,9 ou 1,10	1,1	1,1	1,0

Objectifs à atteindre:

- Capacité portante aux ELS : 250 KPa
- $K_{\phi dyn} \geq 100\,000$ MNm/rad et $E_{oed,dyn} = 164$ MPa
- $E_{oed,stat} \geq 41$ MPa
- tassement : $\Delta s \leq 4$ cm sur 20 ans

Parc Eolien de Brailly-Cornehotte (80)

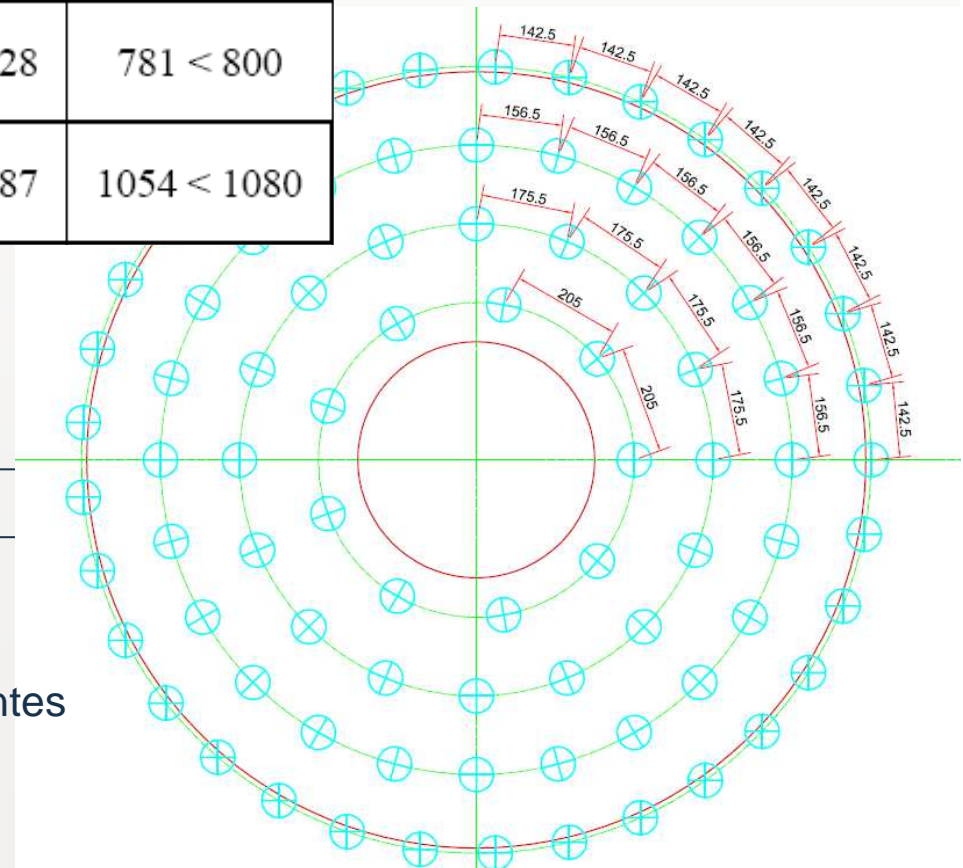
1) Vérification de la capacité portante générale

Ouvrages	Cas de charge	Contrainte sous semelle (kPa)	Contrainte résiduelle sur le sol (kPa)	Contrainte résiduelle dans CB (kPa)
Eolienne 2	ELS	250	195 < 228	781 < 800
	ELU	337,5	264 < 387	1054 < 1080

2) Vérification de la capacité portante locale



Répartition des colonnes avec des mailles différentes sous la charge triangulaire



Parc Eolien de Brailly-Cornehotte (80)

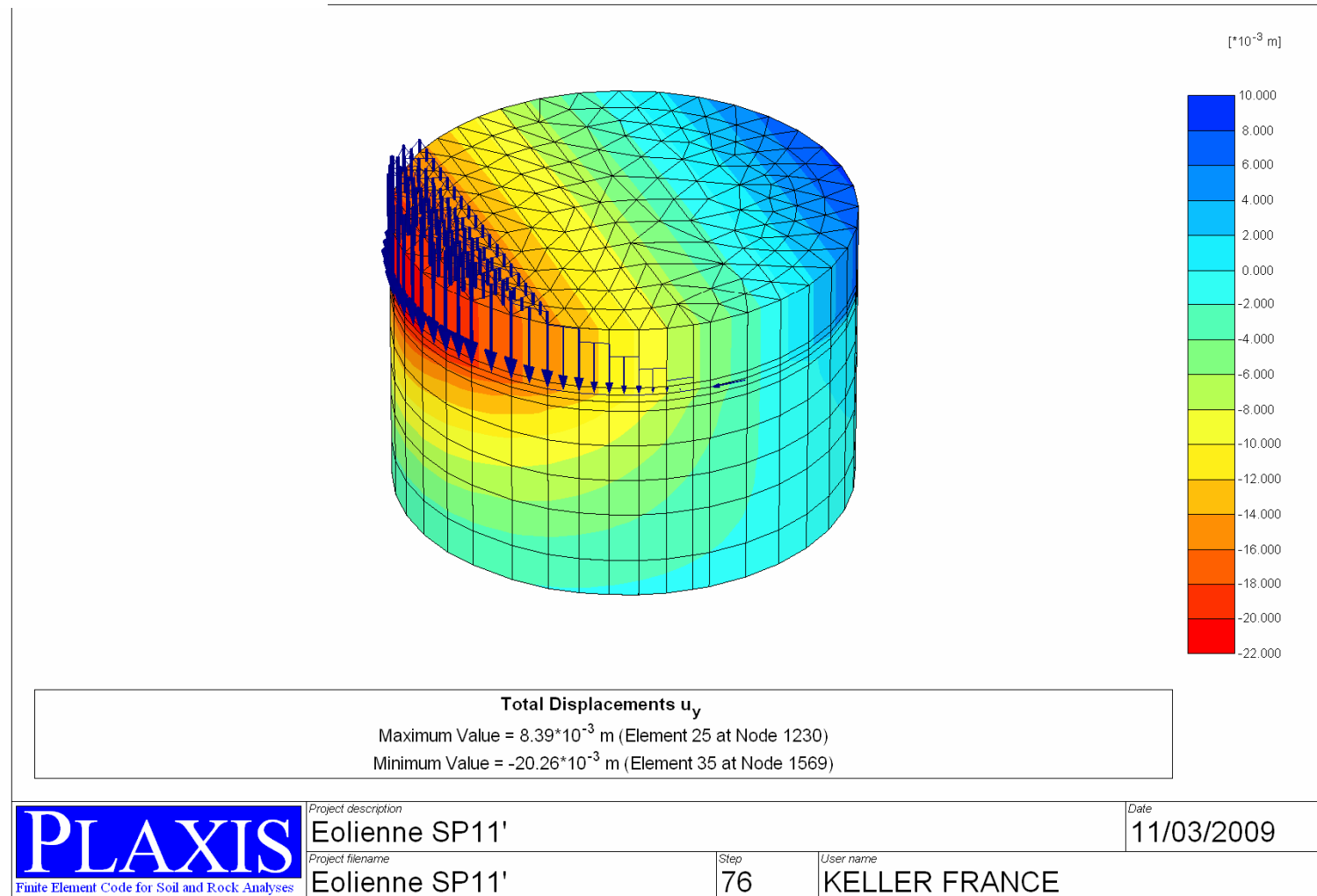
TASSEMENT ABSOLU DU RADIER

Fz (kN)	Mxy (kN.m)	σ_{\max} (kPa)	σ_{\min} (kPa)	σ_{ref} (kPa)	Tassement (mm)	$E_{\text{eq statique}}^*$ (MPa)	$E_{\text{eq dynamique}} =$ $3,3 \times E_{\text{eq statique}}$ (MPa)
21583	40272	166,27	13,18	128	19,4	55,4 $\geq 41 \text{ MPa}$	183 $\geq 164 \text{ MPa}$

$$K_{\varphi \text{ dynamique}} = 133\,354 \text{ MNm/rad} \geq 100\,000 \text{ MNm/rad}$$

Parc Eolien de Brailly-Cornehotte (80)

tassement : $\Delta s \leq 29 \text{ mm}$



Parc Eolien de Brailly-Cornehotte (80)

► Plateforme de travail avant terrassement



Contrôles

- 33 Sondages au pénétromètre statique
- 5 essais de chargement
- 5 dégarnissages de colonnes

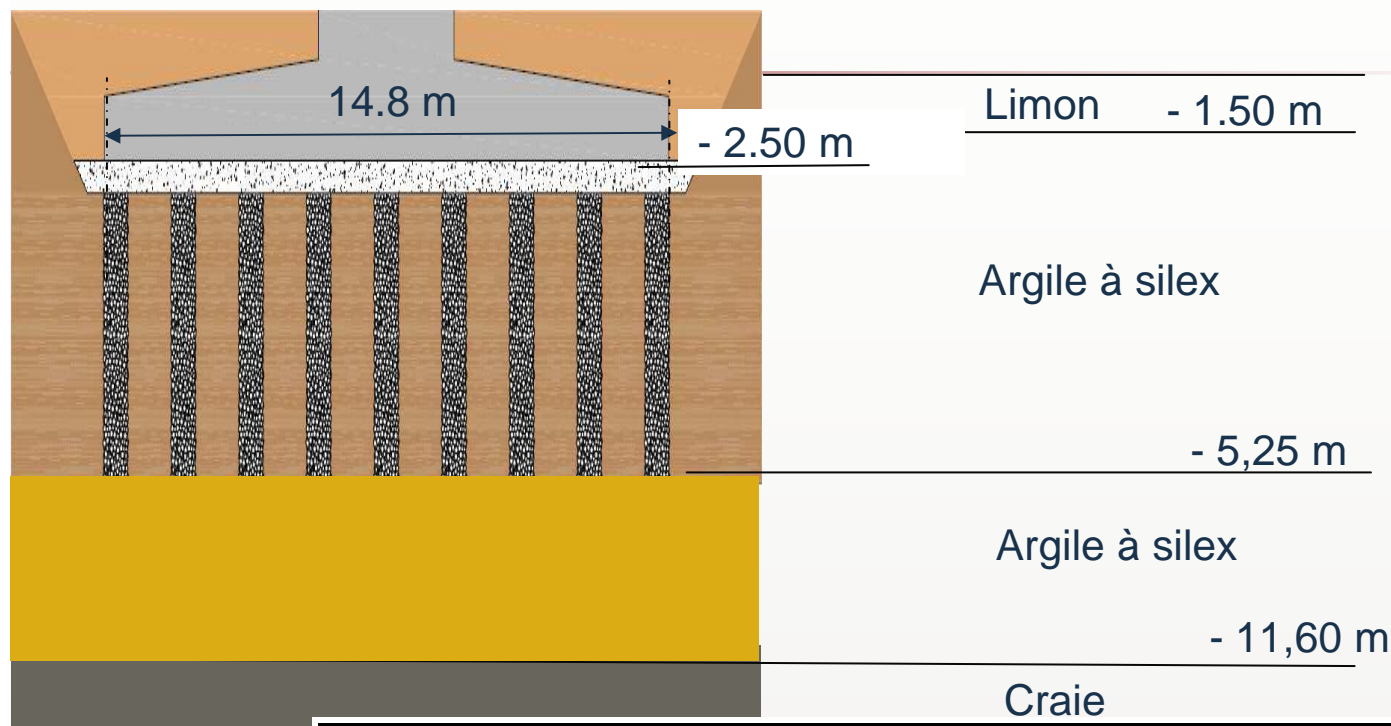
Parc Eolien de Brailly-Cornehotte (80)



Parc Eolien de Brailly-Cornehotte (80)



Parc Eolien de RAMBURES (80)



Nature du SOL	Profondeur de la base de la couche (m)	E_M (MPa)	PI (MPa)	Coefficient réhologique α	E (MPa)
Limon	1,5	1	0,08	2/3	1,5
Argile à silex	3	3,1	0,37	1/2	6,2
	5,25	7,4	0,64	2/3	11,1
	6,5	25,8	1,7	2/3	38,7
Craie	8,25	7	0,67	1/3	21
	9,75	17,4	1,18	1/2	34,8
	11,25	81,3	2,69	2/3	121,9
	12,75	141,1	4,54	2/3	211,6

Parc Eolien de RAMBURES (80)

Lastfall load case	F_{xy} [kN]	F_z [kN]	M_{xy} [kNm]
DLC 1.0 DLC QP	421	-11729	23595
DLC 6.1 DLC rare	558	-11662	33530
DLC 6.2 DLC acc.	691	-11639	41615

Objectifs à atteindre pour le projet :

- Capacité portante supérieure à 270 kPa ;
- K_ϕ dynamique > 40000 MNm/rad ;
- $\Delta s < 3$ mm/m.

Parc Eolien de RAMBURES (80)

Vérification de la capacité portante générale

Pour une colonne ballastée

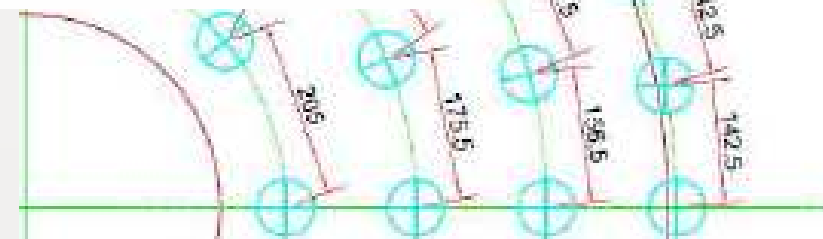
Nature du SOL	Profondeur de la base de la couche (m)	PI (MPa)	q_{adm} (MPa)	Diamètre (m)	Capacité portante (kN)
Argile à silex	3	0,37	0,78	65	257
	5,25	0,64	0,8	60	226

Sondage	S_{maille}	S_{sol}	S_{CB}	q_{sol}	Q_{sol}	Q_{CB}	$n_{CB} \cdot Q_{CB} + (S_{sol} - n_{CB} \cdot S_{CB}) q_{sol}$	$Q_{appliqué}$
	(m²)	(m²)	(m²)	[KPa]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
E2 SP2 A	2,25 m²	1,97 m²	0,28 m²	274,5	540,7	157	697,7	607,5 (contrainte 270 KPa)
E3 SP3 A				322,7	635,7	157	792,7	
E4 SP4 A				224,5	442,26	190	632,2	
E6 SP6 A				198	390	226	616	

Les contraintes sur le sol et la colonne ballastée restent toujours admissibles et par conséquent la capacité portante du sol équivalent de 270 KPa est validée.

Vérification de la capacité portante locale

Répartition des colonnes avec des mailles différentes sous la charge triangulaire



Parc Eolien de RAMBURES (80)

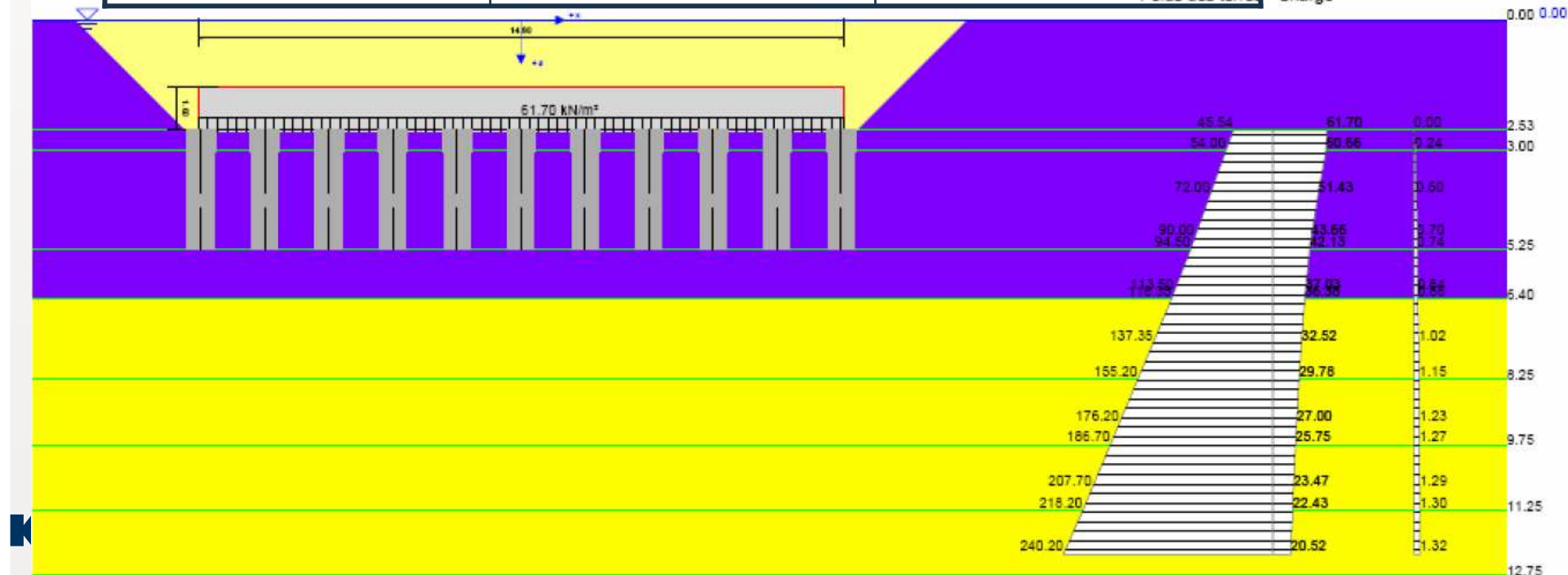
TASSEMENT ABSOLU DU RADIER

Maille	Tassements sur la hauteur des colonnes	Tassements sous les colonnes	Tassements Total (cm)
2,25 m ²	0,74 cm	0,56 cm	1,3 cm

Tassement (cm)	E _{OEDO Statique} (MPa)	E _{OEDO dyn} (MPa)
0,74	39,1	129

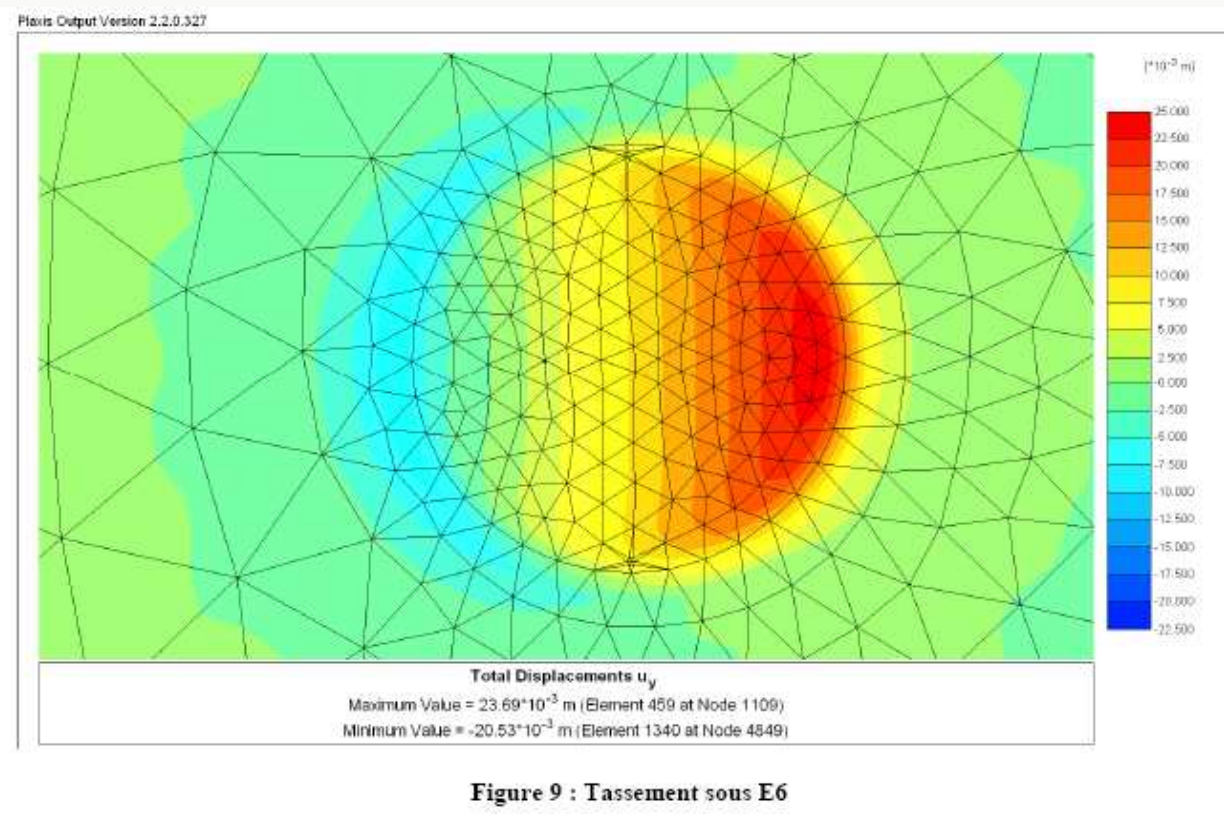
Contraintes [kN/m²]
Poids des terres - Charge

Tassement [cm]



Parc Eolien de RAMBURES (80)

Soulèvement (mm)	Tassement (mm)	Tassement différentiel (mm/m)
24	20	3,0



Parc Eolien de RAMBURES (80)

Intervention en fond de fouille



Rampe d'accès

CONTRÔLES

- 10 sondages au pénétromètre statique
- 2 essais de chargement sur une colonne ballastées à 150 % de la charge de service
- 2 dégarnissages de colonnes

Parc Eolien de RAMBURES (80)



A photograph of a wind farm at sunset. The sky is a mix of orange, yellow, and blue, with the sun low on the horizon. Several wind turbines are visible, their silhouettes reflected in the calm water in the foreground. The water is dark, and the reflection of the sky is clear.

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Wind farm Kittlitz (Vibro Compaction and Vibro Replacement on the territory of a former brown coal open cast mine)

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Journée du 20 octobre 2008