

Groupe de Travail "Fondations d'éoliennes"

APPROCHE POUR LE DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

➤ SOMMAIRE

- PRESENTATION
- ANALYSE DES FICHES ENERCON
- RAPPEL DES CRITERES A RESPECTER
- SONDAGE PRESSIOMETRIQUE
- RAIDEUR DYNAMIQUE
- CONDITION DE NON RENVERSEMENT
- CONDITION DE NON POINÇONNEMENT
- CONDITION DE NON GLISSEMENT
- CRITERE DE DEFORMATION

**FONDATION SUPERFICIELLE D'EOLIENNE
Présentation d'une étude géotechnique de projet (G2)**

1°) – PRESENTATION

Dans le cadre d'une mission de classification G2, notre étude s'effectue à partir des documents suivants :

- Mission G12 d'un géotechnicien (il s'agit d'une étude de faisabilité).
- Notes de calculs d'un BET de structures ou d'un fabricant d'éolienne (par exemple ENERCON).

Dans notre présentation, nous considérerons les feuilles ENERCON dans le cas d'une éolienne de hauteur 82 m reposant sur une fondation circulaire de diamètre 20,40 m dans un sol qui peut être saturé par remontée de la nappe ou effet « piscine » (stagnations d'eau dans les remblais périphériques).

1.1) – Analyse des fiches ENERCON

1.1.1) – Cas de charges

Elles considèrent 3 cas de charges :

1^{er} Cas :

Appelé DLC 1.0. Il s'agit du cas également appelé « lift off » et que l'on assimile à un ELS quasi-permanent. Il s'agit de la sollicitation maximale pendant 99 % du temps de fonctionnement d'une éolienne prise sur une période de référence de 20 ans.

2^{ème} cas :

Appelé DLC 6.1. Il s'agit d'un ELS rare.

3^{ème} cas :

Appelé DLC 6.2. Il s'agit d'un ELU accidentel.

- Lasten an der Fundamentunterkante für geotechnische Nachweise**
 (inkl. Eigengewicht Fundament und Bodenaufflast $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$)
Loads at the bottom of foundation for geotechnical calculations
 (incl. dead weight foundation and soil weight $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$)

Lastfall load case	F_{xy} [kN]	F_z [kN]	M_{xy} [kNm]	M_z [kNm]
DLC 1.0	496	-12421 mit Auftrieb / with buoyancy	32868	-
		-20429 ohne Auftrieb / without buoyancy		
DLC 6.1	627	-12266 mit Auftrieb / with buoyancy	49896	2570
		-20274 ohne Auftrieb / without buoyancy		
DLC 6.2	774	-12396 mit Auftrieb / with buoyancy	61350	3028
		-20404 ohne Auftrieb / without buoyancy		

alle Lasten mit Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_F = 1,0$
 all loads with partial safety factor $\gamma_F = 1,0$

- Aufzunehmende Bodenpressung / minimum required bearing pressure**
 Der anstehende Baugrund muss mindestens eine Bodenpressung von $\sigma = 139 \text{ kN/m}^2$ aufnehmen können.
Minimum required bearing pressure is $\sigma = 139 \text{ kN/m}^2$.
- Drehfedersteifigkeit / rocking spring stiffness**
 Für die elastische Fundamenteinspannung zwischen Fundament und Baugrund ist eine Mindestdrehfedersteifigkeit von $k_\varphi = 40.000 \text{ MNm/rad}$ (dynamische Bodenkennwerte) einzuhalten.
The minimum value of rocking spring stiffness for clamping between foundation and soil must be $k_\varphi = 40.000 \text{ MNm/rad}$ (dynamic soil parameters).

Die erforderlichen dynamischen Steifemodule ($E_{\text{oed,dyn}}$) ergeben sich in Abhängigkeit von Fundamentgeometrie und Querdehnzahl.

The minimum values of dynamic modulus of stiffness ($E_{\text{oed,dyn}}$) are calculated in dependence on foundation geometry and Poisson's ratio.

Für Kreisfundamente gilt:

For circular foundations:

$$k_{\varphi} = \frac{8 \cdot G \cdot r^3}{3 \cdot (1 - \nu)}$$

daraus folgt:

resultant:

$$E_{\text{oed,dyn}} = k_{\varphi} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{r^3} \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - \nu)^2}{1 - \nu - 2 \cdot \nu^2}$$

G = Schubmodul / shear modulus

r = Radius / radius

ν = Querdehnzahl / Poisson's ratio

- **Zulässige Schiefstellung / permissible tilting**

Maximal zulässige Schiefstellung infolge Baugrundsetzung in 20 Jahren.

Maximum allowed tilting due to settlement of the foundation soil in 20 years.

$$\Delta s \leq 3,0 \text{ mm/m}$$

Document information:		
Author / date:	SD / 24.04.2006	
Department:	WRD-K	Translator / date:
Approved / date:	MS / 24.04.2006	Revisor / date:
Revision / date:	1.0 / 24.04.2006	Reference:
		WRD-04-FDB_E-92_S_77_4F_01_FlMA_Rev.1.0-ger.doc

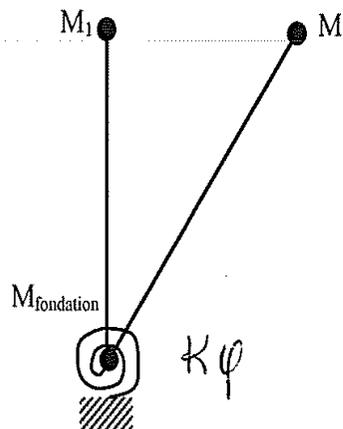
1.1.2) – Raideur dynamique K_ϕ

Dans le cas d'un mât en charpente métallique, cette valeur doit être au moins égale à 40 000 MN.m/rad (100 000 MN.m/rad dans le cas d'un mât en béton).

Après divers entretiens avec les fabricants d'éoliennes, il s'avère que cette raideur dynamique doit être vérifiée dans le cas « lift off » ou DLC 1.0 chez ENERCON.



Le critère de rigidité dynamique permet au fabricant de s'assurer que, en considérant le système suivant, la raideur dynamique suffisamment élevée de la fondation permet de s'assurer que le mode résultant reste toujours éloigné d'au moins 20 % de la fréquence propre du rotor et des pales :



- ▶ Si l'on considère que le critère de raideur dynamique est à associer au cas <<lift off>> ou DLC 1.0 il en découle que le niveau de distorsion associé est en règle générale compris entre 10^{-4} et 10^{-5} . De ce fait les valeurs de G sont comprises entre 0.3 et 0.5 G_{max} (G_{max} est obtenu par des mesures de type Cross-Hole ou M.A.S.W. et correspond à des distorsions inférieures ou égales à 10^{-5}).

- ▶ 1.1.3) non renversement

En retenant la pondération la plus défavorable (c'est-à-dire l'excentricité la plus importante), nous devons vérifier :

- Dans le cas de sols compacts : que la sous-face comprimée est au moins égale à 30 %,
- Dans le cas de sols moyennement compacts : que la sous-face comprimée est au moins égale à 50 %.

Nous rappelons que l'on travaille sur un sol homogène équivalent sur une épaisseur de $1,5B$.

1.1.4) – Non poinçonnement

Les pondérations sont identiques à la vérification précédente.

La vérification s'effectue généralement aux ELU, en considérant :

$$q'_{ELU} = \frac{Kp}{S} \cdot \underbrace{(p_1 - p_0)_e}_{\substack{\text{valeur représentative} \\ \text{sur 1,5B : moyenne géométrique} \\ \text{en limitant les valeurs les plus} \\ \text{élevées à 1,5 fois la valeur} \\ \text{minimale}}} \cdot \underbrace{i\delta\beta}_{\substack{\text{souvent pris} \\ \text{égal à 0,9}}} + \gamma D$$

$$q'_{ELU} > q_{ref} = \frac{3\sigma_{max} + \sigma_{min}}{4}$$

Nota : On s'assure également que la pression maximale n'excède pas p_f lorsque l'on réalise des essais pressiométriques.

1.1.5) – Non glissement

Les pondérations sont identiques à la vérification précédente et l'on vérifie :

$$H_u^* = \frac{N_u \operatorname{tg} \varphi_{uu}}{1,2} + \frac{C_{uu} A_c}{1,5} \leq H_u$$

Nota :

- ✓ Dans le cas de pondération de type ELU, il s'agit d'actions de très courte durée, nous prenons donc en considération les valeurs non consolidées, non drainées.
- ✓ En règle générale, ce critère est rarement prépondérant car la stabilité au non glissement est assurée pour $\varphi_{uu} \geq 10^\circ$ (même si $C_{uu} = 0$).

1.1.6) – Basculement d'ensemble

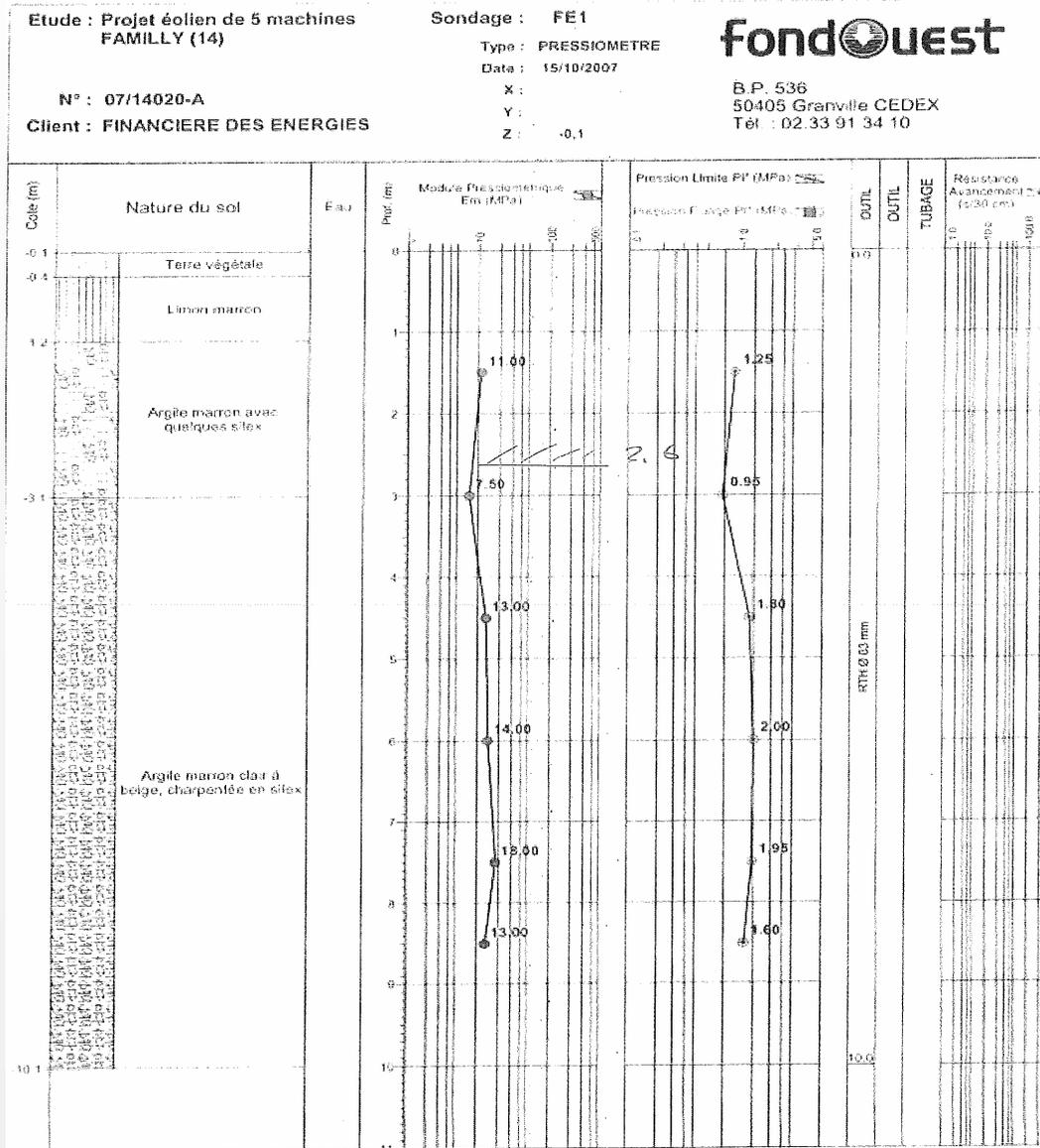
En règle générale, les fabricants d'éoliennes demandent à ce que la rotation du massif n'excède pas 3 mm/m. A cette inclinaison, ils ajoutent la rotation du mât (défaut de verticalité lors de l'installation) qu'ils considèrent inférieur ou égale à 2 mm/m. En conséquence, l'inclinaison maximale admissible pour un fonctionnement « normal » est de 5 mm/m (41 cm de faux-aplomb pour une éolienne de 82 m à l'axe rotor).

La rotation du massif ne doit pas excéder 3 mm/m, même sous les cas accidentels.

De ce fait, le géotechnicien doit considérer :

- La rotation sous le cas « lift off » avec des caractéristiques à long terme (modules de déformation).
- La rotation sous le cas [« effort accidentel » - « lift off »] avec des caractéristiques à court terme.

Sondage pressiométrique



2°) – ÉOLIENNE E1 (FE1 ET SE1)

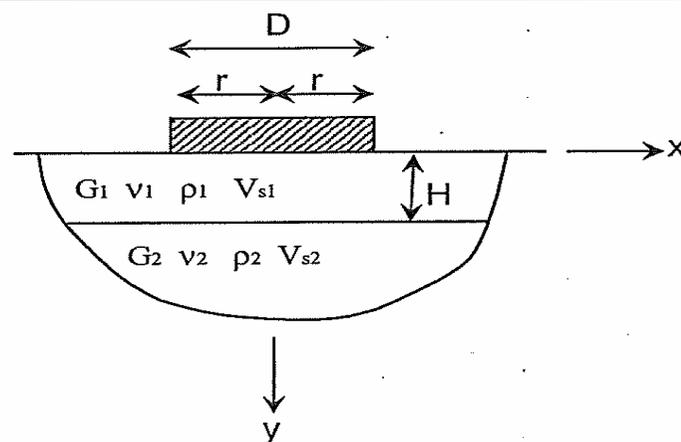
2.1) – Niveau d'assise

On fondera constructivement les éoliennes dans l'argile marron avec quelques silex à partir de 2,60 m sous le TN actuel, au droit des sondages.

2.2) – Détermination de la raideur dynamique en rotation

2.2.1) – Caractéristiques pour une distorsion de $10^{-3}/10^{-4}$

Profondeur	G_{dyn} (en MPa)	N_u
3 à 10 m ($\overline{E_M} = 12$ MPa)	35	0.4



Sol 1 :

$G_1 =$	35 MPa
$\nu_1 =$	0.4
$H =$	7 m

Sol 2 :

$G_2 =$	35 MPa
$\nu_2 =$	0.4

Fondation :

$D =$	20.4 m
$r =$	10.2 m

Raideur en rotation équivalente :

$$K = \frac{8G_1 r^3}{3(1-\nu_1)} \left[\frac{1 + \frac{r}{6H}}{1 + \frac{r}{6H} \frac{G_1}{G_2}} \right] \quad K = 165077 \text{ MNm/rads}$$

2.2.2) – Calcul de la raideur dynamique en rotation dans le cas d'une sous-face de semelle entièrement comprimée

$$K_{\varphi_{EC}} = k_z \times \frac{\pi D^4}{64} = 165\,000 \text{ MN.m/rads}$$

d'où :

$$k_z = \frac{K_{\varphi_{EC}}}{\left(\frac{\pi D^4}{64}\right)} = \frac{165\,000}{\left(\frac{3,14 \times 20,4^4}{64}\right)} = 19 \text{ MPa/m}$$

8497

2.2.3) – Calcul de la raideur dynamique en rotation dans le cas d'une sous-face partiellement comprimée

cas DLC 1.0

Pondération $F_z + M_{xy}$

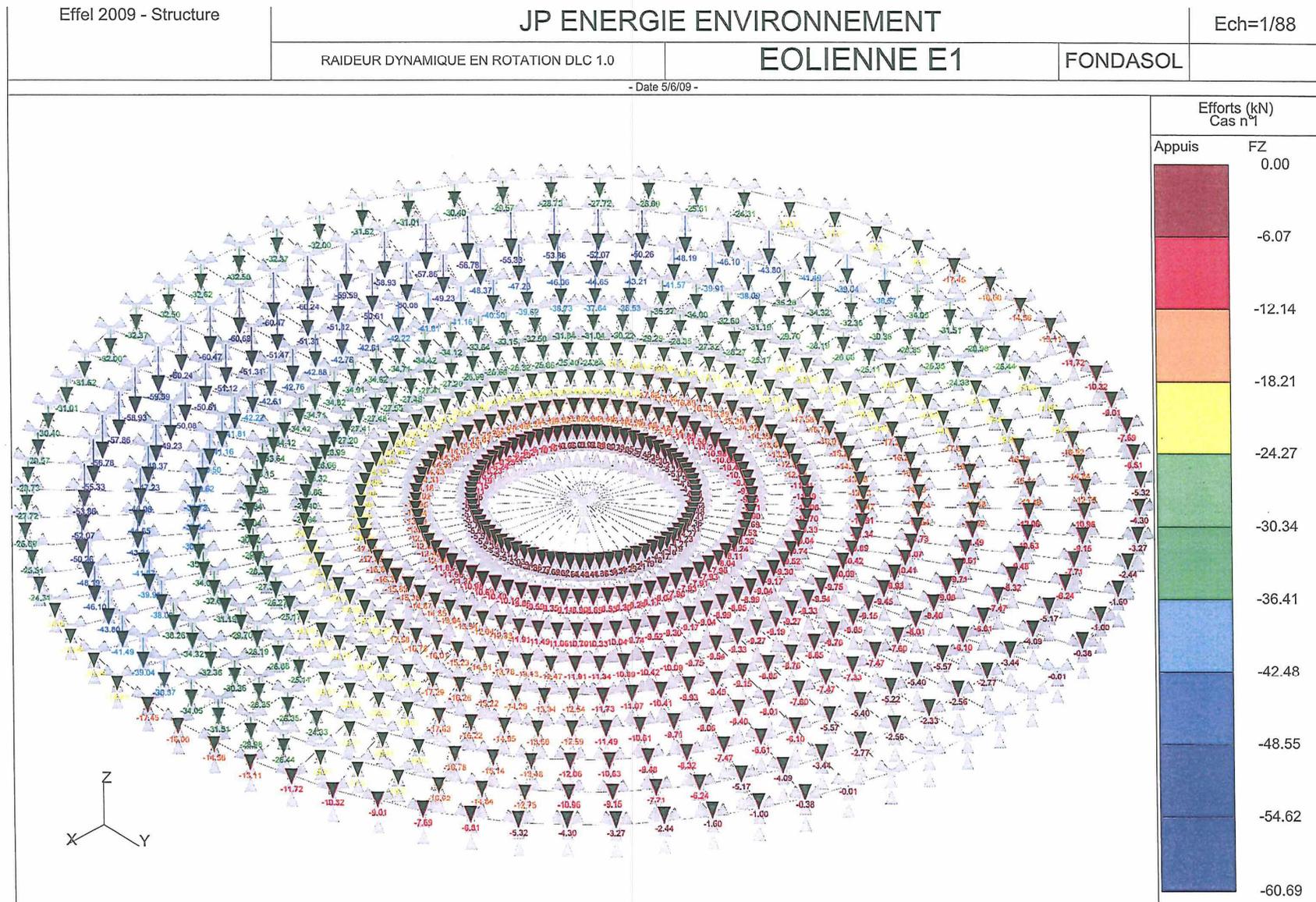
$F_z = - 12\,421 \text{ kN}$

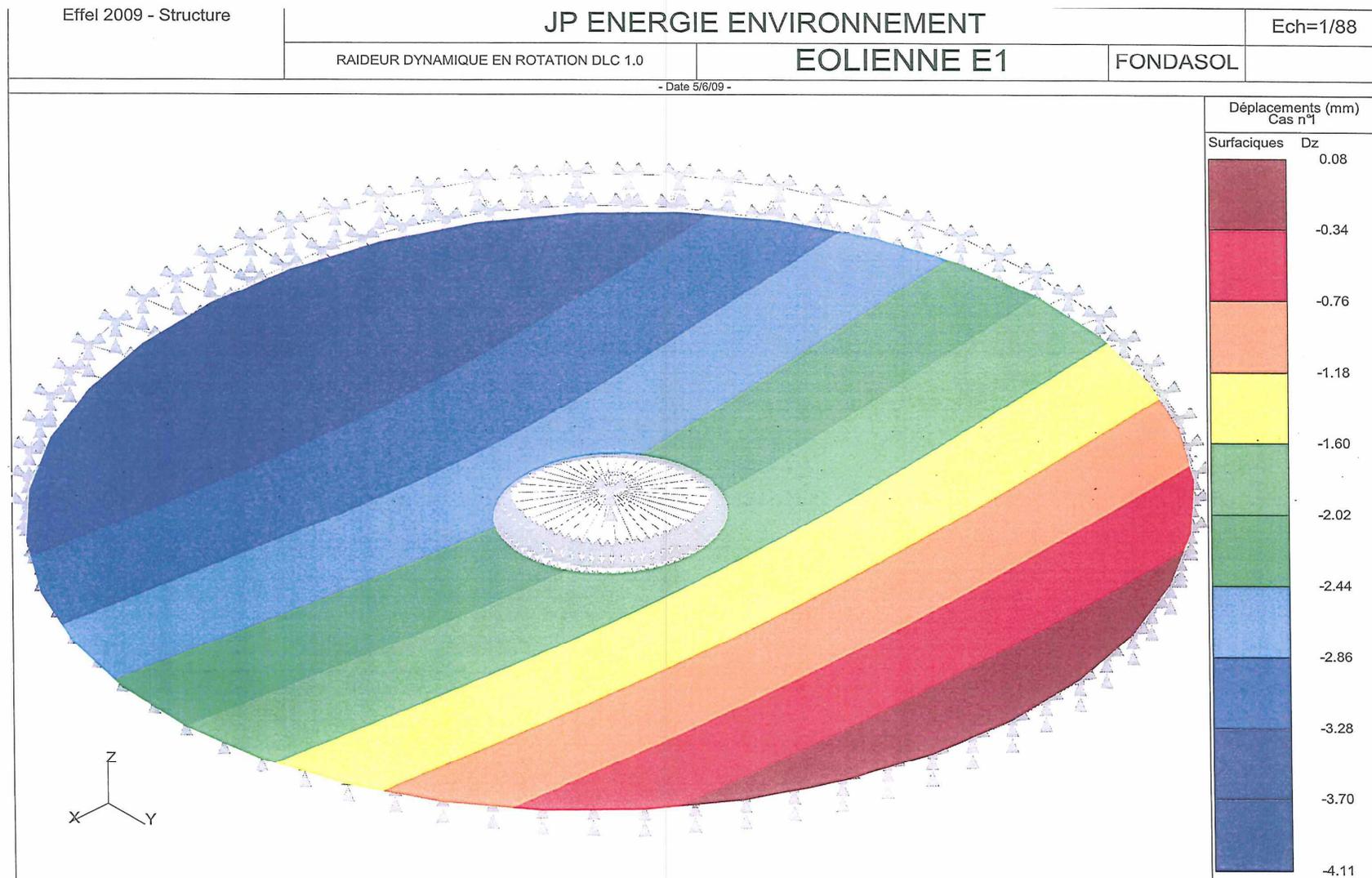
$M_{xy} = 32\,868 \text{ kN}$

$$e = \frac{M_{xy}}{F_z} = 2,64 \text{ m} > \frac{D}{8} = 2,55 \text{ m}$$

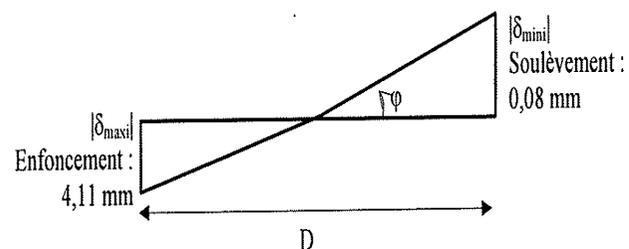
Nous allons effectuer un calcul avec le progiciel EFFEL en 3D. Le sol sera modélisé par des ressorts travaillant uniquement en compression et de raideur $k_z = 19 \text{ MPa/m}$.

FONDATION SUPERFICIELLE D'EOLIENNE - Présentation d'une étude géotechnique de projet (G2)





L'angle de rotation est :



$$\varphi = \frac{|\delta_{\max i}| + |\delta_{\min i}|}{D} = \frac{4,2}{20\,400} = 0,00021$$

$$K_{\varphi_{\text{réduit}}} = \frac{M_{xy}}{\varphi} = \frac{32,87}{0,00021} = 159\,000 \text{ MN.m/rad}$$

$K_{\varphi_{\text{réduit}}} = 159\,000 \text{ MN.m/rad}$

Cette valeur est supérieure à 40 000 MN.m/rad.

La vérification est assurée.

2.3) – Condition de non renversement

Pondération de type DLC 6.1

$0,9 |F_z + 1,5| M_{xy}$

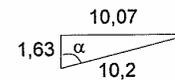
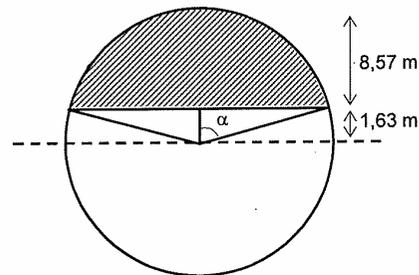
$$\Sigma N_u = -0,9 \times 12\,266 = 11\,039 \text{ kN}$$

$$\Sigma M_u = 1,5 \times 49\,896 = 74\,844 \text{ kN.m}$$

$$y_1 = \frac{\Sigma M_u}{\Sigma N_u} = \frac{74844}{11039} = 6,78 \text{ m}$$

$$\frac{y_1}{h} = \frac{6,78}{20,4} = 0,33 \text{ et } \frac{dk}{da} = \frac{h'/h}{20,4} = \frac{4,1}{20,4} = 0,2$$

soit $Y = 0,42 h = 8,57 \text{ m}$



$$\alpha = 90^\circ - \text{Arc tg} \left(\frac{1,63}{10,07} \right) = 81^\circ$$

$$A_{\text{comprimée}} = \left(\frac{2\alpha}{360} \right) \times \frac{3,14 \times 20,4^2}{4} - (10,07 \times 1,63) = 130 \text{ m}^2$$

$$\text{Soit } \frac{A_{\text{comprimée}}}{A_{\text{total}}} = \frac{130}{327 - \underset{\text{zone centrale}}{13}} = 41\%$$

La vérification est assurée.

2.4) – Condition de non poinçonnement

Pondération $0,9 F_z + 1,5 M_{xy}$

$$\frac{y_1}{h} = 0,33 \text{ et } \frac{h'}{h} = 0,2$$

$$\text{soit } \sigma_{\max} = 6 \times \sigma_{\text{moyen}} = 6 \times \frac{N_u}{A_{\text{total}}} = \frac{6 \times 12266}{(327 - 13)} = 234 \text{ kPa} = 0,23 \text{ MPa}$$

$$q_{\text{ref}} = \frac{3\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{4} = 180 \text{ kPa} = 0,18 \text{ MPa}$$

$$< \frac{Kp}{S} i \delta \beta (p_1 - p_0) + \gamma D = \frac{0,9}{2} \times 0,9 \times \underbrace{\sqrt{0,85 \times (1,5 \times 0,85)}}_{\text{sondage SE1}} + 0,03 = 0,44 \text{ MPa}$$

2.5) – Condition de non glissement

$$c' = 5 \text{ kPa}$$

$$\varphi' = 20^\circ$$

$$\text{cas DLC 6.1} \quad 0,9 F_z + 1,5 F_{xy}$$

$$\Sigma N_u = - 0,9 \times 12\,266 = 11\,039 \text{ kN}$$

$$\Sigma H_u = 1,5 \times 627 = 940 \text{ kN}$$

$$H_u^* = \frac{\Sigma N_u \operatorname{tg} \varphi}{1,2} = \frac{11039 \times 0,36}{1,2} = 3311 \text{ kN} > \Sigma H_u$$

La vérification est assurée.

2.6) – Critère de déformation

Le tassement différentiel maximal doit être inférieur à 60 mm/m.

DLC 1.0

$$F_z = 12\,421 \text{ kN}$$

$$M_{xy} = 32\,868 \text{ kN.m}$$

$$\text{Avec } k_{vLT} = \frac{0,1}{2,3E-2} = 4$$

MPa/m

DLC 6.2

$$F_z = 12\,396 \text{ kN}$$

$$M_{xy} = 61\,350 \text{ kN.m}$$

$$\text{Avec } k_{vCT} = 3 \times k_{vLT} = 12$$

MPa/m

Nous considérerons :

$$1 \times [\text{DLC 1.0 avec } k_{vLT}] - 1 \times [\text{DLC 1.0 avec } k_{vCT}] + 1 \times [\text{DLC 6.2 avec } k_{vCT}]$$

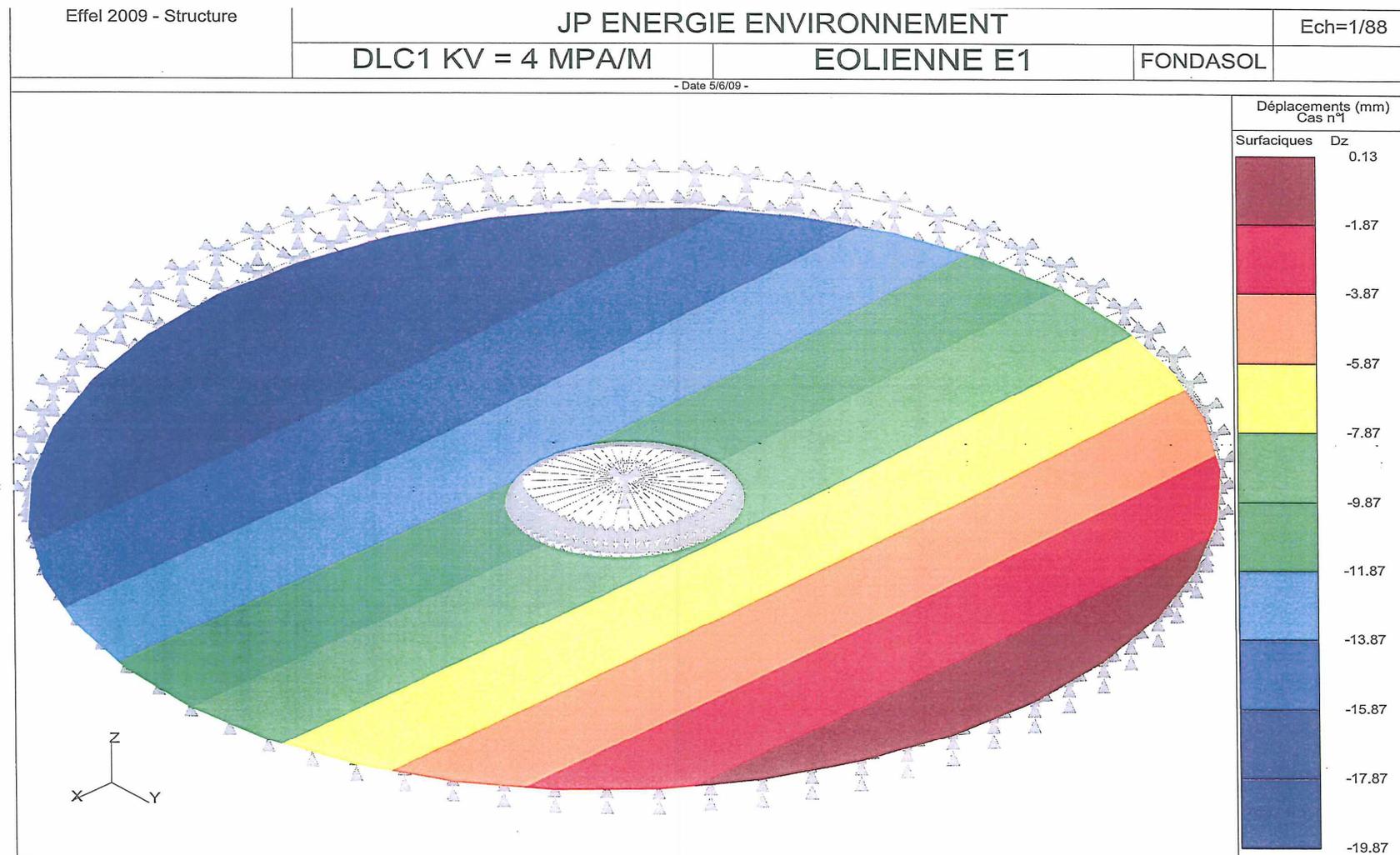
$$\delta_{\text{mini}} = -6 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{maxi}} = 24 \text{ mm}$$

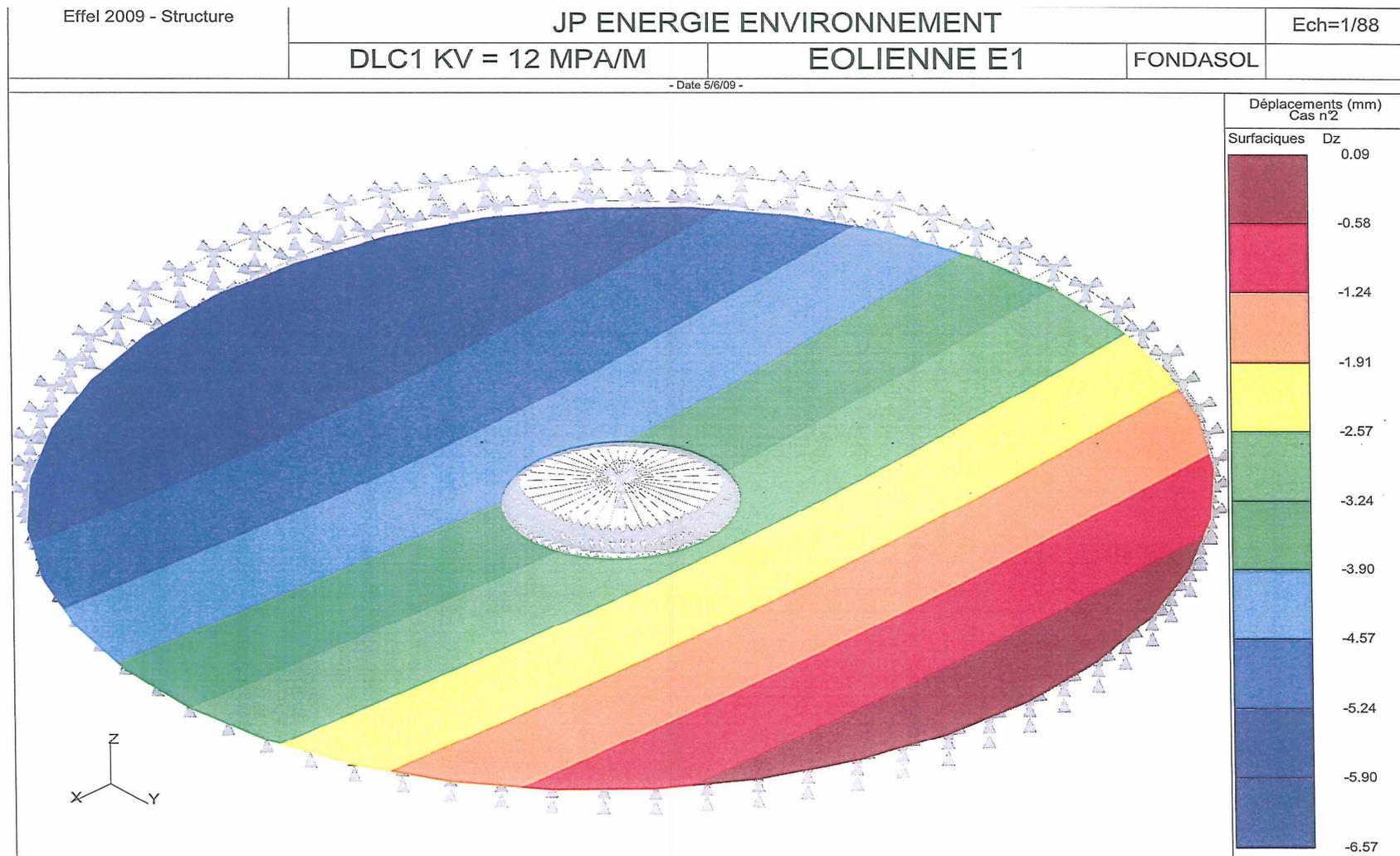
Le tassement maximum entre deux points diagonalement opposés est de 30 mm, c'est-à-dire inférieur à 60 mm.

La vérification est assurée.

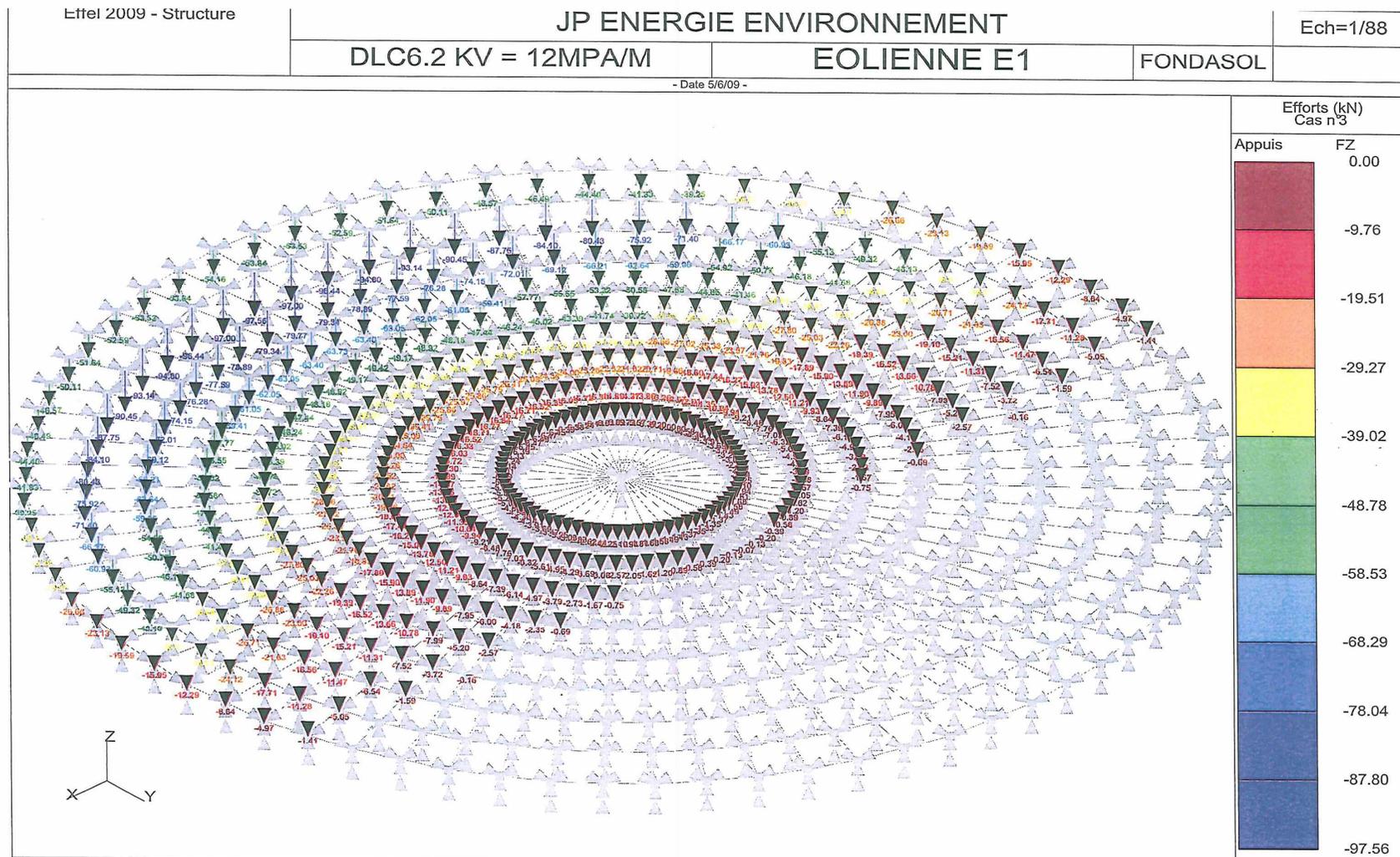
FONDATION SUPERFICIELLE D'EOLIENNE - Présentation d'une étude géotechnique de projet (G2)



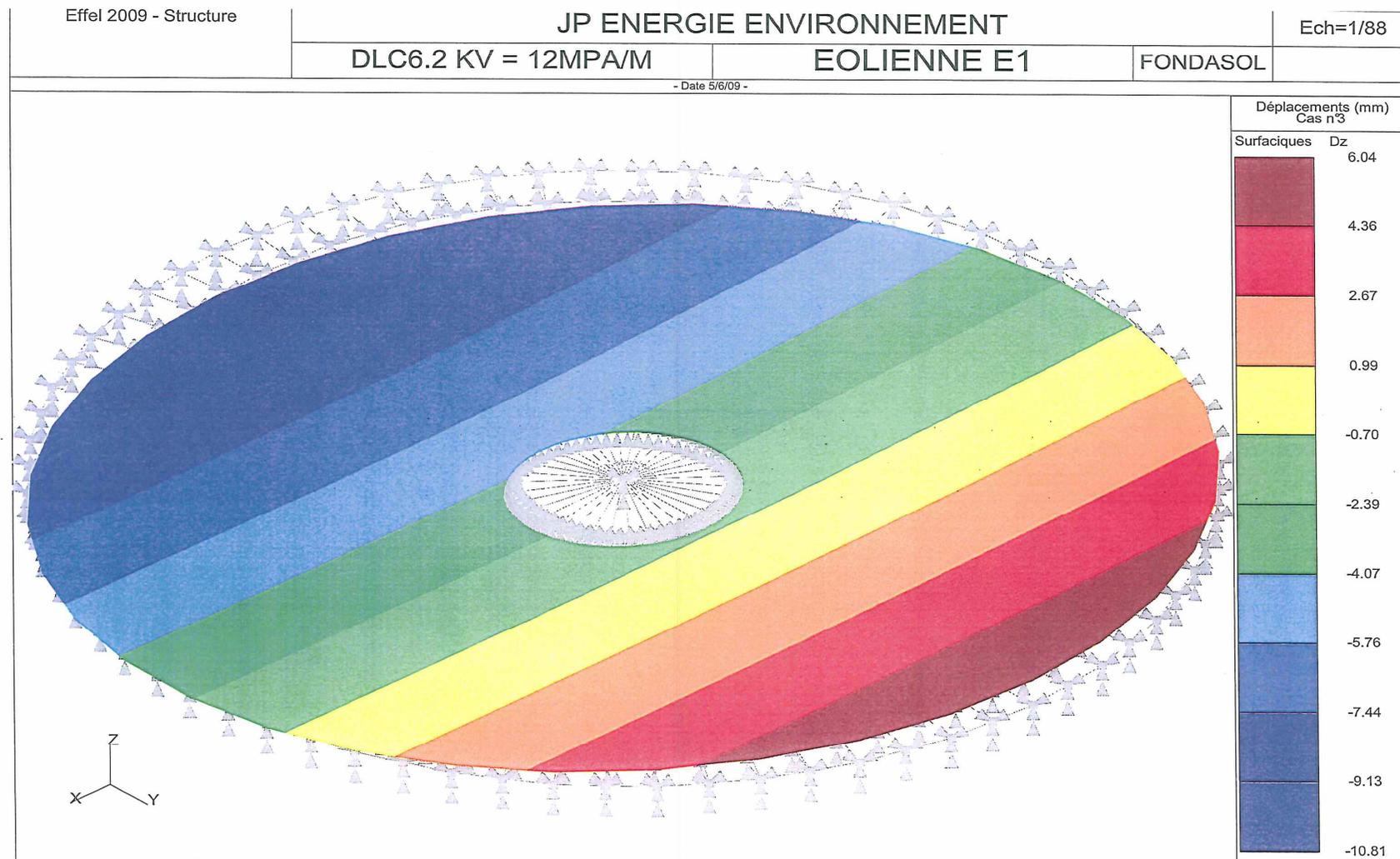
FONDATION SUPERFICIELLE D'EOLIENNE - Présentation d'une étude géotechnique de projet (G2)



FONDATION SUPERFICIELLE D'EOLIENNE - Présentation d'une étude géotechnique de projet (G2)



FONDATION SUPERFICIELLE D'EOLIENNE - Présentation d'une étude géotechnique de projet (G2)



FONDATION SUPERFICIELLE D'EOLIENNE - Présentation d'une étude géotechnique de projet (G2)

