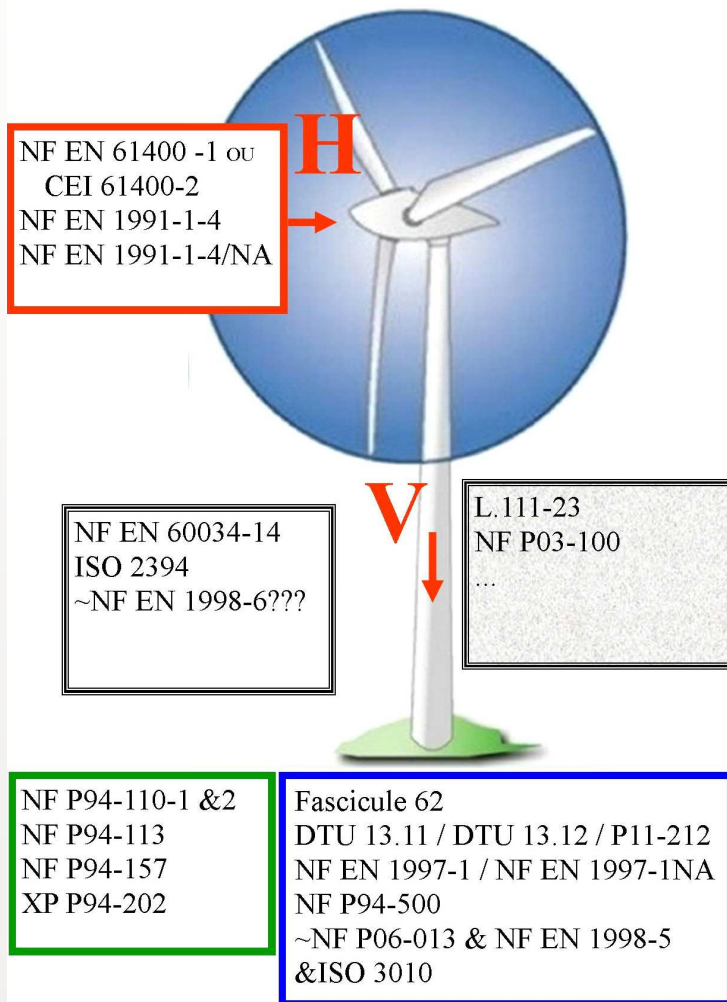


Projet de Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des fondations d'éoliennes



Patrick BERTHELOT

patrick.berthelot@fr.bureauveritas.com

↳ Rencontre avec la Sté ENERCON en 2003


- **Cahier des charges particulier** se référant à des Règles Professionnelles étrangères (Dibt, IEC, Germanisher Llyod WindEnergie...)
 - Les cas de charges élémentaires à considérer – DLC selon l'IEC 61400-
 - Les dimensions des ouvrages de fondations
 - Valeurs minimales imposées

+ pour le sol

- des **spécifications complémentaires** appelées :
"Datasheet for geotechnical advisor"
 - ⇒ Critère de **tassement** (3 mm/m pour une durée de vie de 20 ans)
 - ⇒ **Raideur dynamique en rotation** $k_{\phi, \text{Dyn}}$
 - ⇒ Critère de portance

Premières réflexions de Bureau Veritas



- ↪ Quel référentiel ?
- ↪ Comment raccorder les descentes de charges fournies par le constructeur (Cas de charge DLC) avec les sollicitations habituelles de calcul aux Etats Limites (ELU, ELS) ? 
- ↪ Que représente réellement la valeur de la raideur dynamique en rotation $K_{\phi, \text{Dyn}}$ donnée par les constructeurs ?
- ↪ Portance & Critère de rotation (3 mm/m pendant 20 ans ??)
- ↪ Sollicitations cycliques ??
- ↪ Etude géotechnique
 - traditionnelle et habituelle
 - spécifique et particulière
- ↪ **Dès 2004, Rédaction d'un Guide méthodologique interne à Bureau Veritas pour la vérification et le contrôle des massifs de fondations d'éoliennes**

Premières réflexions de Bureau Veritas



Cas de charges DLC & sollicitations ELS / ELU ?

2. EXTREME LOADS

The loads are presented without including safety factors. The supplier must apply security factors according to the rules used for the design of the foundation.

2.1. Extreme Loads Class IEC_III.A. 78 m tower

Tower bottom loads. Load factors not included.

Load Case	Load Factor	Fx (kN)	Fy (kN)	Fxy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)	Mxy (kNm)
dlc15cp_60	1	-714.8	29.19	715.39	-2879.22	-1946.5	-53169.55	-754.12	5320.8
dlc62k1	1	141.07	-531.15	549.56	-2883.94	36423.28	7117.42	1100.2	3711.2
dlc15cp_90	1	-713.91	71.53	717.48	-2879.05	-3089.07	-53319.34	-1013.74	5340.8

2.3 Extreme loads

The given loads are the extreme loads which may appear during the design lifetime of the tower according to the used standard. According to IEC-regulations the given loads have to be considered for serviceability limit state (SLS) with a safety factor $\gamma_F = 1.0$. For verifying the ultimate limit state (ULS) partial safety factors have to be applied to these loads.

Description	Load case	safety factor γ_F	Horizontal force H [kN]	Vertical force V [kN]
Maximum M (ULS)	1.5k (LM)	1.35	1068	4003
Maximum M (SLS)	2.2-2.3b	1.0	820	2946
Operation Maximum M (klaffende Fuge)		1.0	549	3072

1.1 Extremelasten

Die Extremelasten für die Fundamentbemessung sind in folgender Tabelle angegeben. Es wurde eine außerplanmäßige Schiefstellung von 8 mm/m entlang der Turmachse angenommen. Das Turmfußmoment erhöht sich so ungünstig wie folgt:

$\Delta M_1 = 1\,309\text{ KNm}$:

1.1 Ultimate Loads

Ultimate Foundation Design Loads are shown in the table below. A misalignment of 8 mm/m along the tower axis has been assumed. The moment at tower bottom has been increased as follows:

$\Delta M_1 = 1\,309\text{ KNm}$:

Rotorblatt: LM45.3p or RE45.2		rotor blade: LM45.3p or RE45.2						
Lastfall / Load case	F _x [kN]	F _{xy} [kN]	M _x [kNm]	M _{xy} [kNm]	γ_F	Bemerkung / Comment		
dlc1511_0_g12	3 175	874	1 363	69 107	incl.	Rotor Blade: LM45.3p		
dlc1511_0_g12	2 352	647	1 010	51 530	excl.	Rotor Blade: LM45.3p		
dlc6145120E	2 366	871	1 217	61 458	excl.	Rotor Blade: LM45.3p		
dlc6145120E	2 603	958	1 339	67 473	incl.	Rotor Blade: LM45.3p		
dlc6145300E	2 495	1 030	1 043	66 970	incl.	Rotor Blade: LM45.3p		
dlc6145300E	2 268	886	948	61 001	excl.	Rotor Blade: LM45.3p		
dlc6145300E	2 268	886	948	61 001	excl.	Rotor Blade: LM45.3p		
dlc6145300E	2 495	975	1043	66 970	incl.	Rotor Blade: LM45.3p		

Loads at the bottom of foundation for geotechnical calculations (incl. foundation dead weight $\gamma = 25\text{ kN/m}^3$ and soil weight $\gamma = 18\text{ kN/m}^3$)

Lastfall Load case	F _{xy} [kN]	F _z [kN]	M _{xy} [kNm]
DLC 1.0	420	-10025	23592
		mit Auftrieb	
DLC 6.1	650	-16398	41690
		ohne Auftrieb	
DLC 6.2	650	-9730	46690
		mit Auftrieb	
		-16104	
		ohne Auftrieb	
		-9830	
		mit Auftrieb	
		-16204	
		ohne Auftrieb	

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

Pourquoi des Recommandations ?

- ↪ Suite aux questions et aux réflexions précédentes
- ↪ Tenant compte du contexte normatif en relation avec l'IEC 61 400 (= NF EN 61 400)

11.8 Evaluation des conditions du sol

Les propriétés du sol sur un site proposé doivent être évaluées par un ingénieur géotechnique qualifié sur le plan professionnel, en se référant aux normes et règlements de construction locaux disponibles.

- ↪ Les éoliennes sont des ouvrages "très grands ou inhabituels ...qui doivent faire appel à des règles alternatives".

 **Recommandations Professionnelles**

Projet de Recommandations



↳ **Décision du CFMS** (automne 2007)

- Constitution d'un **groupe de travail** spécifiquement dédié aux éoliennes
 - ⇒ **Double objectif**
 1. État des **connaissances** & compréhension de **certains phénomènes**
 2. Rédaction d'un projet de **Recommandations Professionnelles**

"Projet de Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des fondations d'éoliennes"

↳ **Quelques chiffres**

- Première réunion du Groupe le **11 décembre 2007** (présentation du Guide méthodologique de Bureau Veritas)
- Au total **15 réunions plénières** (6 en 2008 / 9 en 2009)
- Intervention de 3 constructeurs : **NORDEX / ENERCON/ REPOWER**
- **Version V0** du projet de Recommandations datée du 02 octobre (6 chapitres pour 169 pages)
- ***Pour une publication début 2010***

Projet de Recommandations



↪ Les membres du Groupe de travail : 26 personnes

Maitre d'Ouvrage

DE MUYNCK Pascale	EDF EN
DENOIS Thierry	EDF EN

Experts universitaires

DANO Christophe	EC Nantes
Le KOUBY Alain	LCPC
THOREL Luc	LCPC

Bureaux d'études

ANTOINET Eric	ANTEA
BERSCH Matias	CTE
BOURNE Gilles	ALLIOS
BRETELLE Sylvie	CATHIE ASSOCIATES
DURAND Frédéric	FUGRO
JANDEL Eric	FONDASOL
MARTIN Alexander	CTE
MAZARE Bruno	EGIS
REBOUL Michaël	TERRASOL

Consultant

BUSTAMANTE Michel	MB Fondations
-------------------	---------------

Projet de Recommandations



↪ Les membres du Groupe de travail : 26 personnes

Entreprises

GAUTHEY Jean Robert	SPIE FONDATIONS
GLANDY Michel	SOLETANCHE BACHY PIEUX
LAMBERT Serge	KELLER Fondations Spéciales
LIAUSU Philippe	MENARD
PAL Olivier	EIFFAGE
PLOMTEUX Cyril	MENARD

Bureaux de Contrôle

AGUADO Pascal	CETEN APAVE
BERTHELOT Patrick	Bureau Veritas (Président)
CARPINTEIRO Luis	SOCOTEC
DURAND Daniel	Bureau Veritas
LAMADON Thierry	Bureau Veritas (Secrétaire)

Sommaire

1. Introduction	60 %
2. Référentiel	100 %
3. Cas de charge et sollicitations de calcul	100 %
4. Géotechnique et paramètres de dimensionnement	100 %
5. Les différents types de fondations	80 %
6. Références (Annexes informatives)	

Projet de Recommandations

↪ § 1 Introduction

§ 1.1 Domaine d'application

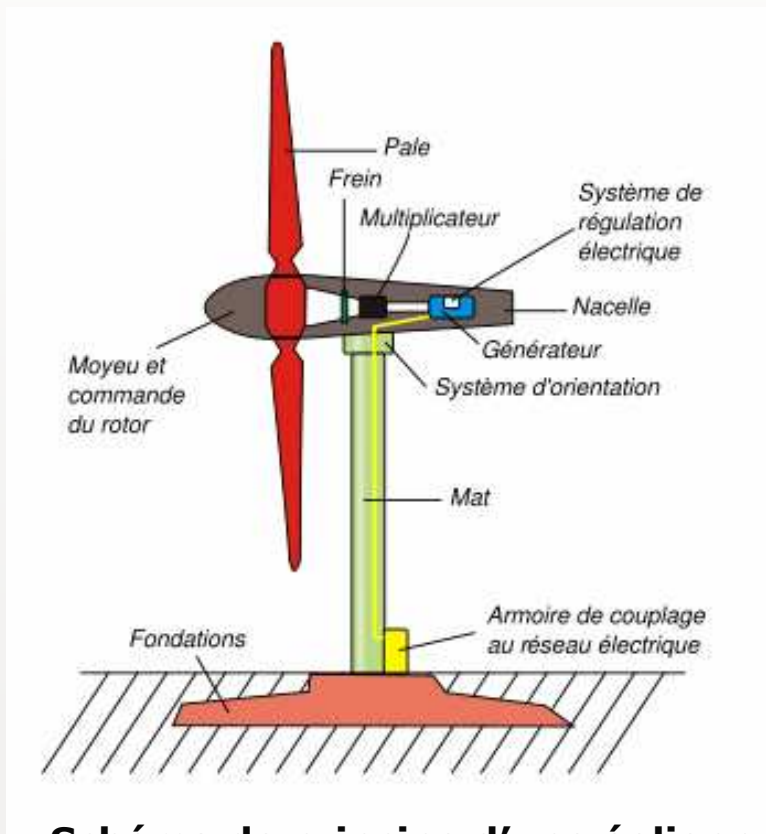


Schéma de principe d'une éolienne

Ces **Recommandations** concernent les éoliennes :

- de plus de 12 m
- hors offshore
- non repliables

Le terme **éolienne** désigne une machine constituée :

- d'un rotor
- d'une nacelle
- d'un mât
- d'un **système de fondation**

Projet de Recommandations

↪ § 3.4 Sollicitations de calcul aux **ELU / ELS**

⇒ **Cas de charge déterminant** : 22 cas de charges selon la NF EN 61 400

Pour le dimensionnement des fondations, les cas de charge élémentaires (DLC) pris en considération sont les suivants :

- **situation conceptuelle n°1** (*production électrique*)
 - cas de charge 1.1, 1.3, 1.4 et 1.5 **DLCRare**
 - cas de charge 1.2 **Fatigue**
- **situation conceptuelle n°2** (*production d'électricité + survenance de la panne*)
 - cas de charge 2.1, 2.2 et 2.3 **DLCRare**
 - cas de charge 2.4 **Fatigue**
- **situation conceptuelle n°5** (*arrêt d'urgence*)
 - cas de charge 5.1 **DLCRare**
- **situation conceptuelle n°6** (*immobilisation [arrêt ou ralenti]*)
 - cas de charge 6.1 et 6.3 **DLCRare**
 - cas de charge 6.2 **DLCAcc**
 - cas de charge 7.1 **DLCAcc**

Commentaire : Les constructeurs rajoutent parfois un cas « DLC 1.0 » considéré comme un DLCQP.

Les constructeurs doivent donner les cas de charges les plus défavorables, en fonctionnement normal ; en conditions extrêmes ; et en conditions accidentelles.

Projet de Recommandations

↪ § 3.4 Sollicitations de calcul aux **ELU / ELS**

§ 3.4.2 Coefficients de pondération

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

Par référence au Fascicule 62 Titre V

Projet de Recommandations

§ 3.5 Vérification des critères de dimensionnement % de surface comprimée en cas de fondations superficielles

Cas de charge	Facteurs partiels de pondération sur sollicitations*				% de surface comprimée après pondération
	Etats Limites	F_Z	F_{Eau}	M_{XY}	%
DLC _{QP}	ELU _{Fond}	1,0 ou 1,35	1,125 x 1,05	1,8	50(**)
	ELS _{perm}	1,0	1,0	1,0	100
DLC _{Rare}	ELU _{Fond}	1,0 ou 1,35	1,125 x 1,05	1,5	50(**)
	ELS _{Rare}	1,0	1,0	1,0	75
DLC _{Acc}	ELU _{Acc}	0,9 ou 1,10	1,0	1,1	50(**)

** Cette valeur est ramenée à 30% dans les types de sols suivants :

Types de sols selon Fascicule 62 Titre V		%
Craies	B ⁺⁺ C	30
Marno, Marno calcaires	A ⁺⁺ B	30
Roches	A ⁺⁺ B	30

Commentaire : On pourra étendre la liste du tableau n° 4 aux sols de type « argile et limon C+, sables et graves C » du tableau n° 10 sous réserve de justifications particulières par le géotechnicien de la non altération significative du sol dans le temps et/ou sous efforts cycliques (affaissabilité, fatigue, liquéfaction, modifications des caractéristiques de sols, perte de capacité portante, ...).

Projet de Recommandations

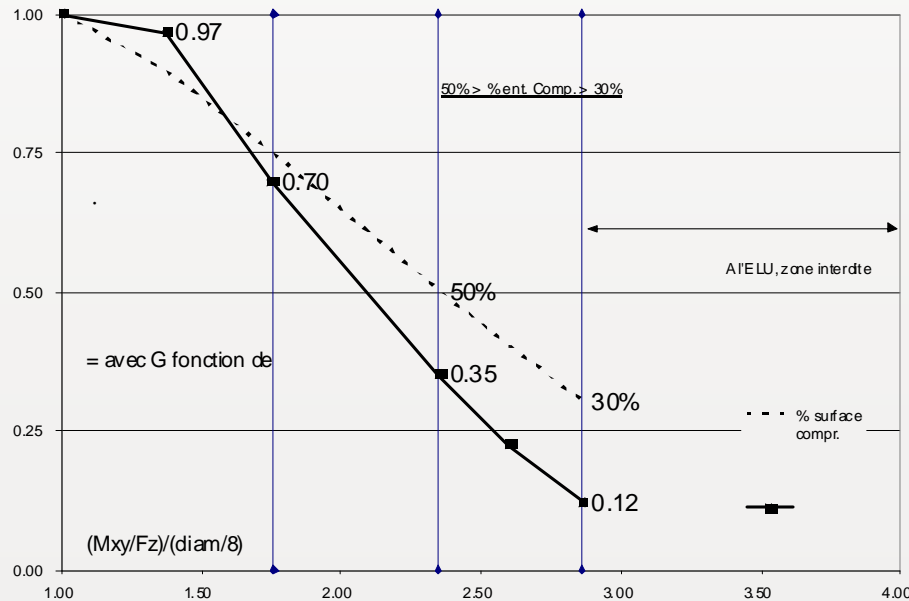
↪ § 3.5.5.1 Raideur en rotation

Les constructeurs imposent une valeur minimale de la raideur en rotation à petite déformation (10^{-5} à 10^{-3}) " $K_{\phi, Dyn}$ " pour éviter les phénomènes de couplage entre le sol, la fondation et la machine.

⇒ le sol reste **entièrement comprimé**

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

⇒ le sol **ne reste pas entièrement comprimé**



$$\beta_1 = \frac{K_{\phi}}{K_{\phi, NS}}$$

β_1 : coefficient réducteur en fonction du % de surface comprimée.

G : module de cisaillement pris dans la plage de déformation adéquate

Projet de Recommandations

↪ § 4.6.5 Les domaines de classement de sol

Types de sols déduits selon le fascicule 62 Titre V		E_{mEq}	q_{csq}	E_{vst} à 10^{-2}	E_v à 10^{-4} (Valeur min de calcul à retenir)	Domaines
Argiles Limon	A	< 10	< 3	< 15	—	1
	B et C	≥ 10 et ≤ 30	≥ 3 et ≤ 10	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2
	C+	> 30	> 10	> 50	250 (***)	3
Sables Graves	A	< 10	< 10	< 15	—	1
	B	≥ 10 et ≤ 25	≥ 10 et ≤ 20	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2 (**)
	C	> 25	> 20	> 50	300 (***)	3 (**)
Craies	A et B	< 8	< 5	< 15	—	1
	B	≥ 8 et ≤ 30	≥ 5 et ≤ 20	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2
	B+et C	> 30	> 20	> 50	300 (***)	3
Marnes Marno- calcaires	A	< 8	< 5	< 15	—	1
	A+et A	≥ 8 et ≤ 25	≥ 5 et ≤ 15	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2
	A+et B	> 25	> 15(*)	> 50	400 (***)	3
Roches	A	≤ 25	-	≤ 50	(****)	2
	A+et B	> 25	-	> 50	600	3

➤ **Domaine n° 3 : $E_{ySt} > 50$ MPa**

La reconnaissance de sol fournissant des modules de déformation "statiques habituels" E_{ySt} est suffisante

⇒ **Fondation superficielle**

➤ **Domaine n°1 : $E_{ySt} < 15$ MPa**

A priori, il n'est pas possible d'envisager des fondations superficielles sans aménagements particuliers.

⇒ **Fondations profondes /
Renforcement de sol**

➤ **Domaine n°2 : 15 MPa < $E_{ySt} < 50$ MPa**

La seule définition du module statique habituel E_{ySt} ne permet pas de retenir en l'état un système de fondation superficielle.

⇒ **Campagne de sol plus détaillée**

↪ § 5 Les différents types de fondations

§ 5.1 **Généralités**

§ 5.2 **Embase poids**

§ 5.3 Embase poids sur sol renforcé par colonnes ballastées

§ 5.4 Embase poids sur sol renforcé par inclusions rigides

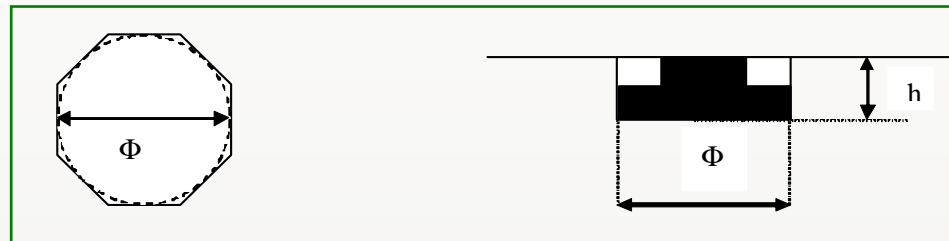
§ 5.5 **Fondations sur pieux**

§ 5.6 Fondations mixtes

↪ § 5 Les différents types de fondations

§ 5.1 Généralités

Un massif de fondation d'éolienne a généralement une forme polygonale assimilable à un massif circulaire de même surface et de diamètre Φ .



§ 5.1.1 Dispositions constructives communes

- ✓ *Vis-vis de l'eau de surface ou de nappe*
- ✓ *Vis-à-vis de l'altération du fond de fouille*
- ✓ *Vis-à-vis de la mise en butée des sols*

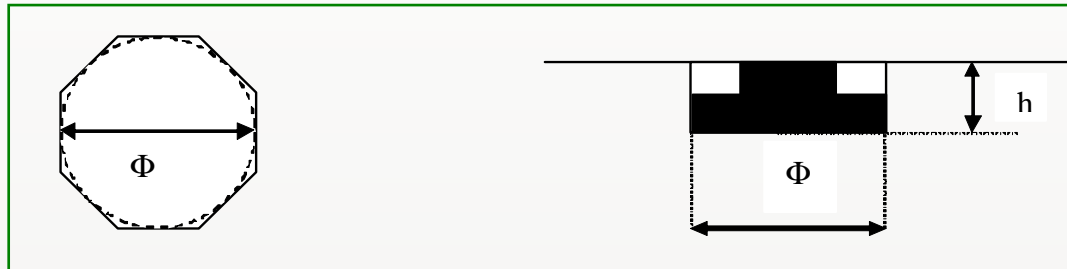
§ 5.1.2 Vérification et contrôle commun

- ✓ *Béton de massif*
- ✓ *Vis-à-vis de la portance et de l'altération du fond de fouille*
- ✓ *Vis-à-vis des hypothèses hydrauliques*

↳ § 5 Les différents types de fondations

§ 5.2 Embase poids

§ 5.2.1 Description



§ 5.2.2 Données géotechniques

§ 5.2.3 Justifications

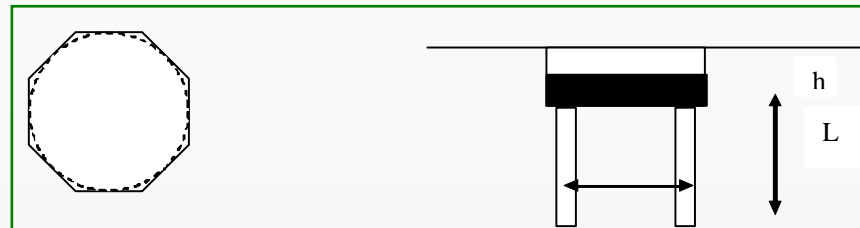
- ✓ Portance
- ✓ Rotation [surface comprimée / coefficient β_1]
- ✓ Glissement



↪ § 5 Les différents types de fondations

§ 5.5 Fondations sur pieux

§ 5.5.1 Description



§ 5.5.2 Données géotechniques

§ 5.5.3 **Justifications**

- ✓ Portance [Pas de traction sous ELS_{QP} (cas de charge DLC_{QP})]
- ✓ Tassement et allongement
- ✓ Efforts horizontaux
- ✓ Rotation de l'ensemble

§ 5.5.4 Dispositions constructives

§ 5.5.5 Vérification et contrôle

Recommandations



Le but des *Recommandations* est d'éviter ces accidents

Groupe de travail CFMS "Fondations d'éoliennes"

**Recommandations sur la conception, le calcul,
l'exécution et le contrôle des fondations
d'éoliennes**

Rendez-vous en 2010 !!