

... Journée CFMS – Sollicitations cycliques et fatigue des matériaux ...

CAS DES EOLIENNES

Michel BUSTAMANTE
LCPC Paris

Philippe GRAU
SPIE FONDATIONS

Alain LE KOUBY
LCPC Paris

Sommaire

- **Généralités**
- **Types de fondations**
- **Cas des embases poids**
- **Cas des pieux-micropieux**
- **Réglementation**
- **Étude de cas**
- **Solution de fondation de type Tripod**

Production par mois et par année

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Total de la production, par année	9 400 282	38 798 166	120 001 219	184 749 368	357 704 826	596 457 428	830 560 741

Tableau de production France entière par année, avec valeurs en kWh
Éolienne de 1 MW produit en moyenne 2,5 millions de kWh/an en Bretagne

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

SUIVI EOLIEN : France entière et Dom Tom

Énergie nucléaire en France : 58 réacteurs nucléaires d'une puissance de 900-1450 MW chacun, sans intermittence

✓ Éolienne de 1 MW produit en moyenne 2,5 millions de kWh/an en Bretagne

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Principe de fonctionnement d'une éolienne

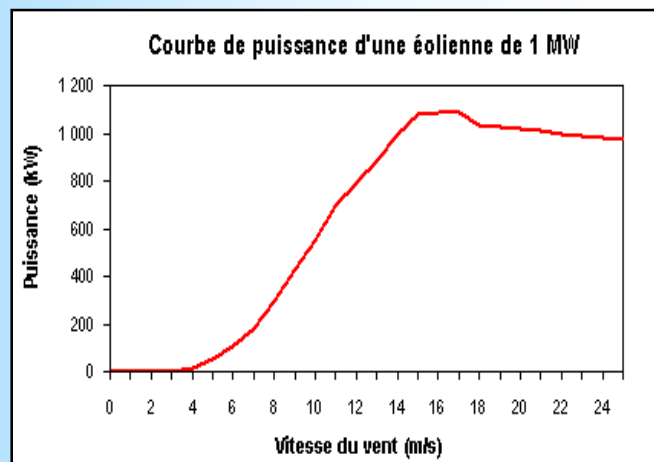
- Énergie mécanique transformée en énergie électrique
- ✓ Mât de 10 à 100 m de haut
- ✓ 3 pâles entre 5 et 90 m de diamètre
- ✓ Fréquence des rotors (0,12 – 0,37 Hz) à comparer avec la période propre de l'éolienne
- ✓ Puissance jusqu'à 4-5 MW
- ✓ Vitesse du vent comprise entre 15 et 90 km/h
- ✓ Ferme éolienne (parc) : plusieurs MW
- ✓ Ferme éolienne off-shore (à 10 km des côtes)
- ✓ Objectif fixé pour la construction d'éoliennes en France d'ici 2007 : 2000 à 6000 MW

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Étapes d'un projet éolien

- Évaluation du potentiel éolien
- Évaluation environnementale
- Approbation réglementaire
- Conception
- Construction
 - Chemin d'accès
 - Ligne électrique
 - Postes de raccordement
 - Durée de vie : 20 ans



7 avril 2006

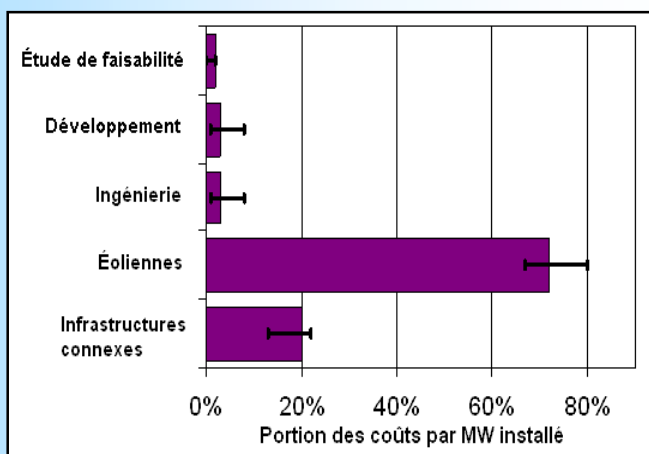
CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

- **Évaluation du potentiel (pendant la phase de « siting »)**
 - Carte régionale de potentiel éolien à petite échelle spatiale (sur 10 ans)
 - Installation d'un mât de mesure sur le site et enregistrement pendant un an
 - Détermination des profils de vent de la zone
- **Des moyennes élevées de vitesses du vent sont essentielles**
 - Une moyenne annuelle minimum de 4 m/s est nécessaire
 - Les gens ont tendance à surestimer les vitesses du vent
 - La vitesse du vent a tendance à augmenter avec l'altitude
- **Exemples de bons potentiels**
 - Régions côtières, Cols
 - Crêtes de longues pentes
 - Terrains découverts
 - Vallées où le vent s'engouffre
- **Typiquement plus venteux...**
 - En hiver qu'en été
 - Le jour que la nuit

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

- **Parcs éoliens**
 - 760 000 €/MW installé
 - Exploitation et entretien :
43,6 – 63,4 €/MWh (autres 28,4–36,5€/MWh)
 - Prix de vente (EDF):31–84 €/MWh
- **Éolienne unique et réseau isolé**
 - Coûts plus élevés (projets plus particuliers)
 - L'étude de faisabilité, le développement et l'ingénierie représentent une plus grande proportion des coûts
- **Prévoir de 20 à 25 % des coûts d'investissement pour le remplacement d'un composant majeur**
 - Pales du rotor ou multiplicateur (boîte de vitesses)



Coût génie civil :

- onshore : 10%
- offshore : 30%

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Type de fondations - Offshore

Type	Application	Avantages	Désavantages
Embase gravitaire	Matériau mou en profondeur	Réalisation simple	Chère (poids élevé) Démantèlement
Monopieu	Pas de matériau mou en profondeur	Réalisation simple Profondeur d'eau	Très chère (grande dimension) Démantèlement
Plusieurs pieux (tripod ou semelle sur pieux)	Pas de matériau mou en profondeur	Profondeur d'eau	Installation et construction chères Démantèlement
Caisson unique	Sables, argiles molles	Démantèlement	Peu de terrains possibles
Plusieurs caissons (tripod ou semelle sur caissons)	Sables, argiles molles	Démantèlement	Chère Peu de terrains possibles

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

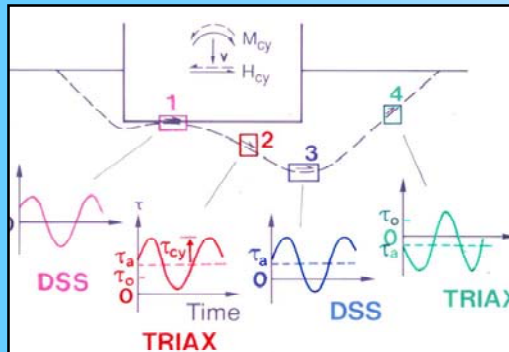
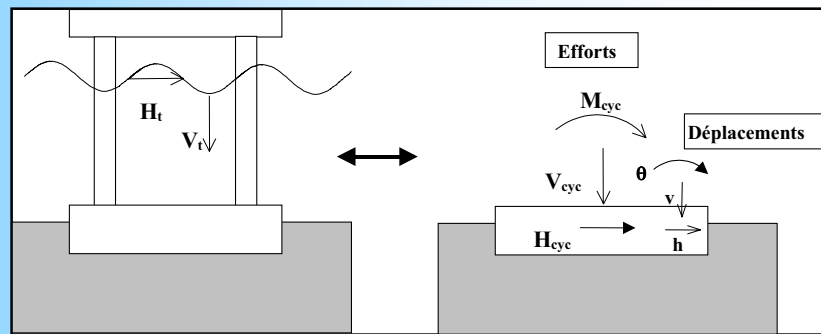
Type de fondations - Onshore

Type	Application	Avantages	Désavantages
Embase gravitaire	Matériaux mous en profondeur	Réalisation simple	Chère (poids élevé) Démantèlement
Plusieurs pieux (exemple : semelle sur micropieux)	Pas de matériaux mous en profondeur	Réalisation simple	Règles de calcul Démantèlement
Tripod	Pas de matériaux mous en profondeur	Réalisation simple	Règles de calcul Démantèlement

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

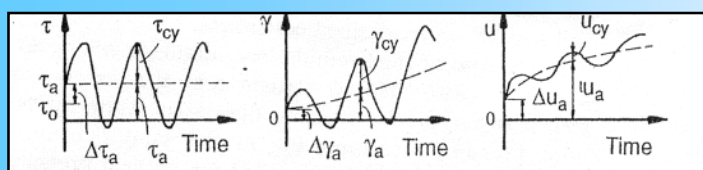
➤ Analyse aux équilibres limites



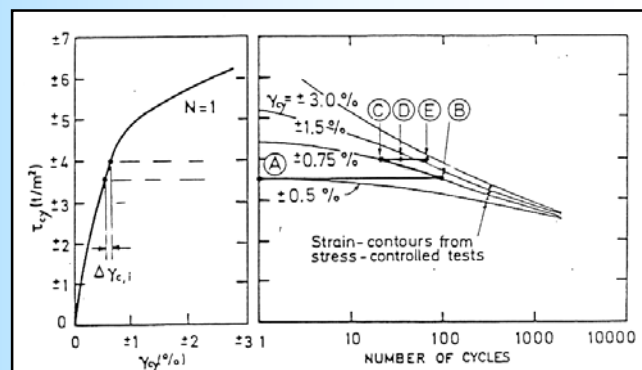
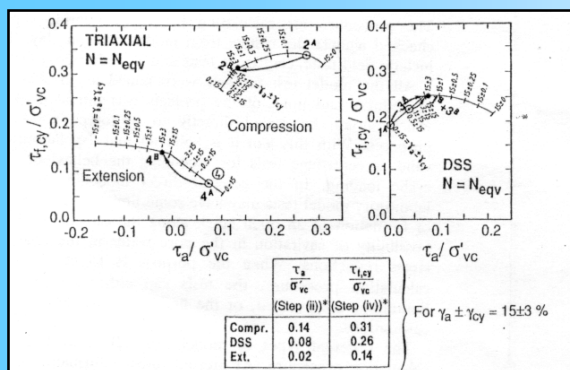
- Définir la résistance au cisaillement (non drainé) de l'argile de référence au bout d'un certain nombre de cycles à un niveau de chargement donné dite résistance cyclique
- Définir la résistance au cisaillement (non drainé) statique, après que ce matériau a été soumis à un certain nombre de cycles à un niveau de chargement donné, dite résistance statique post-cyclique

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique



Évolution des déformations et des pressions interstitielles lors d'un essai cyclique non drainé à contrainte imposée (Andersen et al., 1988).



-Résistances au cisaillement cycliques avant et après la redistribution de τ_a due au chargement cyclique avec une condition $\gamma_a \pm \gamma_{cy} = 15 \pm 3\%$. (Andersen et al., 1988).

• Endommagement au cours de tempête. Procédure du nombre de cycles équivalent (Andersen et al., 1981).

7 avril 2006

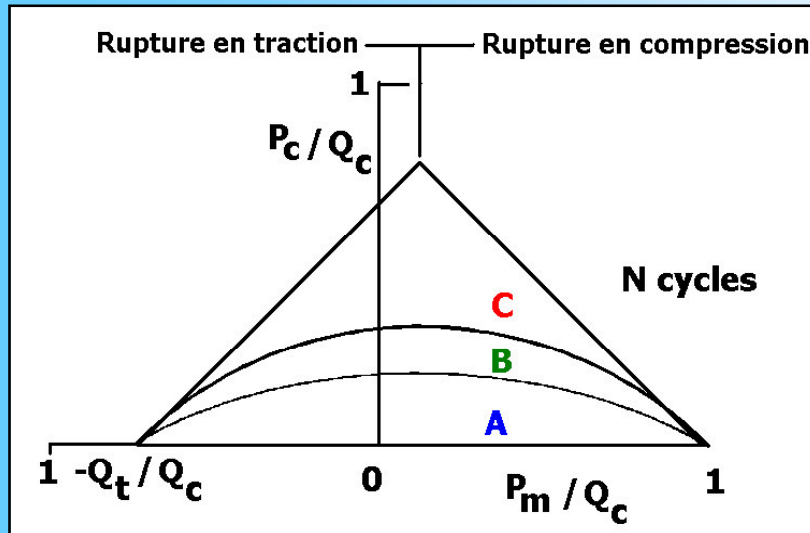
CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

• Poulos, 1989

Chargement cyclique Diagramme de stabilité

3 zones

A Zone stable
B Zone métastable
C Zone instable



$P_m : (P_{max} + P_{min})/2$
Charge moyenne

$P_c : (P_{max} - P_{min})/2$
Amplitude cyclique

Q_c : Capacité portante en compression

Q_t : Capacité portante en traction

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

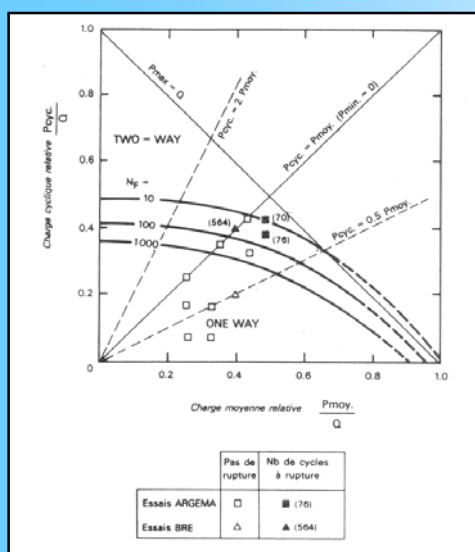


Diagramme d'interaction entre le nombre de cycles N à la rupture et le niveau de chargement cyclique dans des sols cohérents (Karlsrud et al., 1986)

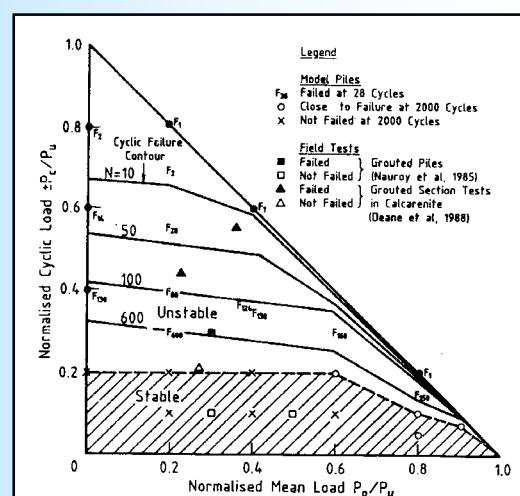
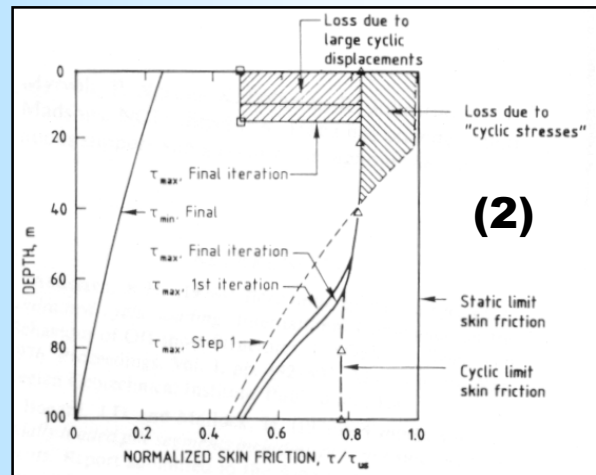
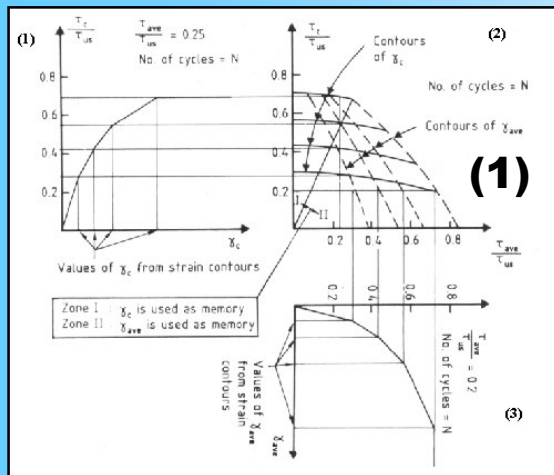


Diagramme de stabilité cyclique (Lee and Poulos, 1990)

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique



- (1) Construction des courbes contrainte-déformation à partir des contours de déformations pour un nombre de cycles donné N , dans le modèle proposé (Karlsrud et al. (1986))
- (2) Redistribution du frottement latéral le long d'un pieu offshore long et flexible en raison du chargement cyclique (Goulois (1982), cité : exemple de calcul)
- ✓ Diminution de la capacité du pieu après cycles et diminution est maximale dans la zone de sol proche de la tête du pieu.

7 avril 2006

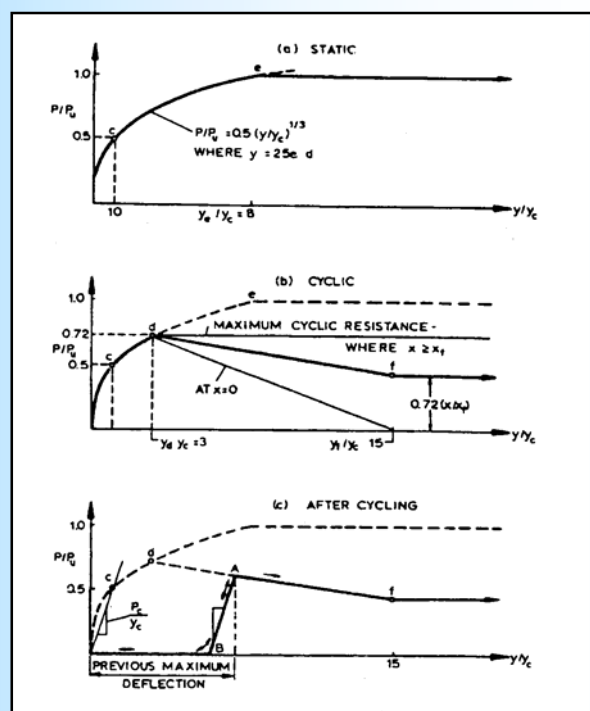
CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Matlock (1970)

cas des argiles molles, courbes p-y pour les conditions de chargement (statique, cyclique et après cycles)

Avec :

- P_u : capacité portante sous chargement latéral
- $P_b / P_u = 0,72$ (résistance ultime de l'argile sous sollicitations cycliques)
- y : déplacement latéral ($y = 2,5 \varepsilon D$)
- $y_c = 2,5 \varepsilon_c D$
- $x_f = 6B / ((\gamma B / c_u + J))$ avec B largeur du pieu, J un facteur empirique qui est compris entre 0,5 pour les argiles molles et 0,25 pour les argiles plus raides.



7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

➤ Dans le paragraphe « *Dimensionnement géotechnique par le calcul* »

➤ Paragraphe « actions »

« Les actions répétitives et les actions d'intensité variable doivent être identifiées pour être traitées de façon spécifique par rapport à la poursuite des mouvements, à la liquéfaction des sols, à la modification de la raideur des sols.

Les actions cycliques à haute fréquence doivent être identifiées pour être traitées de façon spécifique sous l'angle de leurs effets dynamiques ».

➤ Paragraphe « *propriétés des terrains* »

« il faut tenir compte de l'effet ramollissant des actions dynamiques ».

➤ Partie « *essais de chargement de pieux* » : « Lorsque les essais de chargement ne peuvent être pratiqués, du fait des difficultés liées à la modélisation de la variation de la charge (par exemple les charges cycliques), il convient d'utiliser des valeurs de calcul très prudentes des propriétés du matériau ».

➤ Partie « *Pieux sous charge axiale* » ; « résistance à la traction du terrain »

« L'effet défavorable sévère des chargements cycliques et des inversions de charge sur la résistance à la traction doit être pris en compte ».

➤ Partie « *Pieux chargés latéralement* » « déplacement latéral », « L'estimation du déplacement latéral en tête d'une fondation sur pieux doit tenir compte de l'effet des inversions de charge ou d'un chargement cyclique ».

De même, dans le Fascicule 62 – Titre V, dans l'article 5.1.2 concernant la justification aux ELS des micropieux, il est évoqué le problème des sollicitations cycliques :

« L'attention est attirée sur le cas des micropieux soumis de façon fréquente à des efforts alternés, qui peuvent dégrader rapidement le frottement sol-pieu. Il y a lieu dans chaque cas particulier de définir des états-limites de fatigue tenant compte de cette dégradation ».

Etude de cas

- **But de la présentation**
- **Quelques ordres de grandeur**
- **Le cadre réglementaire dans l'éolien**
- **Les principaux constructeurs d'éoliennes**
- **Les cahiers des charges constructeurs**
- **Comparaison de 4 systèmes de fondations d'une éolienne**
- **Commentaires des résultats des 4 simulations**
- **Diagramme de stabilité pour un pieu long dans un multicouche**
- **Conclusions**

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

But de la présentation

- **Illustrer, au travers de la problématique des éoliennes, la nécessité de compléter les «exigences» réglementaires actuelles pour la prise en compte des chargements cycliques dans le dimensionnement des fondations profondes**
- **Proposer une méthode simplifiée pour déterminer un diagramme de stabilité pour un pieu long dans un multicouche**

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Quelques ordres de grandeur

➤ Financiers (rappel)

- Coût d'une éolienne de 1MW : > 1,00 M€uros
- Au moins 8% du coût affecté aux fondations
- 30% d'augmentation du coût des travaux pour des éoliennes off-shore

Le cadre réglementaire éolien

- Les Cahiers des Charges se réfèrent à des « Règles professionnelles étrangères » :
 - International Electrotechnical Commission - IEC 61400 part 1 (second edition 02-1999)
 - Deutsches Institut für Bautechnik - DIBt
 - Germanischer Lloyd WindEnergie- GL we – édition 2003 + supplément 2004
- Ces « Règles professionnelles » proposent principalement :
 - Les classes de vent (IEC I, II, III - WZ I, II, III etc)
 - Les cas de charges sur l'éolienne (Design Load Cases - DLC)
 - Les méthodes de calculs des efforts supportés par l'éolienne
 - Les facteurs de sécurité partiels (γ_f , γ_m , γ_n)
- Les aspects relatifs aux fondations (superficielles ou profondes) sont très peu abordés

Le cadre réglementaire éolien

➤ Les cas de charges sur l'éolienne (extrait IEC 61400-1 §7.4) :

- En phase d'exploitation (9 cas)
- En phase d'exploitation + incident (3 cas)
- Au démarrage (3 cas)
- En arrêt normal (2cas)
- En arrêt d'urgence (1 cas)
- En immobilisation (2 cas)
- En immobilisation + incident (1 cas)
- En phase de transport, assemblage, entretien/réparation (1 cas)

➤ Soit 22 cas de charges (durée de vie 20ans)

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Le cadre réglementaire éolien

Les facteurs de sécurité partiels γ_f extrait IEC 61400-1 §7.6)

Table 4.3.2 Partial safety factors for loads γ_f

Source of loading	Unfavourable loads			Favourable loads
	Type of design situation (see Table 4.3.1)			All design situations
	N Normal and extreme	A Abnormal	T Transport and erection	
Aerodynamic				
Operational				
Gravity				
Other inertial forces				
Heat influence				
* in the event of the masses not being determined by weighing.				

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Le cadre réglementaire éolien

Particularité des règles dites « GL » (Part1 – Chapter 6 - § 6.7.6.4.)

➤ Pour les fondations sur pieux, il est demandé :

- à défaut, d'une étude particulière de l'évolution de la capacité portante sous un chargement de type fatigue (cyclique)
- d'adopter une conception garantissant l'absence de traction dans les pieux sous certains cas de charges particuliers (DLC 1.0 et 1.1) avec $\gamma_f = 1.00$

Libellé original §6.7.6.4. :

(4) Instead of a precise analysis of fatigue with regard to the external load-bearing capacity, a substitute analysis may be provided to the effect that, with the combinations of actions DLC 1.0 and 1.1 according to

Table 4.3.1 with $\gamma_f=1.0$, no tensile forces occur in the piles.

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Les principaux fournisseurs de machines

- **Enercon (ALL)**
- **GE Wind Energy (US)**
- **Jeumont (FR)**
- **Nordex (DK)**
- **Vestas – Neg Micon (ESP/DK)**
- **Repower (ALL) ...**
- **MAIS autant de cahiers des charges...**



7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

➤ Un cahier des charges par fournisseur:

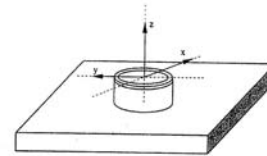
- Proches sur le fond mais différents sur la forme

➤ Des données classiques:

- Un torseur des efforts et moments non pondérés en pied de mât
- les cas de charge de non soulèvement / non traction

1. Loads for design of foundation

1.1 Coordinate system



1.2 Extreme loads and normal loads

The Extreme load cases with and without safety factors are shown in Table 1.1 and Table 1.3.

Fallw=1.0	Lastfall	v	vdr	Fx	Fy	Fxy	Fz	Mx	My	Mxy	Mz

Table 1.1: Extreme load cases before application of safety factors

Fallw=1.0	Lastfall	v	vdr	Fx	Fy	Fxy	Fz	Mx	My	Mxy	Mz

Table 1.2: Loads for investigation of the appearance of the ground gap for pile foundations. Safety factors have not been applied.

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

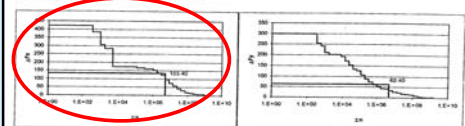
➤ Des données plus inhabituelles:

- pour vérification à la fatigue :
 - des matériaux constitutifs des pieux (yc soudures)
 - de la capacité portante des pieux ?

➤ À savoir:

- spectre des étendues de variations d'efforts (ΔF_x , ΔF_y , ΔF_z) et de moments (ΔM_x , ΔM_y , ΔM_z)
- valeurs moyennes (F_{x_m} , F_{y_m} , ..., M_{x_m} , ...)
- étendues d'efforts et de moment à dommage équivalent (N et m fixés)

1.1 Rotor blade LM 37.3, IEC 3a

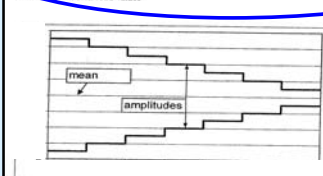


Picture 1.2: Foundation fatigue load- and simulated fatigue spectra for rotor blade LM 37.3 according to IEC 3a, all units [kN] and [m], $n=4$ and $N_D=565$ for one level fatigue spectra.

1.3 Fatigue

To consider approximately the effect of mean stress the average value is taken from the load cases shown in Table 1.4. By that way it can be simulated that all amplitudes vibrate around the same mean value. The shape of the simulated fatigue spectra is shown in Picture 1.1.

1.3.1 Mean load values



Picture 1.1: Exemplary assignment of the average value

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

- **Tableau de valeurs numériques décroissantes des étendues de variations d'effort et de moment pour chaque occurrence Ni**

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

- Des exigences particulières au niveau des fondations:
- **Condition de non soulèvement pour une semelle superficielle ou d'absence de traction dans les pieux en fondations profondes (cas du « lift-off »)**
 - **Limitation de la rotation du massif à $0,10^\circ$**
 - **Vérification de la raideur angulaire dynamique $K_{\omega,dyn}$ (de 20.000 à 100.000 MNm/rad)**
 - **Vérification de la raideur horizontale dynamique $K_{xy,dyn}$ (de 150 à 375 MN/m)**

2. Spring Constants

2.1 Required rotational stiffness of foundation for 80 m hub height, WZ III based on IEC 3a

For the base of the type test or other certifications the minimal value for the rotational stiffness of foundation $K_{\omega,dyn}$ which represents the clamping of the foundation- may not be under

This Value has been used in all calculations to consider the clamping of the foundation.

2.2 Minimal value for horizontal spring constant

In order to not under-run a second eigenfrequency of 3,0 Hz the values for a horizontal spring constant $K_{xy,dyn}$ have to comply with Table 2.1. The calculation took place with a rigid rotational stiffness of foundation. The mass of the pile-plate is varied between 300 and 750 tons.

Table 2.1 Minimal value for horizontal spring constant

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

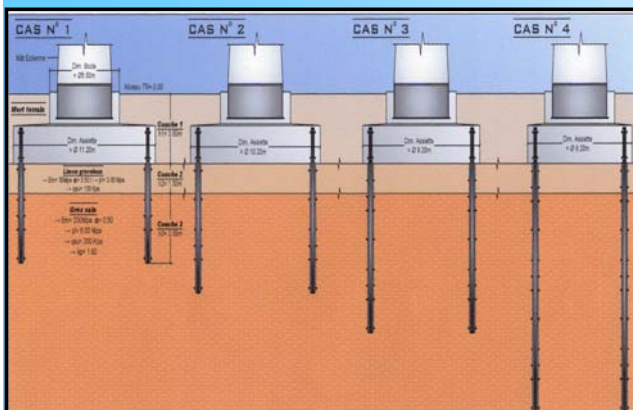
Etude de cas

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Comparaison de 4 systèmes de fondations d'une éolienne ($H_{\text{mât}}=80\text{m}$ -IEC2a-2MW)

• Représentation des 4 cas étudiés:



Calcul n°	Nombre de pieux	Diamètre massif
1 (cas lift-off)	18u L=9.00m	11,20m $\Phi_{\text{pieu}}=10\text{m}$
2	16u L=10.00m	10,20m $\Phi_{\text{pieu}}=9\text{m}$
3	14u L=12.00m	9,20m $\Phi_{\text{pieu}}=8\text{m}$
4	11u L=16.0m	8,20m $\Phi_{\text{pieu}}=7\text{m}$

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Comparaison de 4 systèmes de fondations d'une éolienne ($H_{\text{mât}}=80\text{m-IEC2a-2MW}$)

- Calcul des charges verticales
Qmin et Qmax en tête de pieux
(cas n°1 à 4)
- Répartition circulaire uniforme des
pieux sur une file (formule RDM)

$$Q_{\text{min/ max}} = \frac{F_z}{n_{\text{pieu}}} + / - \frac{4.M_{\text{res}}}{n_{\text{pieu}}.\Phi}$$

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Comparaison de 4 systèmes de fondations d'une éolienne ($H_{\text{mât}}=80\text{m-IEC2a-2MW}$)

- Résultats des charges
sur pieux ELS / ELU:
- MIN (traction)
- MAX (compression)

	[KN] Vcomp max	[KN] Hc concomitant	[KN] Vtrac max	[KN] Ht concomitant
LIFT-OFF	-1008	15	-1	15
0	-1639	39	636	39

	pieu comprimé [KN]		pieu tendu [KN]	
	Vcomp max	Hc conc.	Vtrac max	Hc conc.
ELS quasi-permanent	-1008	15	-1	15
ELS rare	-1639	39	636	39
ELU fondamental	-2468	59	1261	59

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Comparaison de 4 systèmes de fondations d'une éolienne ($H_{\text{mât}}=80\text{m}$ -IEC2a-2MW)

- Calculs de Q_{cyc} et Q_{moy} pour chaque occurrence à partir des étendues du spectre de fatigue

EFFORTS DE FATIGUE EN PIED DE TOUR

$\gamma_t \times \gamma_n$ 1.0

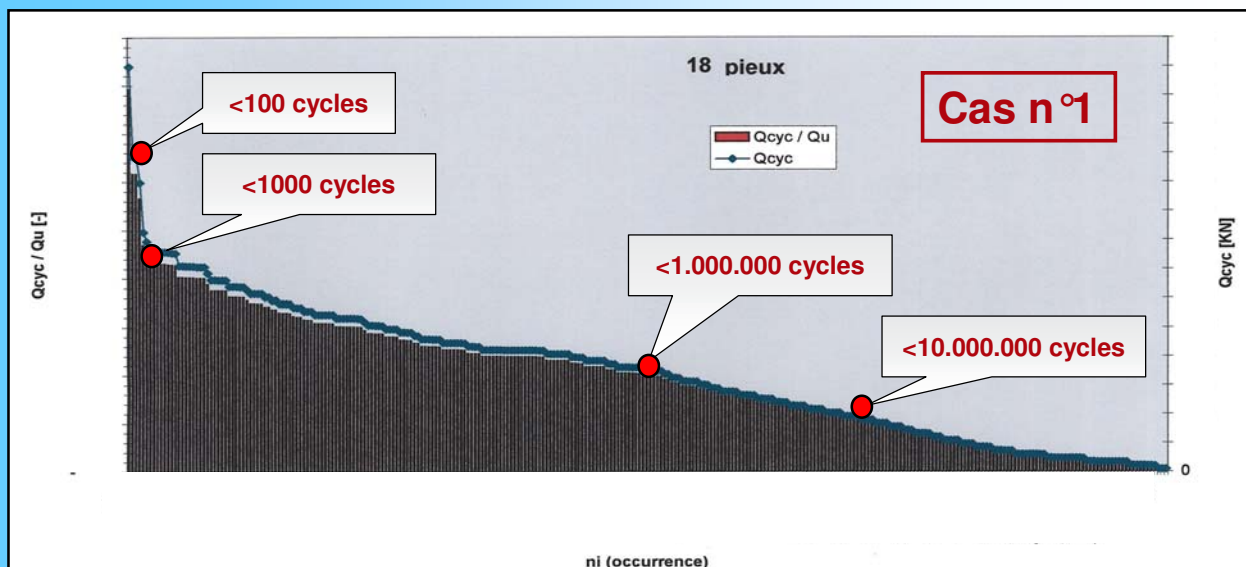
valeur
moyenne
fatigue

N° d'ordre	dFx KN	dFy KN	dFz KN	dMx KN.m	dMy KN.m	dMz KN.m	ni Unité	Somme ni unite	dNtube KN	Qcyc KN	Qmoy KN	Qcyc / Qu -	Qmoy / Qu -	Observation fatigue soil/pieu -
1														alternée
2														alternée
3														alternée

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Comparaison de 4 systèmes de fondations d'une éolienne ($H_{\text{mât}}=80\text{m}$ -IEC2a-2MW)



7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

RECAPITULATIF DES 4 CAS EXAMINES					
	Calcul n°	1	2	3	4
	Nombre pieux Long pieux Diamètre massif Vol. béton massif				
LIFT-OFF	Q max				
LIFT-OFF	Q _{max} / Q _{su}				
ELS	Q _{els comp}				
ELS	Q _{els tract}				
ELU	Q _{elu comp}				
ELU	Q _{elu tract}				
ELF	Q _{su min}				
	Q _{moy}				
	Q _{moy} / Q _{su}				
ni < 100	Q _{cyc}				
ni # 1000	Q _{cyc}				
ni # 1.000.000	Q _{cyc}				
ni # 10.000.000	Q _{cyc}				
ni < 100	Q _{cyc} / Q _{su}				
ni # 1000	Q _{cyc} / Q _{su}				
ni # 1.000.000	Q _{cyc} / Q _{su}				
ni # 10.000.000	Q _{cyc} / Q _{su}				
prix de base		100	93	88	87

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Commentaires des 4 simulations

- Pour chaque cas, les rapports Q_{cyc}/Q_{su} et Q_{moy}/Q_{su} varient peu du fait de l'augmentation de Q_{su}
- A partir du cas n°1, les pieux subissent une traction Q_{max} croissante sous « lift-off » et le rapport Q_{max}/Q_{su} atteint 13% pour la cas n°4
- Suivant les cas, les pieux les plus chargés reprennent des efforts de compression ELU de 2500KN (cas n°1) à 4500KN (cas n°4)
- La cas n°4 offrirait une économie potentielle atteignant presque 15% du montant des fondations du cas n°1 de base

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

diagramme de stabilité pour un pieu long en traction dans un multicouche

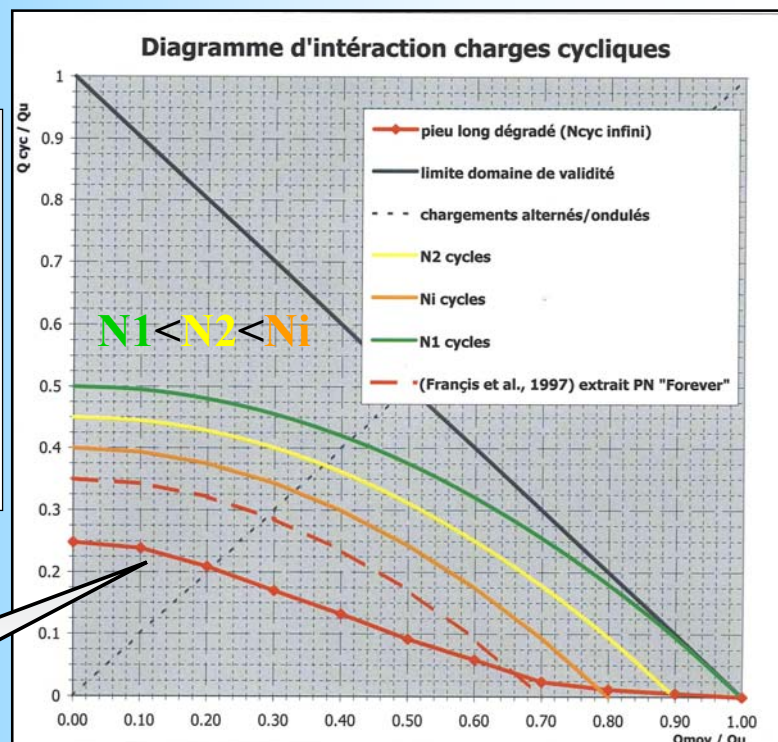
7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Détermination du diagramme de stabilité

- Dégradation augmente avec le nombre de cycles
- Utilisation du diagramme de dégradation parabolique proposé dans « FOREVER »
- Pas de dégradation considérée pour les modules des couches de terrain

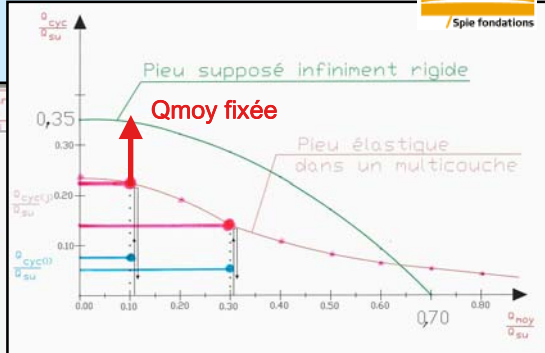
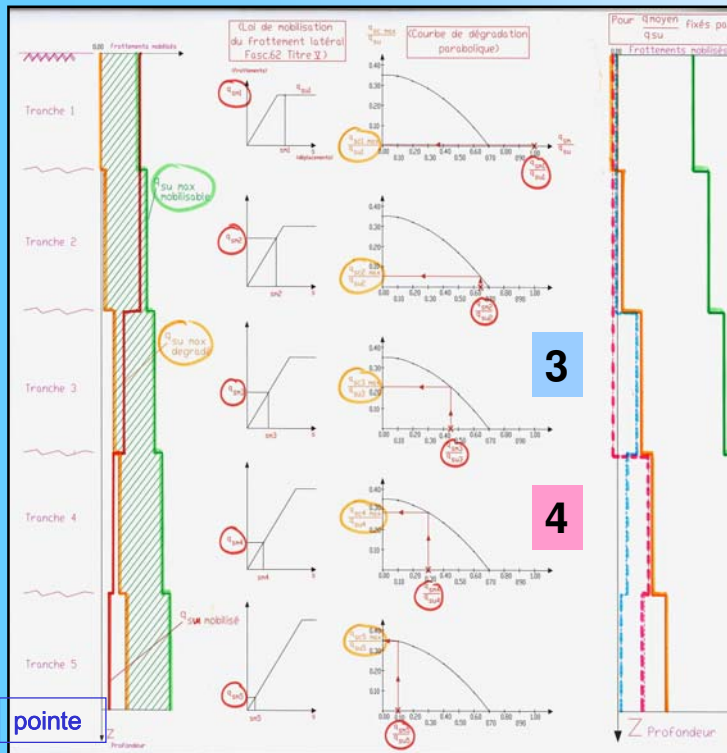
Allure du diagramme
d'un pieu flexible



7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Détermination d'un diagramme de stabilité (pieu long dans un multicouche – N cycle infini)



1/ découpage du pieu en 5 tranches par ex. et utilisation des lois de comportement (Fasc.62 titre V)

2/ recherche des états de mobilisation de chaque tranche (pour un Q_{moy} fixé)

3/ lecture des $q_{sc, max, i}$ par tranche sur courbes de dégradation paraboliques

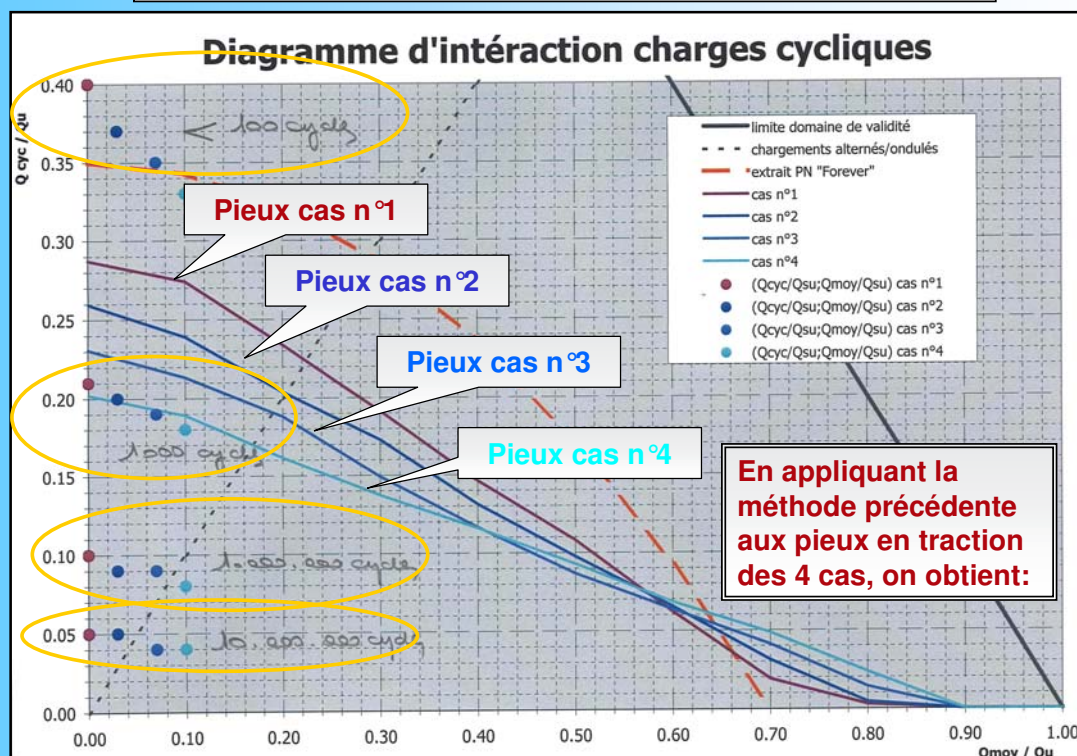
4/ calcul de $Q_{cyc, max}$ (pour Q_{moy} fixé) en « grillant » par étapes successives les tranches qui « saturent » ($q_{sc, i} = q_{sc, i, max}$)

5/ reprise des étapes 1 à 4 pour chaque valeur de Q_{moy}/Q_{su}

7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Détermination du diagramme de stabilité



7 avril 2006

CFMS - Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique

Conclusions

- La règle empirique (« lift-off ») permettant de s'affranchir d'un calcul de fatigue (recommandée par les « règles professionnelles » GL) conduit dans le cas n° 1 étudié à:
 $(Q_{cyc}/Q_{su}) < 0.40$ pour les cycles de chargement les plus élevés.
- Compte tenu des variations des efforts cycliques à chaque occurrence, la méthode simplifiée décrite précédemment ne permet pas de conclure définitivement.
- Pour des chargements cycliques variables, il manque une méthode qui définirait, des diagrammes de stabilité « locaux » en fonction de:
 - **la nature des terrains**
 - **la résistance de ces terrains**
 - **nombre de cycles**
 - **la présence d'un effort horizontal concomitant**

Essais sur micropieux de haute capacité

Michel BUSTAMANTE

CONCLUSIONS

- Les règlements imposent la prise en compte des aspects cycliques des chargements dans le dimensionnement sans fixer de cadre aux différents acteurs.
- Solutions plus économiques pour des semelles sur pieux, des améliorations pourraient être apportées à la réglementation
- Il manque une méthode qui fournirait, par exemple, des diagrammes de stabilité en fonction de:
 - la nature des terrains
 - la résistance de ces terrains
 - le nombre de cycles
 - la présence d'un effort horizontal concomitant

PERSPECTIVES

- Éoliennes seront de plus en plus hautes, des fondations sur pieux seront nécessaires à terme
- Instrumentation des ouvrages et fondations
- Proposer des méthodes simplifiées de prise en compte des chargements cycliques axiaux