

Recommandations pour la conception et le dimensionnement des fondations d'éoliennes offshore



Présentation des Recommandations et de leurs points forts

P. BERTHELOT

INTRODUCTION



Comité Français de Mécanique des Sols
et de Géotechnique



Groupe de travail « Fondations d'éoliennes ».

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



Version 1.1 Finale

1 / 112, Version du 05 juillet 2011

Le Groupe de travail "Fondations d'éoliennes" mis en place par le CFMS a terminé son travail en 2011 par la rédaction de Recommandations publiées dans la RFG n°138-139 en 2012.

Il est précisé en Introduction que ces Recommandations "**s'appliquent aux éoliennes implantées sur le domaine terrestre (éolienne onshore) à destination industrielle dont l'axe de rotation du rotor est situé à plus de 12 m. au-dessus de la plateforme**".

En 2013 le CFMS a mis en place un nouveau Groupe de travail pour rédiger des "**Recommandations pour la conception et le calcul des fondations d'éoliennes offshore**".

LE DOCUMENT



Comité Français de Mécanique des Sols
et de Géotechnique

Groupe de Travail « Fondations d'éoliennes offshore »

Recommandations pour la conception et le calcul des fondations d'éoliennes offshore



Version 1.0 mise en ligne
sur le site du CFMS
www.cfms-sols.org
en août 2018

Recommandations pour la conception et le calcul des fondations d'éoliennes offshore

Version 1.0 - 31 juillet 2018

Page 1

LES INTERVENANTS

Président : Patrick Berthelot Bureau Veritas

Animateur : Alain Puech FugroGeoconsulting

Coordination de la rédaction : Françoise Ropers GDS/Consultante
Terrasol; Patrick Berthelot; Alain Puech

Maîtres d'Ouvrage : EDF-EN; Engie; EoleRes

BET Géotechnique : Cathie Associates; Fondasol; Fugro;
GdS; Geos; Terrasol

BET : Ceteal; Doris Engineering; Innosea; Subsea7; Technip;
Tractebel Engie

Constructeurs : General Electric

Entreprises : Bouygues; Demathieu Bard; Eiffage; Saipem

Bureaux de Contrôle Technique : Bureau Veritas; Socotec

Institutionnels : Ifsttar

LE TEXTE

- **AVANT PROPOS**
- **CHAPITRE 1 : INTRODUCTION**
- **CHAPITRE 2 : REFERENTIEL**
- **CHAPITRE 3 : CONDITIONS DE SITES**
- **CHAPITRE 4 : CHARGES ET SOLLICITATIONS**
- **CHAPITRE 5 : ETUDES DE TERRAINS**
- **CHAPITRE 6 : PARAMETRES DE SOL ET PROFILS DE DIMENSIONNEMENT**
- **CHAPITRE 7 : SOLLICITATIONS ET VERIFICATIONS**
- **CHAPITRE 8 : FONDATIONS SUR MONOPIEUX**
- **CHAPITRE 9 : FONDATIONS SUR PIEUX**
- **CHAPITRE 10 : DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS GRAVITAIRES**
- **CHAPITRE 11 : AFFOUILLEMENT ET MOBILITE SEDIMENTAIRE**

LES ANNEXES

- **ANNEXE A : TABLEAU DES CHARGES**
- **ANNEXE B : EMBASES ANNULAIRES**
- **ANNEXE C : EXEMPLE DE MODELISATION D'UNE FONDATION GRAVITAIRE PAR ELEMENTS FINIS**

LES PRINCIPES DES RECOMMANDATIONS

- Ces Recommandations s'appuient sur et viennent en complément des normes internationales relatives au domaine offshore et spécifiquement aux éoliennes offshore :

**IEC 61400, NF EN 61400 et
DNVGL-RP-C212; DNVGL-ST-0126; DNVGL-ST-0145;
DNVGL-ST-0437.**

IEC : International Electrotechnical Commission

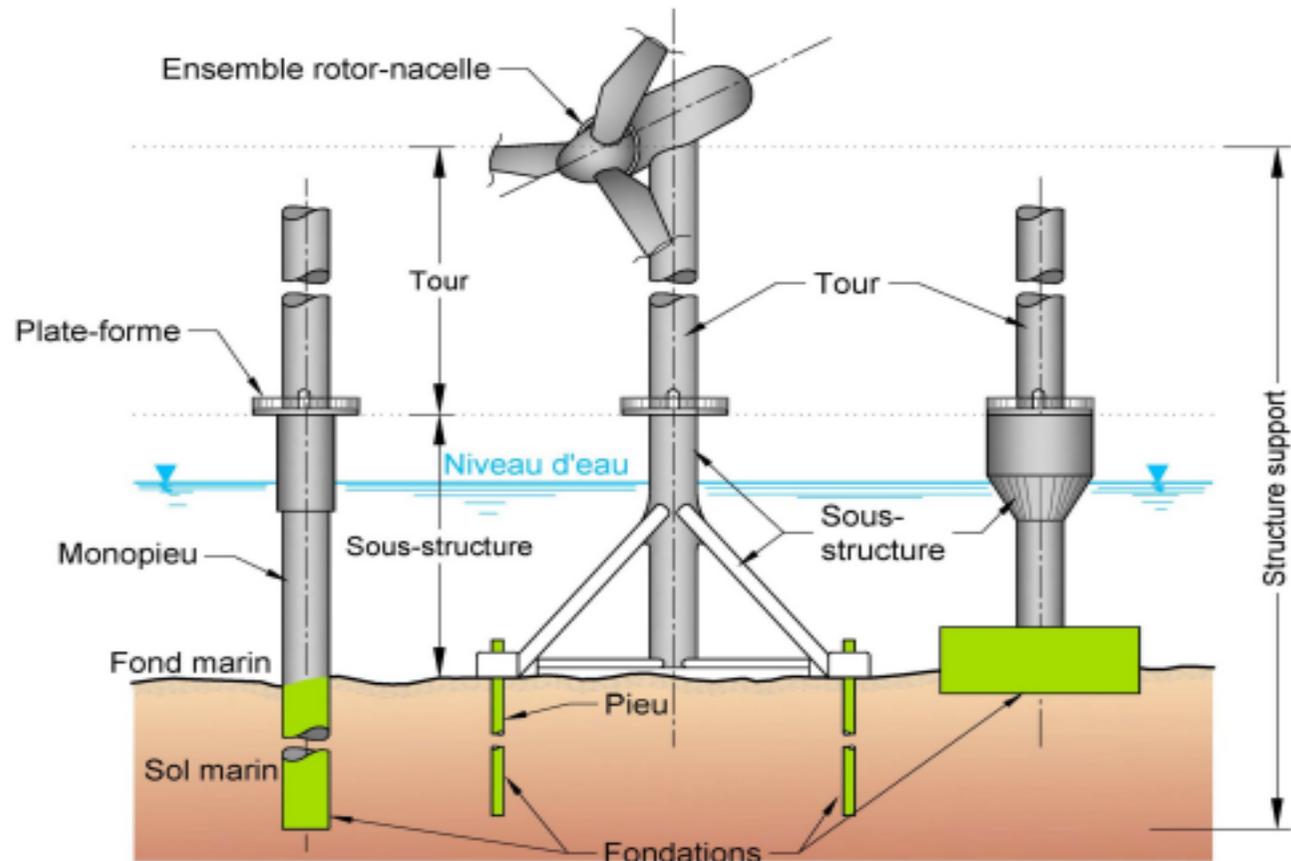
DNV GL : Det Norske Veritas Germanischer Lloyd

LES PRINCIPES DES RECOMMANDATIONS

- Elles ont pour vocation de pallier l'absence de documents normatifs ou de textes réglementaires **nationaux** concernant la conception et la réalisation des **fondations** des ouvrages offshore dans les eaux territoriales françaises et :
 - de couvrir les types de sols spécifiques rencontrés sur le plateau continental français (craies, marnes, calcarénites ...);
 - de traiter de manière détaillée le cas des pieux forés adaptés à ces types de sols;
 - d'introduire les apports du projet SOLCYP concernant les chargements cycliques et plus particulièrement pour les pieux.

LES PRINCIPES DES RECOMMANDATIONS

Elles ne traitent que des **fondations d'éoliennes fixes** et des types les plus fréquemment rencontrés à ce jour.



Monopieu

Pieux pour multipodes

Embase gravitaire

LES PRINCIPES DES RECOMMANDATIONS

D'où 3 grands chapitres :

- ✓ **Chapitre 8** : Fondations sur monopieux (40 pages)
- ✓ **Chapitre 9** : Fondations sur pieux (50 pages)
- ✓ **Chapitre 10** : Dimensionnement des fondations gravitaires (35 pages)

LES PRINCIPES DES RECOMMANDATIONS

Mais pour cela il a été nécessaire de définir :

✓ **Chapitre 4** : Charges et cas de charges (20 pages)

✓ **Chapitre 7** : Sollicitations et vérifications (10 pages)

Complété par :

✓ **Chapitre 5** : Etudes de terrain (40 pages)

✓ **Chapitre 6** : Paramètres de sol et profils de dimensionnement (30 pages)

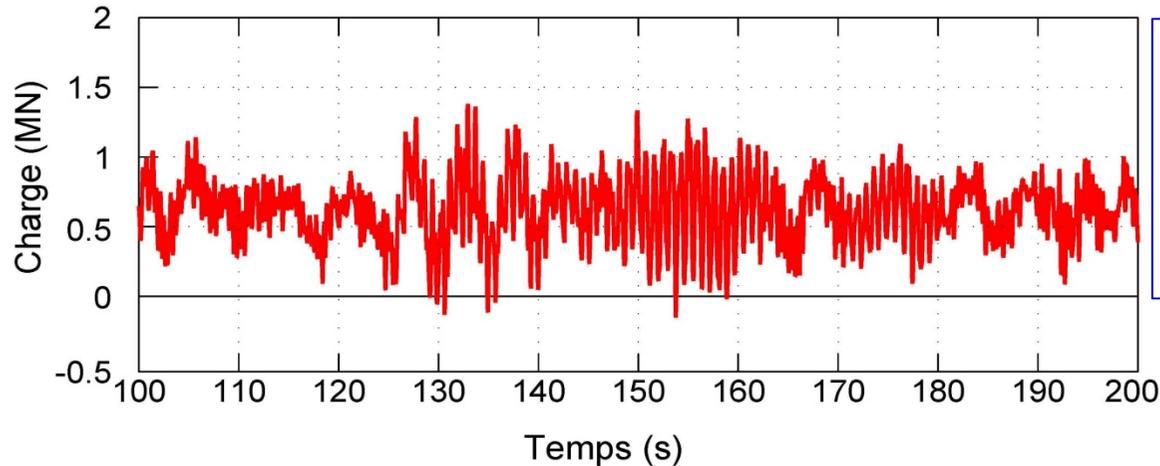
✓ **Chapitre 11** : Affouillement et mobilité sédimentaire (10 pages)

LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

- Dès le démarrage du Groupe de Travail nous nous sommes concentrés sur le **Chapitre Etudes de terrain** car c'est le point d'entrée nécessaire pour un dimensionnement détaillé des fondations.
- *On rappelle aussi que le choix du mode de fondation (**Monopieu / Pieux / Embase gravitaire**) intervient très en amont et qu'il n'est pratiquement plus modifiable !!*
- **C'est pourquoi dès juin 2015 le Chapitre Etudes de terrain a été mis en ligne sur le site du CFMS.**

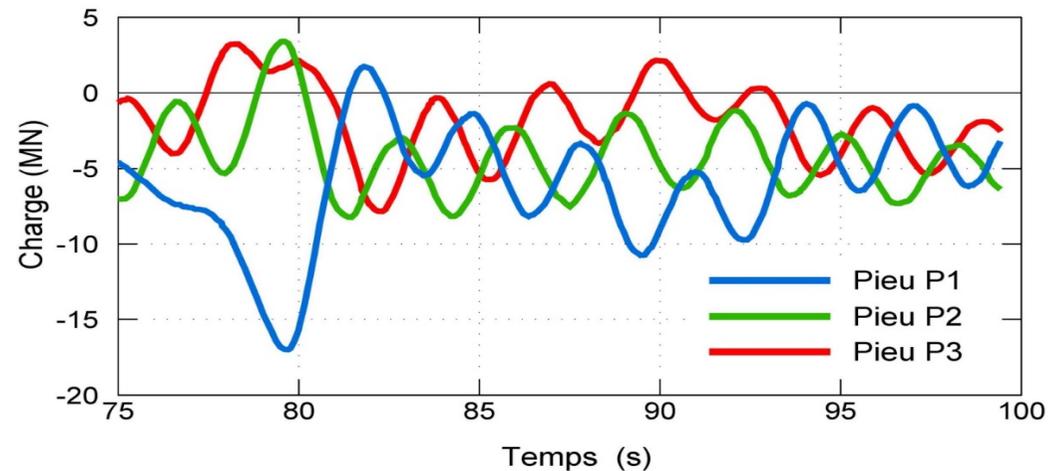
LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

- Dans le *Chapitre Charges et cas de charges* un point important concerne **les Charges cycliques**.



Chargement induit en tête de monopieu par une turbine éolienne en opération (calculée).
Chargement dominé par les conditions de vent.

Charges axiales extrêmes transmises à la tête des 3 pieux de fondation d'une éolienne (tripode).
Chargement dominé par la houle.

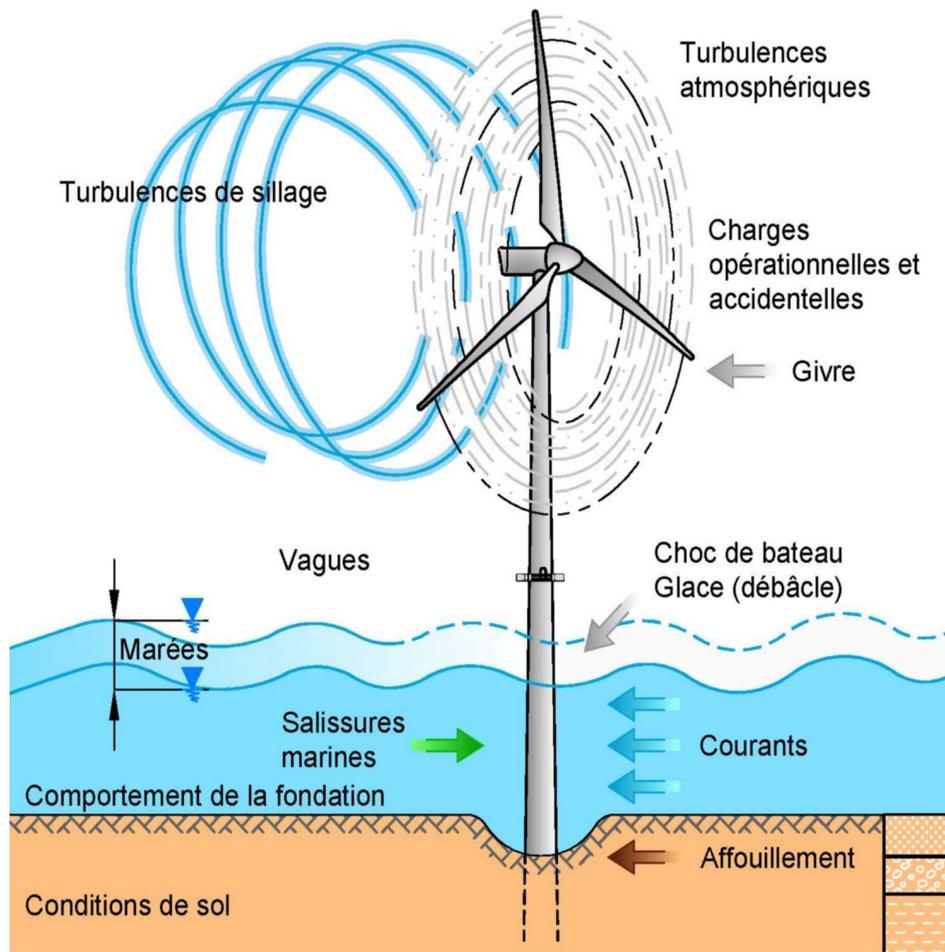


LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

- Dans le processus de dimensionnement des fondations, la prise en compte des chargements cycliques comporte 2 étapes :
 - **Étape 1** : la transformation du chargement aléatoire en un chargement idéalisé par une méthode de comptage;
 - **Étape 2** : la détermination d'un chargement équivalent à partir du chargement idéalisé en utilisant les lois d'endommagement au sens de Miner.
- Les méthodes d'obtention des chargements cycliques équivalents (**Étape 2**) sont décrites dans les chapitres correspondants aux différents types de fondations (**Monopieu / Pieux / Embase gravitaire**) .
- **L'apport des recommandations SOLCYP (2017) a été déterminant pour la rédaction de ces Chapitres.**

LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

- Dans la prise en compte de l'effet des charges intervient un élément important : **l'Interaction Sol - Structure**.



Le calcul des charges et des sollicitations dépend de la dynamique globale de la structure et de ses interactions avec le sol.

La prise en compte de ce couplage est nécessaire à toutes les étapes du projet, y compris lors des étapes préliminaires.

La modélisation du sol influe sur la conception de la structure : Raideurs et amortissement conditionnent la dynamique globale du système **et donc le résultat des calculs de charges.**

Les états de mer et de vents sont introduits dans le *Chapitre 3 Conditions de sites.*

LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

- Le dimensionnement des fondations nécessite de disposer au droit de chaque éolienne :
 - d'un découpage du sol en unités géotechniques sur toute la zone d'influence de la fondation;
 - de la définition pour chaque unité d'un jeu de paramètres géotechniques représentatifs du comportement du sol vis-à-vis des sollicitations appliquées.
- Le processus d'établissement des profils de dimensionnement est décomposé en 4 étapes :
 - Synthèse de l'information disponible;
 - Discrétisation du profil de sol en unités géotechniques;
 - Mise en évidence pour chaque unité **de valeurs caractéristiques**, représentatives du comportement du sol vis-à-vis des E.L.;
 - Choix de paramètres de dimensionnement géotechniques directement utilisables pour le dimensionnement de l'ouvrage.

LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

Valeur caractéristique	Désignation	Quantile	Commentaires
Estimation la plus basse	LE	0-10	L'intervalle est centré sur le quantile à 5% de la distribution (cf. NF EN ISO 19900 (2014), EC7 ou DNVGL-RP-C207, 2017) Lorsque la distribution est particulièrement irrégulière, il convient de faire appel au jugement du géotechnicien pour éliminer des valeurs jugées anormales, le but restant de produire un minimum raisonnable.
Estimation prudente	CE	25-45	Cette valeur s'interprète comme celle qui correspond aux recommandations des § 7.4.2.1 à 7.4.2.9 de DNVGL-ST-0126 (2016) et à la clause 2.4.5.2 de EC7. Pour des couches bien caractérisées, et des états limites liés à des comportements globaux contrôlés par un volume important de sol, cette valeur peut être estimée de l'ordre de $BE - 0,5 \text{ à } 1,0 \sigma$ ($\sigma = \text{écart type}$) suivant le nombre de données et leur étalement.
Meilleure estimation	BE	50	Il s'agit de la valeur moyenne pour une distribution normale ou de la médiane pour d'autres distributions
Estimation optimiste	OE	55-75	Mêmes considérations que pour l'Estimation prudente mais du côté des valeurs supérieures à la moyenne
Estimation la plus haute	HE	90-100	L'intervalle est centré sur le quantile à 95% de la distribution (cf. NF EN ISO 19900, EC7 ou DNV-RP-C207, 2017) Lorsque la distribution est particulièrement irrégulière, il convient de faire appel au jugement du géotechnicien pour éliminer des valeurs jugées anormales, le but restant de produire un maximum raisonnable.

Correction

Définition des valeurs caractéristiques

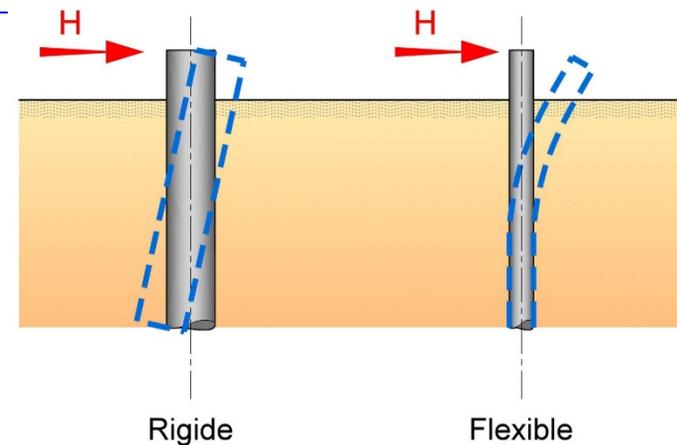
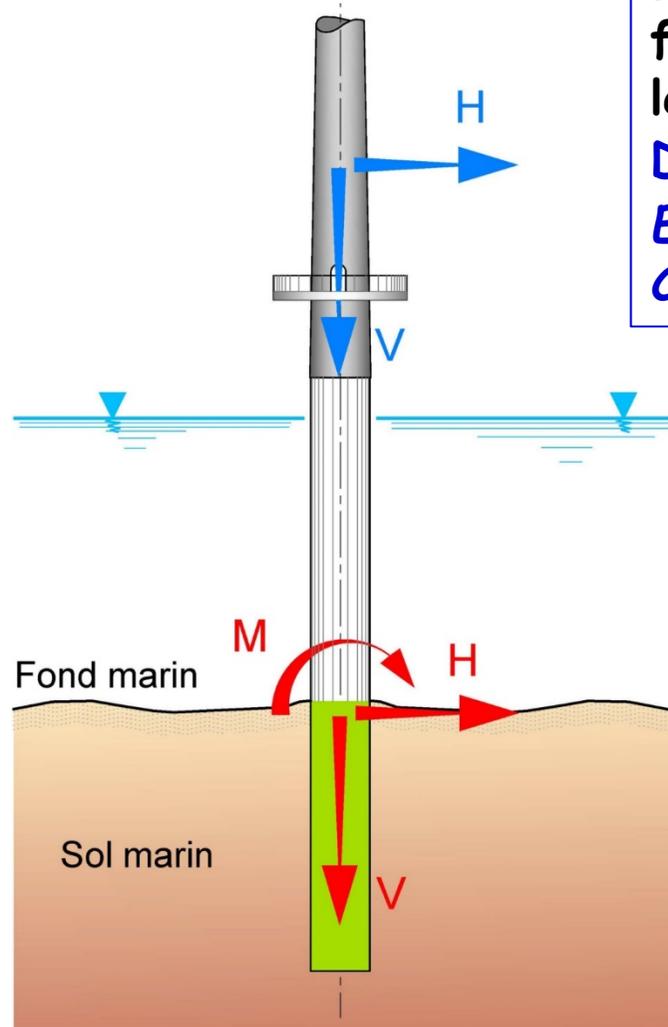
LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

✓ Chapitre 8 : Fondations sur monopieux

Les monopieux représentent le type de fondations le plus largement répandu pour les éoliennes installées en mer.

Diamètre entre 3 et 8+ m.

Élancement faible : compris entre 2 et 4.
Comportement rigide



La charge horizontale H et le moment de renversement M sont les composantes dimensionnantes

LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

✓ Chapitre 8 : Fondations sur monopieux

- Une particularité des monopieux est que l'ISS joue un rôle prépondérant, de sorte que ces critères sont interdépendants. Des itérations sont nécessaires tout au long du processus de dimensionnement.
- *Les fréquences propres des structures de type monopieu sont proches des fréquences des sources d'excitation : houle, vent, rotation des pales.*
- *L'analyse des fréquences propres est déterminante pour la sélection du diamètre.*

LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

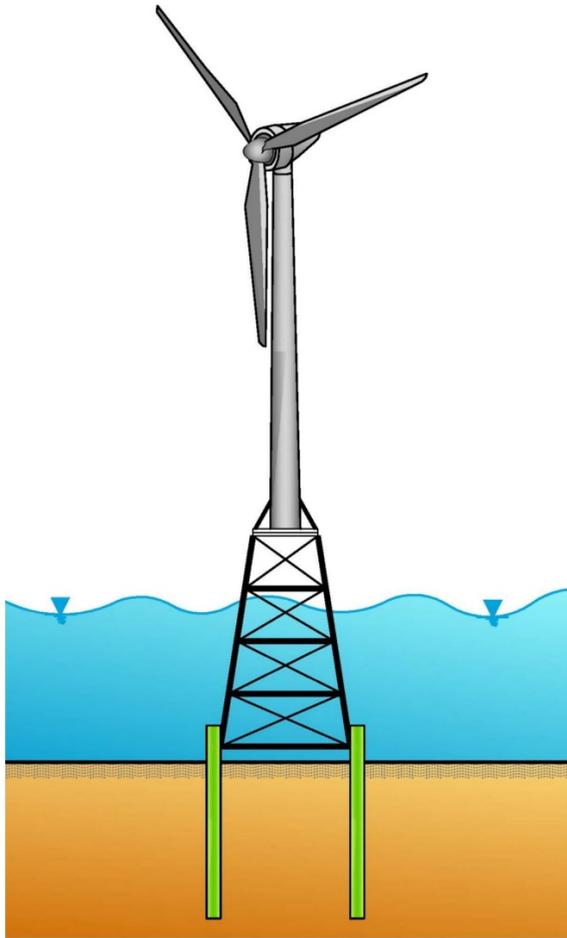
✓ Chapitre 8 : Fondations sur monopieux

- Le monopieu est très souvent intégré dans le modèle structural soit de l'éolienne (approche couplée) soit de la sous-structure (approche semi-couplée).
- *La réponse du sol est incluse dans le modèle structural sous forme de courbes $p-y$ non linéaires. Dans le cas de l'analyse fréquentielle une linéarisation de la réponse du sol est effectuée.*
- *Ces points sont développés dans les § 8.5; 8.6; 8.7; 8.9 et en tenant compte des derniers développements connus dans l'industrie (y compris projet PISA).*

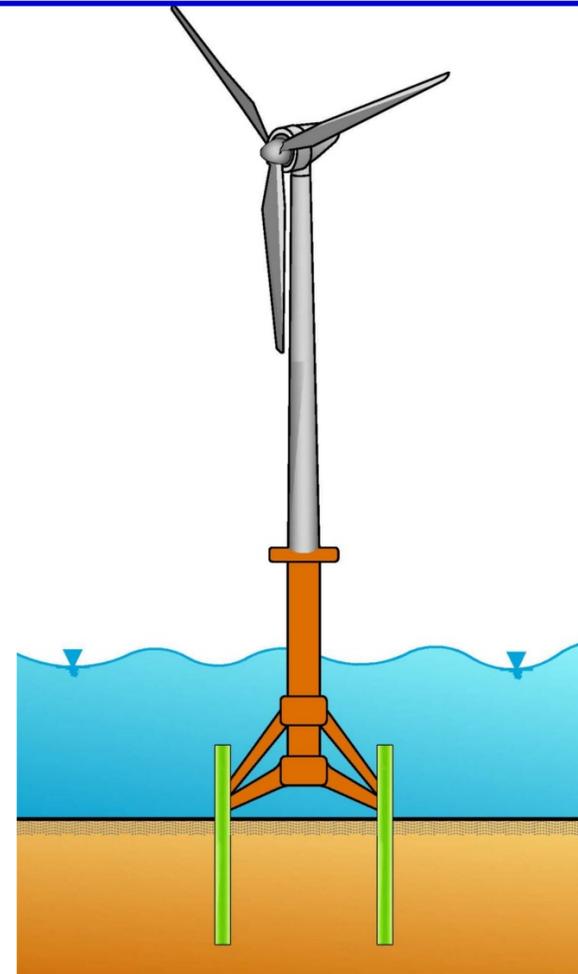
LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

✓ Chapitre 9 : Fondations sur pieux

Jacket support d'éolienne



Support d'éolienne de type tripode



LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

✓ Chapitre 9 : Fondations sur pieux

Dans la très grande majorité des cas, les pieux sont **des tubes métalliques battus** dans des sols ou des roches tendres et d'élançement supérieur à 10. L'ingénierie des pieux métalliques battus dans les sols conventionnels (sables siliceux, argiles, roches tendres) est largement documentée dans les codes relevant des industries offshore.

➔ § 9.3 Pieux métalliques battus

Le recours à des pieux forés peut être requis dans des roches dures. Il s'agira le plus souvent de pieux forés et cimentés selon la technique mise en œuvre dans les travaux offshore.

LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

✓ Chapitre 9 : Fondations sur pieux

Mais il pourra être envisagé de réaliser le pieu selon la technique mise en œuvre dans les travaux terrestres : **pieu foré en béton armé coulé en place**. L'ancrage des pieux forés dans la roche pourra être de faible élancement (inférieur à 5).

L'ingénierie des pieux forés n'est que marginalement évoquée dans les codes offshore et fait appel à des références en travaux terrestres.

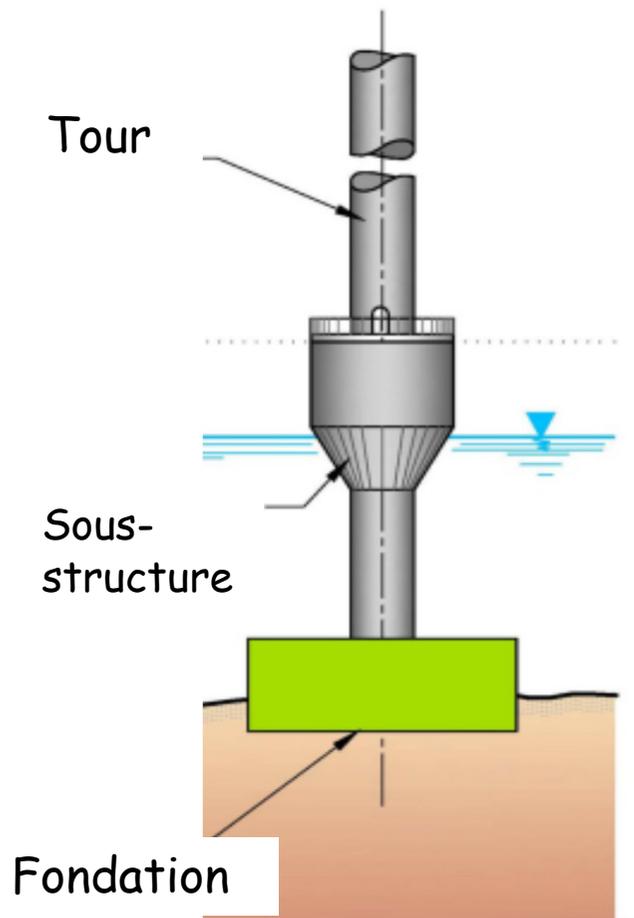


§ 9.4 Pieux forés

La norme française NF P 94-262 fournit des paramètres de dimensionnement, pour les pieux forés simples ou à la boue dans les craies, les marnes et calcaires marneux, les roches altérées ou fragmentées d'origine calcaire, schisteuse ou granitique, déduits d'essais au pressiomètre Ménard ou au CPT.

LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

✓ Chapitre 10 : Dimensionnement des fondations gravitaires



La stabilité est assurée par leur poids propre et celui des éléments supportés.
Le radier, base de la fondation, est généralement de forme circulaire, pleine ou annulaire.

Le diamètre du radier est de 20 à 35 m.

La fondation gravitaire peut être équipée de jupes relativement courtes (< 3 m) pénétrant dans le sol et offrant une protection contre l'affouillement ou les effets d'érosion par pompage.

Les critères à vérifier pour le dimensionnement géotechnique sont : l'ELU, l'ELS et l'ELF.

LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

✓ Chapitre 10 : Dimensionnement des fondations gravitaires

Les ELS s'intéressent aux déformations permanentes ou temporaires au regard des critères d'exploitation de l'éolienne. Les critères de dimensionnement sont : le tassement total moyen, les tassements différentiels, les rotations permanentes.

Le critère de rotation admissible au niveau de la turbine, imposé par le fabricant, est très sévère : $0,5^\circ$ dont $0,25^\circ$ réservés aux tolérances d'installation .

Un critère complémentaire de dimensionnement s'applique sur le taux minimum de surface comprimée (§ 10.5).

LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

✓ Chapitre 10 : Dimensionnement des fondations gravitaires

Surface comprimée minimale (§ 10.5).

- Pour le niveau de charge LDD 10^{-2} : ne peut être dépassé que pendant 1% de la durée de vie de la structure (soit 1750 heures en 20 ans); à évaluer selon DNVGL-ST-0437 et à partir des DLC 1.2 et 6.4.

la surface d'appui de la fondation doit être entièrement comprimée.

- Pour la charge caractéristique extrême : **décollement de la semelle acceptable limité à 50% de la surface comprimée.**

[= DNVGL-ST-0126 § 7.5.5.4 (2016)]

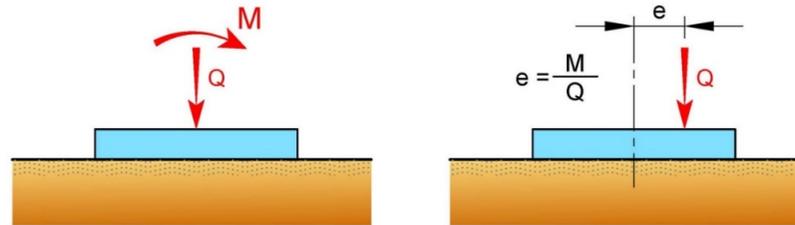
LDD = Load Duration Distribution (Distribution de la durée de la charge)

LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

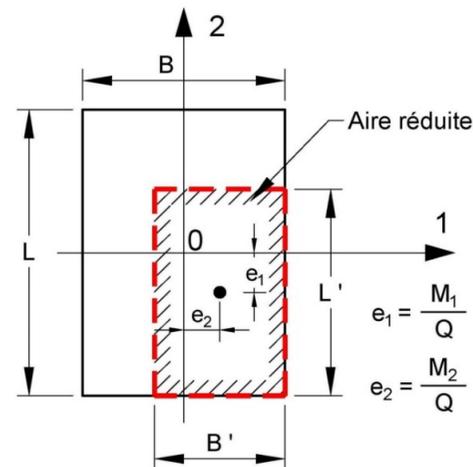
✓ Chapitre 10 : Dimensionnement des fondations gravitaires

Il est également nécessaire de définir la notion de surface effective :

- Pour des fondations rectangulaires (méthode dite de Meyerhof)

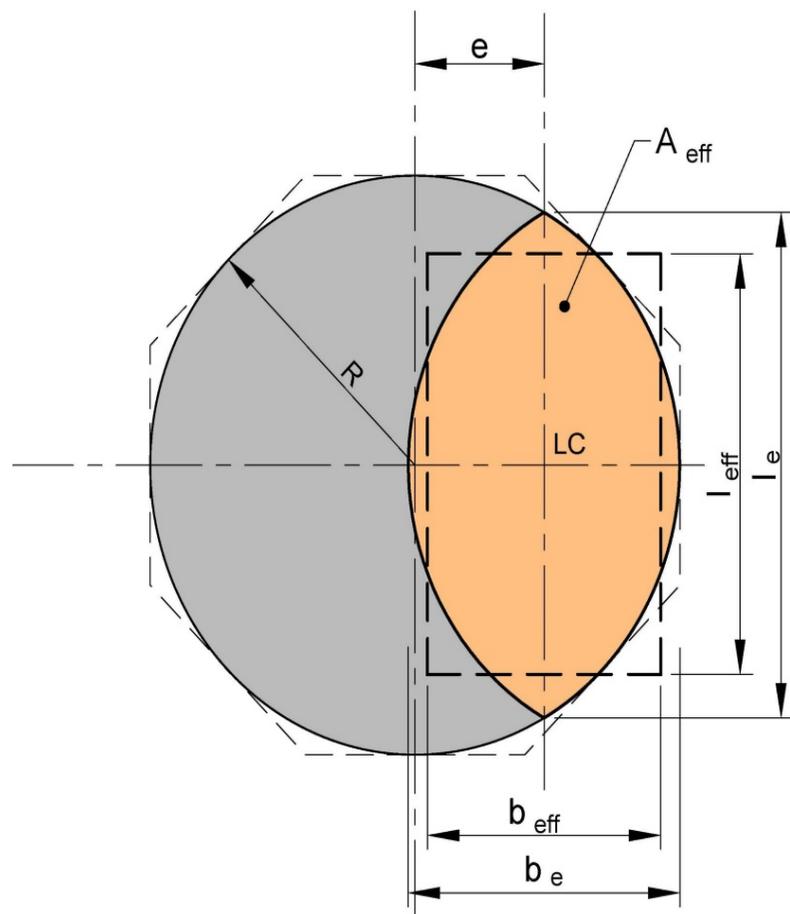


Chargement équivalent



LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

✓ Chapitre 10 : Dimensionnement des fondations gravitaires



Une fondation circulaire soumise à un moment de renversement peut-être représentée par une aire rectangulaire déterminée selon le modèle de **la lunule**.
RFG n° 138-139 (2012) et
DNVGL-ST-0126 (2016).

En annexe B ont été proposées des adaptations pour des embases annulaires.

Sur des sols de bonnes caractéristiques mécaniques, la prise en compte de l'anneau peut constituer une alternative économique à l'augmentation du diamètre extérieur pour respecter les critères de surface comprimée minimum.

LES POINTS FORTS DES RECOMMANDATIONS

✓ Chapitre 10 : Dimensionnement des fondations gravitaires

L'effet des charges cycliques doit être pris en compte :

- **Aux ELU** : l'accumulation de pressions interstitielles et/ou de déformations sous la fondation peut générer une diminution de la résistance du sol;
- **Aux ELS** : les cycles sont susceptibles de générer une accumulation des déformations permanentes et une modification des modules de déformation;
- **Aux ELF** : les cycles affectent la valeur des modules de déformation.

REMERCIEMENTS

- ✓ Au **CFMS** d'avoir accepté la création de ce Groupe de Travail
- ✓ À tous les membres du Groupe de Travail
- ✓ À l'**Animateur** et à la **Coordination de rédaction**
- ✓ Aux **Entreprises, Sociétés, Bureau d'études, Organismes** et à leurs dirigeants de nous avoir permis de passer beaucoup de temps dans nos nombreuses réunions.
- ✓ À **EDF-EN; Fugro; Technip; Terrasol** d'avoir mis à notre disposition des salles pour nos réunions.
- ✓ À **Marc Anic Antic** de **Terrasol** pour l'excellence des figures et dessins de nos **Recommandations**.

Merci de votre attention

