

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

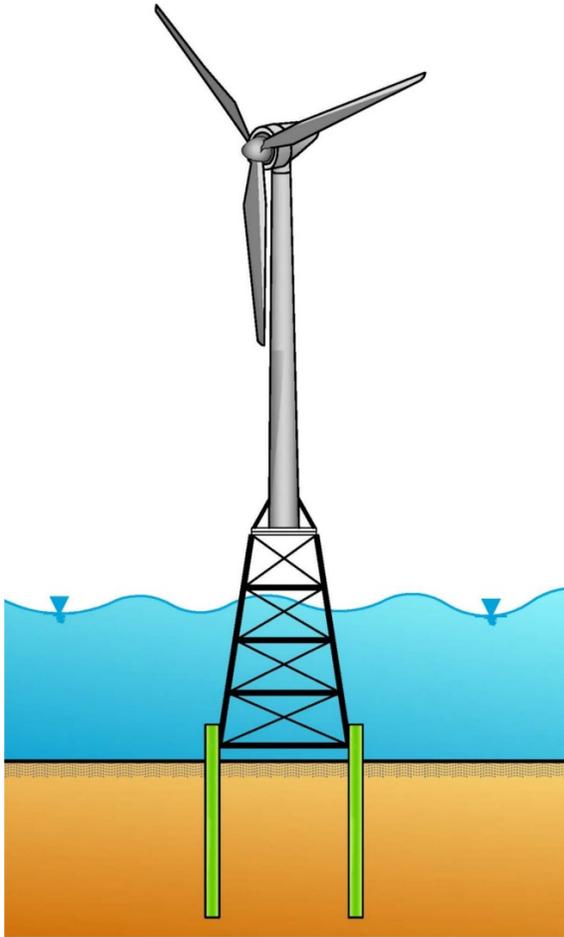


Sécurité des pieux battus et forés adaptée au contexte français

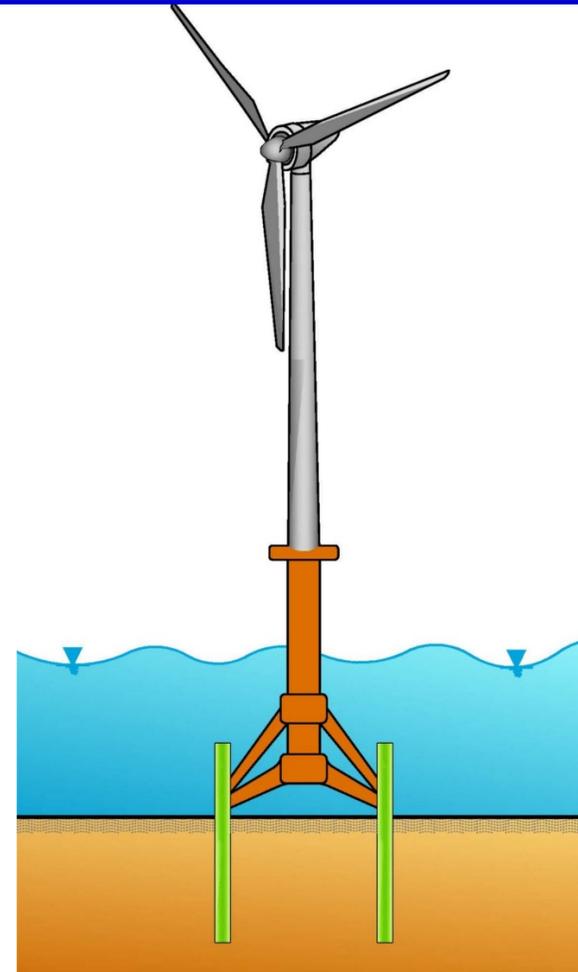
P. BERTHELOT

FONDITIONS SUR PIEUX : LES POINTS FORTS

Jacket support d'éolienne



Support d'éolienne de type tripode



FONDATIIONS SUR PIEUX : LES POINTS FORTS

Dans la très grande majorité des cas, les pieux sont **des tubes métalliques battus** dans des sols ou des roches tendres *et d'élanacement supérieur à 10.*

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

Il pourra être par ailleurs 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 élanacement (inférieur à 5).

FONDATIONS SUR PIEUX : LES POINTS FORTS

Cette dichotomie se reflète dans l'organisation
du **Chapitre 9 Fondations sur pieux** qui distingue donc :

- Le cas des **Pieux métalliques battus § 9.3** avec un fort retour d'expérience de l'industrie offshore et pour des sols dits conventionnels : *sables siliceux et argiles*
- Le cas des **Pieux forés § 9.4** dans les terrains du contexte géologique français : *craies, marnes et marno-calcaire, roches altérées et fragmentées d'origine calcaire, schisteuse ou granitique* **pour lesquels on peut s'adosser à une base de données d'essais statiques de pieux terrestres testés en compression et en traction couvrant une large de gamme de types de pieux et de types de sols.**

FONDATIONS SUR PIEUX : LES POINTS FORTS

Les analyses de fiabilité effectuées à partir de cette base de données montrent que le facteur partiel de résistance (calculs ELU) dépend du type de pieux (foré simple; foré tubé; foré boue / battu ouvert; battu fermé), du type de sollicitations (compression / traction) **et surtout du type de sols et roches.**

Nous avons donc introduit, **pour les pieux forés mais aussi pour les pieux métalliques battus**, en complément du facteur partiel de résistance nommé **Y_{R0}** :

- 1 facteur partiel de modèle fonction du type de matériau (sols / roches) **Y_{R1}** ;
- 1 facteur partiel de modèle fonction du sens de sollicitation (compression / traction) **Y_{R2}** ;

FONDATIONS SUR PIEUX : LES POINTS FORTS

Pour les vérifications sous chargement axial en conditions ELU

Le facteur partiel de résistance Y_R s'exprime donc par :

$$Y_R = Y_{R0} \cdot Y_{R1} \cdot Y_{R2}$$

- Avec $Y_{R0} = 1,25$ le coefficient recommandé par **DNVGL-ST-0126 (2016)**, justifié par le calcul de fiabilité des **structures offshore** (et pour des sols conventionnels : *sables siliceux et argiles*)
- Avec Y_{R1} et Y_{R2} ajustés de manière à garantir un niveau de fiabilité des pieux forés offshore similaire au niveau de fiabilité imposé pour **les pieux forés terrestres** (bien mis en évidence par l'exploitation de la base de données)

FONDATIONS SUR PIEUX : LES POINTS FORTS

Pour les vérifications sous chargement axial en conditions ELU

On vérifiera que :

$$\text{Condition statique : } S_d < R_{ds2}$$

$$\text{Condition cyclique : } S_d < R_{dc}$$

$$\text{avec : } R_{ds2} = R_{ks2} / \gamma_R \quad R_{dc} = R_{kc} / \gamma_R$$

S_d : la sollicitation de calcul

R_{ks1} : la résistance statique caractéristique issue du calcul de la capacité axiale

R_{ks2} : la résistance maximale caractéristique issue du calcul en déplacement

$$R_{ks2} \leq R_{ks1}$$

R_{kc} : la résistance cyclique pour l'évènement dimensionnant. La résistance cyclique est obtenue à partir de la résistance statique par prise en compte de la dégradation due aux cycles

$$R_{kc} \leq R_{ks1}$$

FONDATIONS SUR PIEUX : LES POINTS FORTS

Pour les vérifications sous chargement axial en conditions ELU

PIEUX METALLIQUES BATTUS OUVERTS

Type de sol	γ_{R0}	γ_{R1}	Compression γ_{R2}	Traction γ_{R2}
Sables siliceux	1,25	1,00	1,00	1,10*
Argiles	1,25	1,00	1,00	1,10*
Sables carbonatés et calcarénites	1,25	1,20*	1,00	1,25*
Craies	1,25	1,20*	1,00	1,25*

Ainsi, **et comme recommandé par DNVGL-ST-0126 (2016)**, pour la vérification de la **capacité axiale en compression de pieux tubulaires battus dans des sols conventionnels (sables siliceux et argiles)**, le facteur de pondération vaut

$$\gamma_R = \gamma_{R0} \cdot \gamma_{R1} \cdot \gamma_{R2} = 1,25 \times 1,00 \times 1,00 = 1,25$$

En traction on aura

$$\gamma_R = \gamma_{R0} \cdot \gamma_{R1} \cdot \gamma_{R2} = 1,25 \times 1,00 \times 1,10 \approx 1,40$$

FONDATIONS SUR PIEUX : LES POINTS FORTS

Pour les vérifications sous chargement axial en conditions ELU

PIEUX METALLIQUES BATTUS OUVERTS

Type de sol	γ_{R0}	γ_{R1}	Compression γ_{R2}	Traction γ_{R2}
Sables siliceux	1,25	1,00	1,00	1,10*
Argiles	1,25	1,00	1,00	1,10*
Sables carbonatés et calcarénites	1,25	1,20*	1,00	1,25*
Craies	1,25	1,20*	1,00	1,25*

Pour les **craies** et les **matériaux carbonatés (sables et calcarénites)** et **en l'absence d'essais de pieux dédiés** pour la vérification de la **capacité axiale en compression de pieux tubulaires battus**, le facteur de pondération vaut

$$\gamma_R = \gamma_{R0} \cdot \gamma_{R1} \cdot \gamma_{R2} = 1,25 \times 1,20 \times 1,00 = 1,50$$

En traction on aura

$$\gamma_R = \gamma_{R0} \cdot \gamma_{R1} \cdot \gamma_{R2} = 1,25 \times 1,20 \times 1,25 = 1,88$$

FONDITIONS SUR PIEUX : LES POINTS FORTS

Pour les vérifications sous chargement axial en conditions ELU

PIEUX FORES

Type de sol	γ_{R0}	γ_{R1}	Compression γ_{R2}	Traction γ_{R2}
Sables siliceux	1,25	1,10	1,00	1,25*
Argiles	1,25	1,10	1,00	1,25*
Sables carbonatés et calcarénites	1,25	1,30*	1,00	1,25*
Craies	1,25	1,30*	1,00	1,25*
Autres roches	1,25	1,10	1,00	1,25*

Pour assurer la compatibilité des approches offshore et terrestre et en complément de la valeur du DNVGL-ST-0126 (2016) $\gamma_{R0} = 1,25$, pour la vérification de la capacité axiale en compression de pieux forés dans des sols conventionnels (sables siliceux et argiles), le facteur de pondération vaut

$$\gamma_R = \gamma_{R0} \cdot \gamma_{R1} \cdot \gamma_{R2} = 1,25 \times 1,10 \times 1,00 \approx 1,40$$

En traction on aura

$$\gamma_R = \gamma_{R0} \cdot \gamma_{R1} \cdot \gamma_{R2} = 1,25 \times 1,10 \times 1,25 = 1,72$$

FONDITIONS SUR PIEUX : LES POINTS FORTS

Pour les vérifications sous chargement axial en conditions ELU

PIEUX FORES

Type de sol	γ_{R0}	γ_{R1}	Compression γ_{R2}	Traction γ_{R2}
Sables siliceux	1,25	1,10	1,00	1,25*
Argiles	1,25	1,10	1,00	1,25*
Sables carbonatés et calcarénites	1,25	1,30*	1,00	1,25*
Craies	1,25	1,30*	1,00	1,25*
Autres roches	1,25	1,10	1,00	1,25*

Pour les **craies et les matériaux carbonatés (sables et calcarénites)** et **en l'absence d'essais de pieux dédiés** pour la vérification de la **capacité axiale en compression de pieux forés**, le facteur de pondération vaut

$$Y_R = Y_{R0} \cdot Y_{R1} \cdot Y_{R2} = 1,25 \times 1,30 \times 1,00 \approx 1,60$$

En traction on aura

$$Y_R = Y_{R0} \cdot Y_{R1} \cdot Y_{R2} = 1,25 \times 1,30 \times 1,25 \approx 2,00$$

Chargement cyclique

- Les normes et règlements actuellement en vigueur tant dans le domaine offshore que dans le domaine terrestre stigmatisent l'effet potentiellement néfaste des chargements cycliques sur la capacité des pieux (dégradation du frottement) et sur leur performance (perte de raideur). **En revanche ils ne proposent pas à ce jour de procédure claire pour prendre ces effets en compte de manière pratique.**
- Les recommandations SOLCYP (2017) présentent une synthèse complète des données actuellement disponibles sur le comportement des pieux sous chargements cycliques et proposent une méthode originale basée sur la détermination de lois de dégradation à partir d'essais de cisaillement sol-sol ou d'interface, notamment de type **CNS (Cisaillement à Rigidité Normale Constante)**.
- Elle est développée pour les sols conventionnels (sables et argiles). Pour les craies par exemple des adaptations et ajustements seront menés suite aux résultats des projets en cours (ALPACA)

FONDATIONS SUR PIEUX : LES POINTS FORTS

Chargement cyclique

- Une attention particulière doit être portée au rôle joué par la **capacité en pointe** lorsque celle-ci est significative.
- La dégradation du frottement provoque certes un report des charges sur la pointe mais au prix de déplacements importants du pieu, la mobilisation de l'effort de pointe se faisant pour des déplacements d'ordre pluri-centimétrique à décimétrique. **La raideur axiale du pieu en est grandement affectée.**

Il est donc recommandé dans le processus d'estimation de l'effet des charges cycliques :

- soit de ne prendre conservativement en compte que la capacité en frottement axial ;
- soit de limiter la part de capacité en pointe du pieu à une fraction compatible avec les déplacements admissibles du pieu en termes de raideur. Cette fraction devra être justifiée **et n'excèdera pas 20% de la capacité ultime en pointe.**

Merci de votre attention

