



Journée parrainée par



Vérifications et Sécurité

Alain Puech (Fugro)

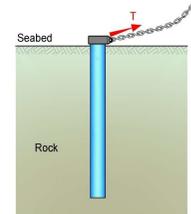
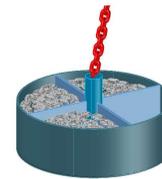
ANCRAGES DES ÉOLIENNES FLOTTANTES
14 MARS 2024

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

Sommaire

- Philosophie de la sécurité
- Charges de Projet
- Vérifications pour le calcul des ancres – Général
- Vérifications pour les ancres à succion
- Vérifications pour les ancres gravitaires
- Vérifications pour les ancres draguées (DEAs)
- Vérifications pour les pieux d’ancrage
- Comparaison entre structures flottantes éoliennes et pétrolières



Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

Philosophie de la Sécurité (1)

- Ces recommandations s'appliquent aux éoliennes flottantes **non-habitées** sous conditions environnementales extrêmes. Pas de risques de pertes de vies humaines. La rupture d'une ligne d'ancrage, d'un tendon ou d'un point d'ancrage ne doit pas provoquer **de risque de collision avec une structure adjacente** et d'impact environnemental qui pourrait en résulter.
- Le niveau de sécurité cible pour le dimensionnement des structures et du système de maintien en station est une **probabilité nominale annuelle de rupture de 10^{-4}** .

Etats Limites:

ULS (*ELU*): Ultimate Limit State
SLS (*ELS*): Service Limit State

ALS (*ELA*): Accidental Limit State
[FLS (*ELF*): Fatigue Limit State]

LRFD: Load and Resistance Factor Design $S_d < R_d$ $S_d = \gamma_F \cdot S_k$ $R_d = R_k / \gamma_M$

S_d : design load
(*charge de projet*)

S_k : characteristic load
(*charge caractéristique*)

γ_F : load factor
(*facteur de charge*)

R_d : design resistance
(*résistance de projet*)

R_k : characteristic resistance
(*résistance caractéristique*)

γ_M : material or resistance factor
(*facteur de matériau ou de résistance*)

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Philosophie de la Sécurité (2)

- Ces recommandations sont centrées sur le calcul et la sécurité des **points d’ancrage**.
- Pas d’effet significatif de la raideur de la fondation sur la réponse du système d’ancrage pour les **ancrages caténaux, semi-tendus/tendus** (vérifié). En pratique les charges sont calculées en supposant la fixité du point de connexion : **pas d’interaction ancre-ligne d’ancrage**.
- *Pour les **TLPs** la réponse des tendons peut, dans certains cas, être affectée par la raideur de la fondation: impact non-négligeable sur les charges d’ancrage et les fréquences de résonance. Analyses supplémentaires requises pour vérifier la sensibilité de la réponse de l’ancrage à la raideur de la fondation.*
- Les ancres peuvent donc être le plus généralement considérées comme des **structures géotechniques indépendantes** soumises aux charges statiques et dynamiques appliquées par les lignes d’ancrages. Les **principes d’ingénierie géotechnique applicables** sont décrits dans les Recommandations (Chapitres 8 à 12)
- Cependant, **du point de vue de la sécurité, chaque ancre doit être considérée comme faisant partie du système de maintien en station**: la rupture d’un point d’ancrage ou d’une ligne d’ancrage ont des conséquences similaires.

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

Philosophie de la Sécurité (3)

Le système de maintien en station peut être de type:

***caténaire ou semi-tendu/tendu**: il est composé de chaîne, câble d'acier ou fibre synthétique;

***TLP**: ancrage par tendons.

Le système de maintien en station a pour fonction de:

* ULS: maintenir la turbine en position de manière à assurer la production et fourniture de l'électricité, mais aussi

* ALS: **empêcher toute collision avec une structure voisine sous conditions environnementales extrêmes et en cas de rupture d'une ligne d'ancrage /tendon.**

Redondance: *“ability of a component or system to maintain or restore its function after a failure of a member or connection has occurred” (DNV)*

Lignes d'ancrage	Point d'ancrage
<p>R vs NR : nombre et arrangement des lignes. Demande des analyses spécifiques.</p>	<p>R: les groupes de pieux peuvent avoir une redondance interne.</p> <p>R : rupture ductile (ex: les ancres draguées, ancres à succion, ancres gravitaires peuvent accepter de grands déplacements horizontaux sans perdre leur capacité et peuvent être considérées comme des points d'ancrage caténaux avec redondance).</p> <p>NR : rupture fragile (ex: pieu unique en tension)</p>

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Philosophie de la Sécurité (4)

➤ L'approche suivante a été adoptée

- Le dimensionnement des **systèmes d'ancrage redondants** (lignes d'ancrage caténares et semi-tendues/tendues et tendons de TLPs) est effectué selon DNV ST 119 (2021) avec les facteurs de charges correspondant à la Consequence Class 1 (non-habité);

Le dimensionnement des **systèmes d'ancrage non-redondants** est effectué selon DNV ST 119 (2021) avec les facteurs de charges majorés correspondant à la Consequence Class 2.

- Le **dimensionnement géotechnique des points d'ancrage** est effectué:

- * en appliquant aux ancrages les charges caractéristiques calculées aux points de connexion pondérées par les **facteurs de charge des systèmes redondants.**

- * ce sont les **facteurs de résistance** qui reflèteront le niveau de redondance correspondant au type d'ancre et au mode de chargement.

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

Charges de projet:

Turbine et flotteur

34 Design Load Cases (DLC) sont identifiés dans IEC 61400-3-1 (2019).

9 DLC additionnels pour les systèmes flottants sont introduits par IEC 61400-3-2 (2019) et DNV-ST-0119 (2021).

Système de maintien en station

Dimensionnement des lignes pour ancrages caténaux ou semi-tendus/tendus

La tension de projet T_d dans une ligne d'ancrage est la somme de deux composantes caractéristiques pondérées: $T_{c,mean}$ and $T_{c,dyn}$:

$$T_d = \gamma_{mean} \cdot T_{c,mean} + \gamma_{dyn} \cdot T_{c,dyn}$$

$T_{c,mean}$ = tension caractéristique moyenne

$T_{c,dyn}$ = tension caractéristique dynamique

γ_{mean} = facteur de charge pour la composante moyenne

γ_{dyn} = facteur de charge pour la composante dynamique

$T_{c,mean}$: partie moyenne de la tension causée par la prétension et par la moyenne des forces statiques environnementales dues au vent, au courant et à la dérive du support.

$T_{c,dyn}$: partie dynamique (cyclique) de la tension due aux effets oscillatoires des vagues et des phénomènes basse fréquence.

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Charges de projet (2):

Dimensionnement des lignes pour ancrages caténares ou semi-tendus/tendus

Les tensions caractéristiques moyennes et dynamiques sont établies à partir de séries temporelles de réponse des tensions dans les lignes.

Les cas ULS critiques pour le calcul des lignes sont généralement trouvés pour les conditions environnementales avec des périodes retour de 50 ans lorsque la turbine est à l'arrêt (**parked condition**, DLC 6.x) ou en fonctionnement maximal (**maximum turbine thrust**, DLC 1.6).

Table 7.1: Partial load factors for mooring lines

Load factor γ_F	ULS		ALS	
	Characteristic mean tension	Characteristic dynamic tension	Characteristic mean tension	Characteristic dynamic tension
Redundant	1.3	1.75	1.0	1.10
Non-redundant	1.5	2.2	1.0	1.25

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

Charges de projet(3):

Dimensionnement des tendons de TLPs

Table 7.2: Partial load factors for tendons
(as per Table 5-1 from DNV-ST-0119, 2021)

G = permanent load
Q = variable functional load
E = environmental load
D = deformation load
P = prestressing load

Load factor set	Limit state	Load categories					
		G	Q	E		D	P
				Consequence class			
1	2						
(a)	ULS	1.25	1.25	0.7 ⁽¹⁾		1.0	0.9/1.1 ⁽³⁾
(b)	ULS	1.0 ⁽²⁾	1.0	1.35	1.55	1.0	0.9/1.1 ⁽³⁾
(c)	ULS for abnormal wind load cases	1.1	1.1	1.1	1.25	1.0	0.9/1.1 ⁽³⁾
(d)	ALS for intact structure	1.0	1.0	1.0	1.15	1.0	1.1 ⁽³⁾
(e)	ALS for damaged structure	1.0	1.0	1.0	1.15	1.0	1.1 ⁽³⁾

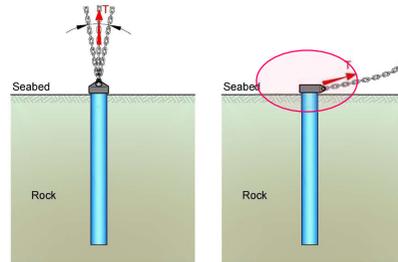
Ancrages des Eoliennes flottantes Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

Charges de projet(4): récapitulation

Les ancrages sont calculés comme des **structures géotechniques indépendantes**.

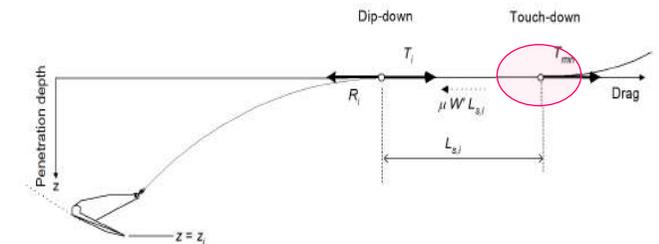
La tension de projet pour le calcul de l'ancre est la tension de projet T_d dans la ligne d'ancrage/le tendon calculée:

- Au **point de connexion** entre la ligne/tendon et l'ancre lorsqu'il est situé au niveau ou au-dessus du fond,



- Au **“touch down point” (TDP)** lorsque le point de connexion est sous le niveau du fond.

Le calcul de l'interaction sol-ligne est traité en Appendice C.



Les facteurs partiels de charges sont les facteurs donnés pour les lignes d'ancrage/tendons des systemes redondants.

Des facteurs de matériau ou de résistance sont recommandés pour chaque type d'ancre qui reflètent le niveau de redondance associé au type d'ancre et à la direction de chargement.

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

► Vérifications pour le dimensionnement des ancres – Général

Les vérifications doivent être effectués pour les conditions statiques et cycliques

► Vérifications sous charges statiques (ou quasi-statiques)

$$S_d \leq R_d$$

Selon la méthode utilisée pour le calcul de R_{ks} , la résistance de projet sera dérivée de la résistance caractéristique:

*Soit en divisant la résistance caractéristique par un **facteur de résistance** γ_R : $R_d = R_{ks} / \gamma_R$

*Soit en appliquant un **facteur de matériau** γ_M sur la résistance caractéristique du matériau σ_d avant calcul de la résistance :

$$R_d = R(\sigma_d) \quad \text{with:} \quad \sigma_d = \sigma_{ks} / \gamma_M$$

L'approche applicable est spécifiée au cas par cas.

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour le dimensionnement des ancres – Général

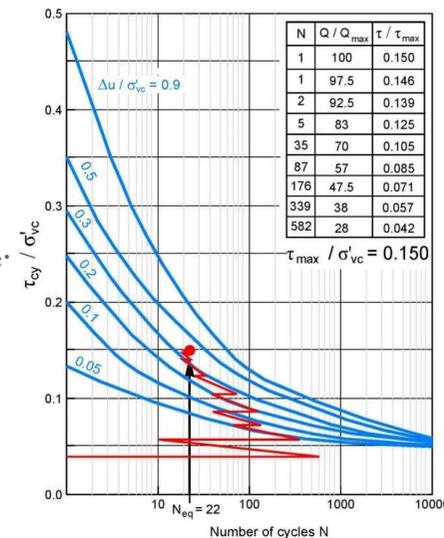
➤ Vérifications sous charges cycliques

Le principe de vérification est similaire à celui recommandé pour les charges statiques mais:

- la résistance caractéristique statique R_{ks} est remplacée par la résistance caractéristique cyclique R_{kc} ou,
- la résistance caractéristique du matériau X_{ks} est remplacée par sa résistance caractéristique cyclique X_{kc} .

Les résistances caractéristiques cycliques (R_{kc} or X_{kc}) sont les résistances “modifiées” correspondant à l'évènement cyclique considéré.

La méthodologie recommandée pour évaluer la résistance cyclique est explicitée dans CFMS (2020) et résumée au **Chapitre 6 et en Appendice F**.



La modification due aux cycles est calculée à partir des charges non-pondérées caractérisant l'évènement cyclique considéré.

Le facteur partiel de résistance γ_R ou de matériau γ_M est appliqué sur la valeur de la résistance cyclique:

$$R_d = R_{kc} / \gamma_R \quad \text{ou}$$

$$R_d = R(X_d) \quad \text{avec: } X_d = X_{kc} / \gamma_M$$

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les ancres à SUCCION

➤ ULS

Resistance factors $\gamma_{R,h}$ and $\gamma_{R,v}$

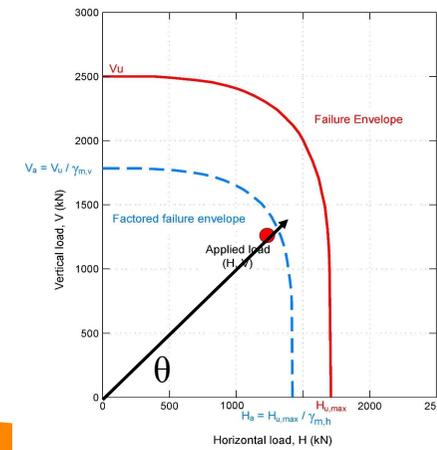
Mooring line configuration	Load component	Station keeping system	
		Redundant	Non redundant
Catenary and semi-taut	Axial, $\gamma_{R,v}$	1.30	1.30
	Lateral, $\gamma_{R,h}$	1.20	1.20
TLPs and taut	Axial, $\gamma_{R,v}$	1.40	1.70
	Lateral, $\gamma_{R,h}$	1.20	1.35

$$R_{ds} = R_{ks} / \gamma_R$$

$$R_{dc} = R_{kc} / \gamma_R$$

Les facteurs de résistance $\gamma_{R,h}$ et $\gamma_{R,v}$ sont différents et s'appliquent séparément sur chaque composante.

Le facteur de résistance γ_R résultant varie entre $\gamma_{R,h}$ et $\gamma_{R,v}$, en fonction de l'angle θ d'application de la force au point de connexion.



Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les ancrs à SUCCION

➤ ULS

Mooring line configuration	Load component	Station keeping system	
		Redundant	Non redundant
Catenary and semi-taut	Axial, $\gamma_{R,v}$	1.30	1.30
	Lateral, $\gamma_{R,h}$	1.20	1.20
TLPs and taut	Axial, $\gamma_{R,v}$	1.40	1.70
	Lateral, $\gamma_{R,h}$	1.20	1.35

Note 1: Facteurs de résistance modérés sur la composante latérale: Les charges environnementales extrêmes peuvent générer de grands déplacements latéraux sans perte significative de la résistance latérale (connexion au point de non-rotation). La résistance résiduelle peut prévenir contre les risques de collision (condition ALS à vérifier).

Note 2: Attention: les **tolérances de mésalignement** sont généralement limitées à +/- 7.5°. La rupture d'une ligne peut entraîner de larges excursions du support et modifier fortement la géométrie de l'ancrage. Vérifier que le dimensionnement structural du point d'attache et la résistance en torsion de l'ancre sont compatibles avec l'hypothèse de redondance.

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les ancrages à SUCCION

➤ ULS

Mooring line configuration	Load component	Station keeping system	
		Redundant	Non redundant
Catenary and semi-taut	Axial, $\gamma_{R,v}$	1.30	1.30
	Lateral, $\gamma_{R,h}$	1.20	1.20
TLPs and taut	Axial, $\gamma_{R,v}$	1.40	1.70
	Lateral, $\gamma_{R,h}$	1.20	1.35

Note 1: Les facteurs de résistance sur la résistance verticale reflètent la sensibilité du système de maintien en station à la rupture verticale du point d'ancrage, notamment dans le cas des TLPs (risque de renversement).

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les ancrages à SUCCION

➤ ALS

Mooring line configuration	Station keeping system	
	Redundant	Non redundant
Catenary and semi-taut TLPs and taut	1.00	1.20

➤ SLS

$$\gamma_M = \gamma_R = 1.0$$

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les ancrages GRAVITAIRES

Static conditions: $S_d < R_{ds}$ $R_{ds} = R_{ks} / \gamma_R$

Cyclic conditions: $S_d < R_{dc}$ $R_{dc} = R_{kc} / \gamma_R$

➤ ULS

* $\gamma_M = 1.10$ applies for weight component

** $\gamma_M = \gamma_R = 1.30$ applies for other components, such as soil-skirts interaction

Failure mode	Station keeping system	
	Redundant	Non redundant
Sliding	1.20	1.20
Bearing capacity	1.30	1.30
Uplift capacity	1.10* and 1.30**	1.10 * and 1.30**

➤ ALS

$\gamma_M = 1.0$

➤ SLS

$\gamma_M = 1.0$

Note 1: Facteurs de résistance modérés sur la composante latérale: Les charges environnementales extrêmes peuvent générer de grands déplacements latéraux sans perte significative de la résistance latérale. La résistance résiduelle peut prévenir contre les risques de collision (condition ALS à vérifier).

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les ancrs draguées (hors VLAs)

➤ Résistance de projet des ancrs draguées (hors VLAs)

R_i : résistance d'installation;

$R_{i,c}$: résistance caractéristique d'installation;

R_d : résistance de projet;

T_i : tension d'installation;

La sécurité provient essentiellement du test d'ancrage lors de l'installation

A la fin du tensionnement la résistance d'installation réellement appliquée est démontrée égale à la résistance cible T_i .

La résistance caractéristique d'installation $R_{i,c}$ peut être assimilée à T_i .

$$R_{i,c} = T_i$$

Dans le cas d'un dimensionnement n'autorisant pas de dragage additionnel, la résistance de projet R_d peut s'écrire:

$$R_d = R_{i,c} + \Delta R_{\text{post}} / \gamma_R = R_{i,c} + (\Delta R_{\text{setup}} + \Delta R_{\text{cyc}} + \Delta R_{\text{fric}}) / \gamma_R$$

Dans le cas d'un dimensionnement autorisant un dragage additionnel, la résistance de projet R_d peut s'écrire:

$$R_d = R_{i,c} + \Delta R_{\text{post}} / \gamma_R = R_{i,c} + (\Delta R_{\text{drag}} + \Delta R_{\text{cyc}} + \Delta R_{\text{fric}}) / \gamma_R$$

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les ancres draguées (hors VLAs)

➤ Facteurs de résistance

➤ ULS Les facteurs de résistance sont appliqués uniquement sur la résistance post-installation.

Anchor type	Station keeping system	
	Redundant	Non redundant
FLUKE anchor	1.20	1.20

Note 1: Les charges environnementales extrêmes peuvent générer de grands déplacements de l'ancre sans perte significative de capacité. La résistance résiduelle peut prévenir contre les risques de collision (condition ALS à vérifier).

Note 2: Attention: les ancres draguées sont très sensibles à la direction de chargement. Un mésalignement supérieur à 20° peut déstabiliser l'ancre (Davidson et al., 2023). La rupture d'une ligne peut entraîner de larges excursions du support et modifier fortement la géométrie de l'ancrage. Vérifier que cette géométrie est compatible avec l'hypothèse de redondance.

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les PIEUX d' ancrage

➤ Chargement axial – pieux battus

- S_d : charge de projet;
- R_{ks1} : résistance caractéristique statique obtenue par des calculs standards de capacité statique à la rupture;
- R_{ks2} : résistance caractéristique maximale obtenue par des calculs en déplacement ($R_{ks2} \leq R_{ks1}$);
- R_{kc} : résistance caractéristique cyclique pour l'évènement cyclique de projet. La résistance cyclique est obtenue en considérant la dégradation possible due au chargement cyclique ($R_{kc} \leq R_{ks1}$).

➤ Qu'est R_{ks2} ?

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les PIEUX d' ancrage

➤ Chargement axial – pieux battus

➤ R_{ks2}

R_{ks2} est la capacité statique obtenue par intégration des courbes t-z le long du pieu.

Pour des pieux flexibles et en présence de sols radoucissants:

$$R_{ks2} < R_{ks1}$$

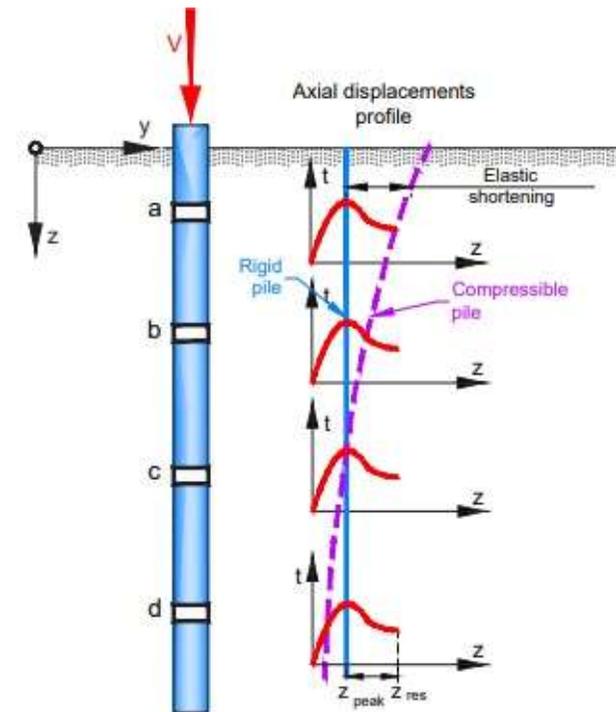


Figure 9.8: Softening of the axial friction and resulting axial flexibility of the pile

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les PIEUX d' ancrage

➤ Chargement axial – pieux battus

Condition Statique : $S_d < R_{ds2}$

Condition Cyclique : $S_d < R_{dc}$

avec:

$$R_{ds2} = R_{ks2} / \gamma_R$$

$$R_{dc} = R_{kc} / \gamma_R$$

Le facteur partiel de résistance γ_R s'exprime par : $\gamma_R = \gamma_{R0} \cdot \gamma_{R1} \cdot \gamma_{R2} \cdot \gamma_{R3}$ avec:

γ_{R0} : facteur partiel de résistance tel que défini et recommandé par DNV-ST-0119 (2021);

γ_{R1} : facteur partiel de modèle, fonction du type de sol;

γ_{R2} : facteur partiel de modèle, fonction de la capacité du système sol-pieu à générer de la résistance résiduelle;

γ_{R3} : facteur partiel de modèle, prenant en compte le risque de fluage et la capacité du système de fondation à redistribuer les charges (redondance interne).

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les PIEUX d'ancrage

- Chargement axial – pieux battus
- ULS

γ_{R0} :

En se basant sur les nombreuses études de fiabilité et le retour d'expérience sur les plates-formes flottantes pétrolières, le facteur $\gamma_{R0} = 1.3$ recommandé par DNV-ST-0119 est considéré comme parfaitement justifié pour les pieux battus dans les sols conventionnels tels que sables siliceux et argiles.

OPEN-ENDED DRIVEN ANCHOR PILES				
Type of soil	γ_{R0}	γ_{R1}	γ_{R2}	Permanent Tension (TLPs and taut moorings) γ_{R3}
Siliceous sands	1.30	1.00	1.00	1.00 to 1.30****
Clays :				
○ Normally consolidated, ductile failure	1.30	1.00	1.00	1.10** to 1.30****
○ Overconsolidated, brittle failure	1.30	1.00	1.10	1.10** to 1.30****
Carbonate sands and calcarenites:				
○ Permanent tension (Taut mooring)	N/A	N/A	N/A	N/A
○ Other applications	1.30	1.20	1.10	N/A
Chalks:	1.30	1.20*	1.10*	1.10** to 1.30****

Le facteur partiel de résistance ne doit jamais être inférieur à γ_{R0}

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les PIEUX d'ancrage

- Chargement axial – pieux battus
- ULS

γ_{R1} :

Sables carbonatés et les calcarénites:

L'utilisation de pieux battus sous tension permanente n'est pas acceptée.

Autres applications: $\gamma_{R1} = 1.2$

Craies: $\gamma_{R1} = 1.2$

Possibilité de réduction si essais de pieux ou application de la méthode ALPACA.

OPEN-ENDED DRIVEN ANCHOR PILES				
Type of soil	γ_{R0}	γ_{R1}	γ_{R2}	Permanent Tension (TLPs and taut moorings) γ_{R3}
Siliceous sands	1.30	1.00	1.00	1.00 to 1.30****
Clays :				
○ Normally consolidated, ductile failure	1.30	1.00	1.00	1.10** to 1.30****
○ Overconsolidated, brittle failure	1.30	1.00	1.10	1.10** to 1.30****
Carbonate sands and calcarenites:				
○ Permanent tension (Taut mooring)	N/A	N/A	N/A	N/A
○ Other applications	1.30	1.20	1.10	N/A
Chalks:	1.30	1.20*	1.10*	1.10** to 1.30****

Le facteur partiel de résistance ne doit jamais être inférieur à γ_{R0}

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les PIEUX d'ancrage

- Chargement axial – pieux battus
- ULS

γ_{R2} :

Le facteur partiel γ_{R2} est associé au risque de rupture fragile et à la capacité du système sol-pieu à générer de la résistance résiduelle. Une valeur $\gamma_{R2}=1.1$ est recommandée pour les craies, les sables carbonatés, les calcarénites et les argiles fortement suconsolidées.

OPEN-ENDED DRIVEN ANCHOR PILES				
Type of soil	γ_{R0}	γ_{R1}	γ_{R2}	Permanent Tension (TLPs and taut moorings) γ_{R3}
Siliceous sands	1.30	1.00	1.00	1.00 to 1.30***
Clays :				
○ Normally consolidated, ductile failure	1.30	1.00	1.00	1.10** to 1.30***
○ Overconsolidated, brittle failure	1.30	1.00	1.10	1.10** to 1.30***
Carbonate sands and calcarenites:				
○ Permanent tension (Taut mooring)	N/A	N/A	N/A	N/A
○ Other applications	1.30	1.20	1.10	N/A
Chalks:	1.30	1.20*	1.10*	1.10** to 1.30***

Le facteur partiel de résistance ne doit jamais être inférieur à γ_{R0}

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les PIEUX d'ancrage

- Chargement axial – pieux battus
- ULS

γ_{R3}

Le facteur partiel γ_{R3} est introduit pour les **pieux sous tension permanente (TLPs and taut moorings)**. Il prend en compte le risque de fluage et la capacité du système de fondation à redistribuer les charges d'un pieu défailant dans un groupe de pieux. Un pieu individuel n'a pas de capacité de redistribution. La redondance d'un groupe de pieux est fonction du nombre de pieux et de la rigidité de la structure de liaison.

La plage de valeurs recommandées pour γ_{R3} est de 1.0 à 1.3.

Voir commentaires de l'API RP2T (2010).

OPEN-ENDED DRIVEN ANCHOR PILES				
Type of soil	γ_{R0}	γ_{R1}	γ_{R2}	Permanent Tension (TLPs and taut moorings) γ_{R3}
Siliceous sands	1.30	1.00	1.00	1.00 to 1.30***
Clays :				
○ Normally consolidated, ductile failure	1.30	1.00	1.00	1.10** to 1.30***
○ Overconsolidated, brittle failure	1.30	1.00	1.10	1.10** to 1.30***
Carbonate sands and calcarenites:				
○ Permanent tension (Taut mooring)	N/A	N/A	N/A	N/A
○ Other applications	1.30	1.20	1.10	N/A
Chalks:	1.30	1.20*	1.10*	1.10** to 1.30***

Le facteur partiel de résistance ne doit jamais être inférieur à γ_{R0}

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les PIEUX d' ancrage

➤ Chargement axial – pieux battus

➤ ALS $\gamma_R = 1.00$

➤ SLS $\gamma_M = 1.00$

Pour les TLPs et les ancrages tendus, vérifier:

- les déplacements sous tension permanente;
- les effets de la raideur des pieux sur la réponse du système d'ancrage en conditions cycliques (interaction ancre-ligne).

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour les PIEUX d' ancrage

➤ Chargement latéral – pieux battus

➤ Intégrité structurale du pieu

Pour les conditions ULS/ALS, le pieu doit être vérifié comme un **élément structurel** suivant DNV-ST-126 (2021); les facteurs de charge sont différents pour les systèmes de maintien en station redondants et non-redondants (Table 7.1 et Table 7.2).

Les déformations du pieu sont calculées en appliquant un facteur partiel de matériau égal à 1.0 ($\gamma_M = 1.00$).

Les moments et les contraintes dans le pieu sont déduits des règles de la résistance des matériaux. On doit vérifier que les combinaisons des contraintes de flexion et de tension satisfont les critères de la section 13 de l' ISO 19902 (2020).

➤ **Déplacements acceptables:** il n'y a pas de critères réglementaires pour les pieux d'ancrage.

On recommande pour les déplacements relatifs en tête de pieu:

- argiles molles: < 10%
- argiles raides < 5% (risque d'ovalisation; décollement sol-pieu; érosion par lessivage)
- rocher : critères plus sévères (risque de rupture de coins)

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

► Vérifications pour PIEUX d’ancrage – Pieux forés et cimentés

Approche similaire à celle des pieux battus- Ne sera détaillée

► ULS

Le facteur partiel de résistance γ_R ne sera jamais inférieur à la valeur proposée par DNV-ST-0126 (2021):

$$\gamma_{R0} = 1.30.$$

Comme pour les pieux battus, on a **introduit des facteurs de modèle γ_{R1} , γ_{R2} , γ_{R3}** . **Les valeurs recommandées permettent d’assurer une compatibilité en termes de fiabilité entre les fondations offshore et terrestres.** **L’expérience française des fondations terrestres** sur les pieux forés (NF P 94-262, 2012) appuyée sur les études de fiabilité menées sur la banque de données mentionnée dans la section 9.4.2.1 du CFMS (2020) montre en effet que ce facteur peut être insuffisant pour couvrir toutes les incertitudes liées au calcul et à l’exécution de ce type de fondations.

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Vérifications pour PIEUX d’ancrage – Pieux forés et cimentés

➤ ULS

DRILLED AND GROUTED PILES				
Type of soil	γ_{R0}	γ_{R1}	γ_{R2}	Permanent Tension (TLPs and taut moorings) γ_{R3}
Medium to high strength clays and marls	1.30	1.10	1.10	1.10 to 1.30
Cemented carbonate sands, calcarenites,	1.30	1.20*	1.10	1.10 to 1.30**
Chalks	1.30	1.20*	1.10	1.10 to 1.30**
Other rocks	1.30	1.10	1.10	1.10 to 1.30**

*these factors can be lowered under particular justifications

**depending on load redistribution capability of foundation system

Ancrages des Eoliennes flottantes

Recommandations CFMS – Sécurité et Vérifications

➤ Sécurité des structures flottantes éoliennes et pétrolières

➤ Les valeurs des facteurs de résistance/matériau proposées dans ces Recommandations sont consistantes avec celles proposées dans les documents normatifs de l'industrie pétrolière. On a considéré que le niveau de confiance dans la caractérisation des sols (reconnaissance) et la dérivation de leurs propriétés était similaire pour les deux industries.

➤ On observe cependant que la **“Sécurité Globale” des éoliennes flottantes non-habitées est sensiblement similaire à celle des structures flottantes pétrolières habitées.** L'explication réside dans les facteurs de charge qui sont plus élevés dans l'éolien flottant.

FOWT -DNV ST 119 Consequence Class	ULS	
	Characteristic mean tension	Characteristic dynamic tension
CC1 # unmanned	1.3	1.75
CC2 # manned	1.5	2.2

➤ Un “Joint Industry Project” vient d'être lancé par DNV en Juin 2023 sur la Fiabilité des Eoliennes Flottantes. On peut penser que, dans un futur proche, les progrès dans les méthodes de calcul et les retours d'expérience permettront de gagner en confiance sur les estimations de charges des éoliennes flottantes.