



Journée parrainée par



# Présentation générale des Recommandations CFMS pour les fondations des ancrages d'éoliennes flottantes

## Françoise Ropers (Terrasol)

ANCRAGES DES ÉOLIENNES FLOTTANTES  
14 MARS 2024

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Présentation des recommandations et de leurs points forts

**"Recommendations for planning and designing anchor foundations of floating wind turbines "**

**« Recommandations pour la conception et le dimensionnement des fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes »**

**Groupe de Travail CFMS « Fondations d'éoliennes flottantes »**

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Présentation des recommandations et de leurs points forts

### Sommaire de la présentation

- A - Introduction
- B - Le document
- C - Les annexes
- D – Les intervenants
- E – Le texte
- F – Les principes des recommandations
- G – Les points forts des recommandations
- H - Remerciements

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Présentation des recommandations et de leurs points forts

### Introduction

#### Publications précédentes

- 2011 : Publication CFMS de recommandations pour les fondations d'éoliennes terrestres
- 2019 : Publication CFMS de recommandations pour les fondations d'éoliennes offshore fixes (version 2.0 en français)
- 2020 : Publication CFMS de recommandations pour les fondations d'éoliennes offshore fixes (version 2.1 en anglais)

#### Historique

- 26/09/2019 : réunion de lancement d'un groupe miroir du TC209 « Géotechnique offshore » de la SISMG
- 07/02/2020 : réunion constitutive du groupe de travail CFMS « Recommandations pour la conception et le dimensionnement des fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes »
- 2020-2023 : Rédaction des chapitres par différents sous-groupes, et réunions par visio-conférences
- 12/10/2023 : document complet soumis à la relecture des membres de la commission technique du CFMS et du groupe de travail
- Août à novembre 2023 : relecture par deux locuteurs anglophones
- **14/03/2024** : journée de restitution
- 2<sup>nd</sup> trimestre 2024: document finalisé, mis en ligne sur le site du CFMS

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Présentation des recommandations

### Le document

- Version 1.0 du 24/02/2024, comportant 300 pages
- Rédaction en anglais
- Edition selon la charte graphique du CFMS programmée avant l'été 2024
- Format pdf, mis en ligne sur le site du CFMS [www.cfms-sols.org](http://www.cfms-sols.org) le xx/xx/2024



Working Group "Foundations of Floating Wind Turbines"

### Recommendations for planning and designing anchor foundations of floating wind turbines



Recommendations for planning and designing anchor foundations of floating wind turbines  
Version 1.0 – 24 February 2024 Page 1

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Présentation des recommandations

### Les intervenants

- **Groupe de travail** : 49 membres
- **Président** : Alain Puech (*Consultant Fugro France*)
- **Coordinateurs de la rédaction** : Alain Puech ; Françoise Ropers (*Consultante Terrasol*)
- **Relecteurs anglophones** : Lloyd Miller (*Fugro France*) ; Way Way Moinet (*Fugro France*)
- **Graphiste** : Marc Anic-Antic (*Terrasol*)
- **Maîtres d'ouvrage** : EDF-Re ; SHELL EOLFI ; Skyborne Renewables ; Total Energies
- **BET Géotechnique** : Antea Group ; Cathie Group ; Fugro ; GeoZ Consulting ; Terrasol
- **BET** : Doris Engineering ; Phi Conseil ; Principia ; SOFRESIS Engineering ; Technip Energies ; WPD Offshore
- **Entreprises** : Bourbon Subsea Services ; BW IDEOL ; Chantiers de l'Atlantique ; Naval Energies ; SAIPEM ; SBM Offshore ; Subsea7
- **Bureaux de contrôle** : Bureau Veritas Construction
- **Institutionnels** : CEREMA ; France Energies Marines ; SINTEF Ocean ; Université Gustave Eiffel ; Université de Nantes

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Présentation des recommandations

### Le texte

- **Avant-propos**
- **Chapitre 1** : Introduction
- **Chapitre 2** : Référentiels
- **Chapitre 3** : Conditions de site
- **Chapitre 4** : Charges et sollicitations
- **Chapitre 5** : Etudes de terrain
- **Chapitre 6** : Paramètres de sol et profils de dimensionnement
- **Chapitre 7** : Sollicitations et vérifications
- **Chapitre 8** : Fondations par ancres draguées et ancres plaques
- **Chapitre 9** : Fondations par pieux
- **Chapitre 10** : Fondations par ancres à succion
- **Chapitre 11** : Fondations gravitaires
- **Chapitre 12** : Affouillement et mobilité sédimentaire

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Présentation des recommandations

### Les annexes

- **Annexe A** : Analyse fréquentielles
- **Annexe B** : Tableau des charges
- **Annexe C** : Interaction entre le sol et la ligne d'ancrage
- **Annexe D** : Prédiction de la trajectoire d'une ancre draguée dans l'argile
- **Annexe E** : Effets de la cicatrisation- Considérations générales
- **Annexe F** : Effets du chargement cyclique - Considérations générales
- **Annexe G** : Effets de la vitesse de chargement et du fluage dans les argiles
- **Annexe H** : Pieux installés dynamiquement



# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Présentation des recommandations

### Les principes des recommandations

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

IEC 61400 [NF EN 61400]  
DNV –ST-0119 ; DNV-ST-0126 ; DNV-ST-0145 ; DNV-ST-0437 ; API

- Elles font ponctuellement références à d'autres documents normatifs: **ABS, ISO, API**
- Elles tentent d'apporter une certaine harmonisation entre les différentes approches, en mettant l'accent sur la notion de sécurité, en particulier dans le cas de pieux ou ancres à succion, lorsque la composante verticale des efforts est toujours en tension

ABS : American Bureau of Shipping  
API : American Petroleum Institute  
DNV : Det Norske Veritas  
IEC : International Electrotechnical Commission

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Présentation des recommandations

### Les principes des recommandations

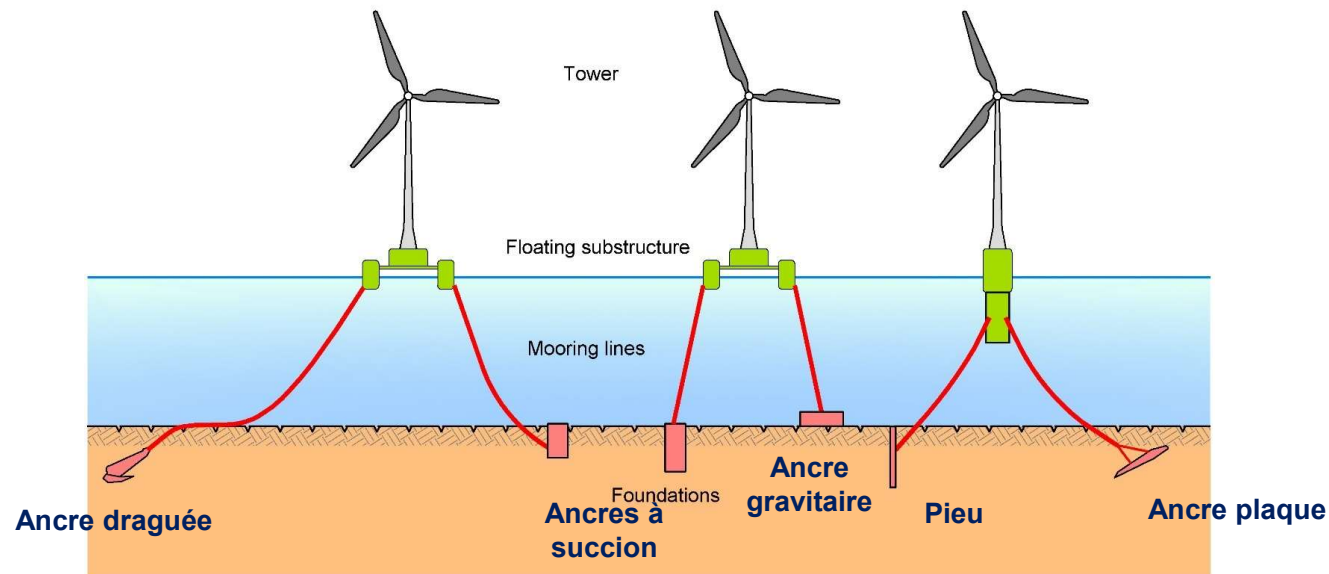
- ▶ Elles ont pour vocation de pallier l'absence de documents normatifs ou de textes réglementaires **nationaux** concernant la conception et la réalisation des **fondations** des ouvrages offshore dans les eaux territoriales françaises
- ▶ Elles présentent en un seul document les principaux modes de fondation des lignes d'ancrage, et leur fonctionnement
- ▶ Elles couvrent les types de sols spécifiques rencontrés sur le plateau continental français (craies, marnes, calcarénites,...)
- ▶ Elles traitent de manière détaillée le cas des pieux forés et scellés dans ces types de sol
- ▶ Elles introduisent la possibilité de l'utilisation future des acquis des projets ALPACA et ALPACA+ (pieux battus dans la craie)
- ▶ Elles intègrent les apports du projet SOLCYP concernant les chargements cycliques, en particulier pour les pieux

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Présentation des recommandations

### Les principes des recommandations

- ▶ Elles ne traitent que des fondations d'éoliennes flottantes **inhabitées**
- ▶ Le cas des ancres **mutualisées** (ancre partagée par plusieurs éoliennes) n'est pas traité
- ▶ Elles ne traitent que les principaux types de fondations (4 grandes familles)
- ▶ La fondation est la structure en contact avec le sol, y compris la ligne d'ancrage



# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Présentation des recommandations

**D'où 4 grands chapitres dédiés aux méthodologies de dimensionnement :**

- **Chapitre 8 : Fondations par ancres draguées et ancres plaques (39 pages)**
- **Chapitre 9 : Fondations par pieux (39 pages)**
- **Chapitre 10 : Fondations par ancres à suction (23 pages)**
- **Chapitre 11 : Fondations gravitaires (18 pages)**

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Présentation des recommandations

**Complétés par :**

**2 chapitres dédiés au calcul des charges, sollicitations et vérifications**

- **Chapitre 4 : Charges et cas de charge (19 pages)**
- **Chapitre 7 : Sollicitations et vérifications (8 pages)**

**3 chapitres dédiés à la caractérisation géotechnique**

- **Chapitre 5 : Etudes de terrain (38 pages)**
- **Chapitre 6 : Paramètres de sol et profils de dimensionnement (15 pages)**
- **Chapitre 12 : Affouillement et mobilité sédimentaire (17 pages)**

**6 annexes dédiées aux divers mécanisme mis en jeu lors de l'installation et de la mise en service des ancrs**

- **Annexe C : Interaction entre le sol et la ligne d'ancrage**
- **Annexe D : Prédiction de la trajectoire d'une ancre draguée dans l'argile**
- **Annexe E : Effets de la cicatrisation - Considérations générales**
- **Annexe F : Effets du chargement cyclique - Considérations générales**
- **Annexe G : Effets de la vitesse de chargement et du fluage dans les argiles**
- **Annexe H : Pieux installés dynamiquement**

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

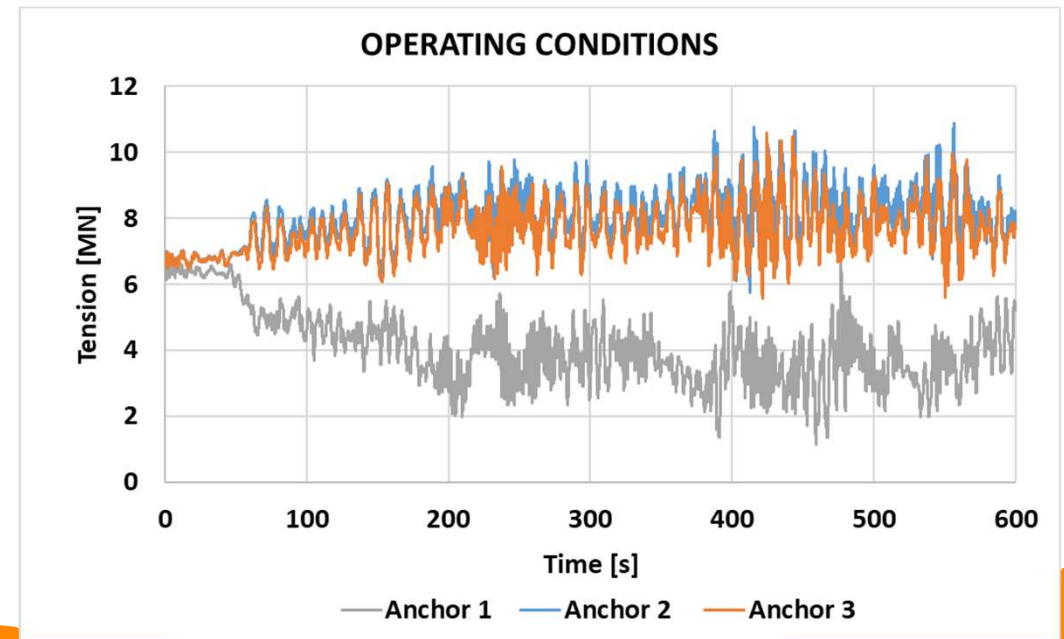
## Les points forts des recommandations

### Chapitre 4 (Charges et cas de charges)

- Met l'accent sur le caractère des charges décomposées en
  - une composante moyenne incluant la prétention de la ligne après mise en place, et les charges statiques dues au vent et au courant
  - une composante dynamique due aux actions des vagues et aux oscillations basse fréquence du flotteur, transmises par la ligne d'ancrage

Exemple d'efforts transmis au point de connexion de la ligne et de l'ancre – Réponse calculée pour une éolienne flottante en fonctionnement, avec 3 lignes d'ancrage tendues

- Traitement des charges cycliques suivant les recommandations du projet SOLCYP (2017)

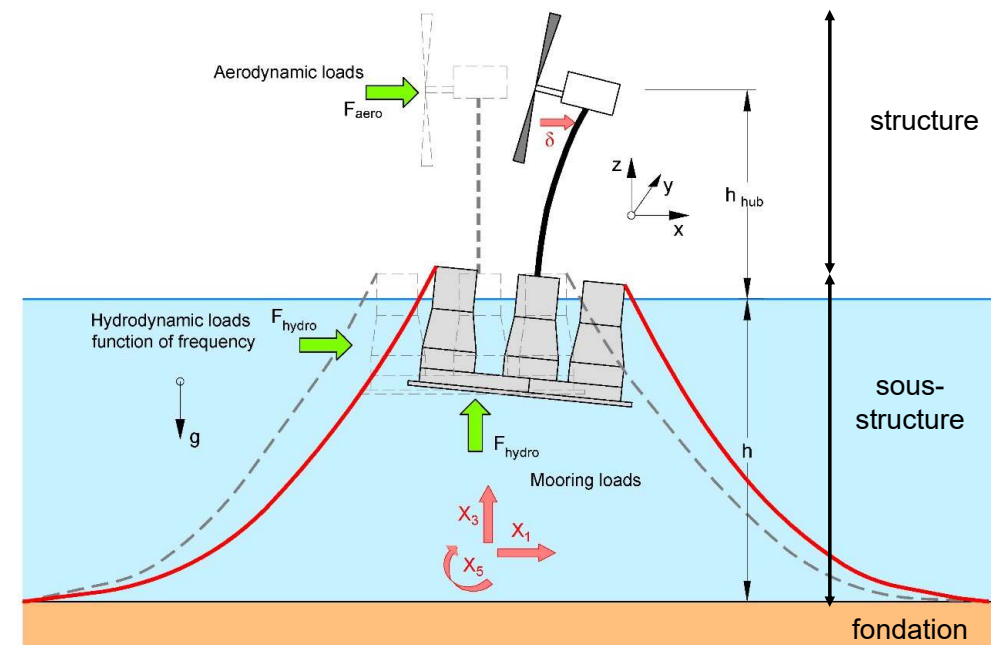


# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Les points forts des recommandations

### Chapitre 4 (Charges et cas de charges)

- Le calcul des charges résulte de la réponse dynamique globale de la structure, des interactions entre la sous-structure et l'éolienne, et entre le sol et la fondation
- Caractéristiques du flotteur et des lignes d'ancrages ou des tendons = principaux paramètres affectant la réponse dynamique globale
- En pratique, **l'interaction sol-structure** en termes de raideur et amortissement a une **influence négligeable** sur le dimensionnement de la structure, du fait de la présence de la ligne d'ancrage
- Les TLPs (Tension Leg Platform) sont potentiellement plus impactées
- Modélisation du sol nettement moins critique que pour les éoliennes fixes
- Calcul préliminaire des charges fait à partir d'un modèle aéro-servo-hydrodynamique, le point d'ancrage étant considéré fixe
- Vérification de la fondation faite séparément (méthode découplée) sur la base des efforts calculés dans le modèle précédent
- Si nécessaire, rebouclage avec prise en compte de l'interaction sol-structure



# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Les points forts des recommandations

### Chapitres 5 et 6

- **Les études de terrain (Chapitre 5) se déroulent tout au long du projet, et conditionnent très en amont le choix du mode de fondation du projet**
  - reprises en grande partie des Recommandations CFMS (2020)
  - avec adaptations aux fondations traitées dans le document actuel
- **Le chapitre 6 (Paramètres de sol et profils de dimensionnement) insiste sur les paramètres géotechniques nécessaires au dimensionnement des fondations, et présente les valeurs caractéristiques à utiliser suivant les types de fondation et de sollicitation**

Valeur caractéristique	Désignation	Quantile (%)
Estimation la plus basse <i>Lower Estimate</i>	LE	0 - 10
Estimation prudente <i>Conservative Estimate</i>	CE	25 - 45
Meilleure estimation <i>Best Estimate</i>	BE	50
Estimation optimiste <i>Lower Estimate</i>	OE	55 - 75
Estimation la plus haute <i>Optimistic Estimate</i>	HE	90 - 100



# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Les points forts des recommandations

### Chapitre 6 (Paramètres de sol et profils de dimensionnement)

➤ Propose comment utiliser ces valeurs caractéristiques en fonction des paramètres géotechniques => création de trois tableaux

6.1 Valeurs de dimensionnement pour les ancrés dragués

6.2 Valeurs de dimensionnement pour les pieux et les ancrés à succion (reproduit ci-dessous)

6.3 Valeurs de dimensionnement pour les ancrés gravitaires

	Limit state	Shear strength: $s_u$ , $\phi'$ , $q_t$ <sup>(1)</sup>	Unconfined compressive strength of rocks: $\sigma_c$ (with or without a mass factor)	Soil-pile friction: $\delta_{cv}$	Deformation moduli: $G_0$ , $G(\gamma)$ or $E_0$ , $E(\epsilon)$ , (with or without a mass factor in rocks)	$\epsilon_{50}$	$n$ $K_0$
<b>Axial capacity</b>							
Skin friction	ULS	CE	CE	CE			BE
<b>Lateral reaction</b>							
Design of piles(structural)	ULS	CE	CE		CE	BE	BE
Displacements in service	SLS	CE	CE		CE	BE	BE
<b>Anchor stiffness at lug</b>							
Reference		BE	BE	BE	BE	BE	BE
Sensitivity analysis <sup>(2)</sup>		CE, OE	CE, OE	CE, OE	CE, OE	BE	BE
<b>Installation</b>							
Most probable conditions		BE	BE	BE			BE
Most unfavourable conditions <sup>(3)</sup>		HE	HE	HE			HE

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Les points forts des recommandations

### Chapitre 7 (Sollicitations et vérifications)

- Méthode des coefficients partiels (LRFD)
- Prise en compte de la notion de redondance pour le choix des coefficients partiels sur les charges et sur les matériaux/résistances selon DNV-ST-0119 (2021)
- Coefficients partiels de charge  $\gamma_f$  différents appliqués aux charges moyennes et aux charges cycliques
- Coefficients partiels  $\gamma_M$  appliqués aux caractéristiques des matériaux ou  $\gamma_R$  à la résistance de la fondation explicités pour chaque type de fondation dans les chapitres 8 à 12
- Les valeurs de  $\gamma_M$  et  $\gamma_R$  proposées sont dans la continuité de l'approche de la sécurité développée dans les Recommandations CFMS (2020) pour les éoliennes fixes
- Avec une attention particulière pour les pieux en tension ancrés dans la craie ou les calcarénites

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Les points forts des recommandations

### Chapitre 8 (Ancres draguées et ancres plaques)

- Ancres draguées : type de fondation d'ancrage très répandu, utilisé essentiellement dans les argiles de résistance très faible à moyenne, moins souvent les sables et les argiles de résistance élevée
- L'ancre s'apparente au soc de charrue, mais avec des dimensions plurimétriques et des masses variant entre 5 t et 50 t
- Pénètre dans le sol sous l'effet d'un effort de traction exercé par la ligne d'ancrage lors de l'installation
- Les distances de dragage et les profondeurs atteintes peuvent être très importantes (jusqu'à 100m dans les argiles de très faible résistance)
- Pénétration additionnelle potentielle en phase opérationnelle
- Pénétration et résistance mobilisée très dépendantes du mésalignement entre l'ancre et la ligne pendant l'installation
- Ces ancres peuvent demander des forces importantes à l'installation et lors des épreuves d'essai



# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Les points forts des recommandations

### Chapitre 8 (Ancres draguées et ancres plaques)

➤ Pénétration et résistance mobilisée sont le résultat d'une très forte interaction entre le sol et la ligne d'ancrage (chaîne ou câble)

➤ Interaction sol-ligne d'ancrage décrite et commentée dans l'annexe C

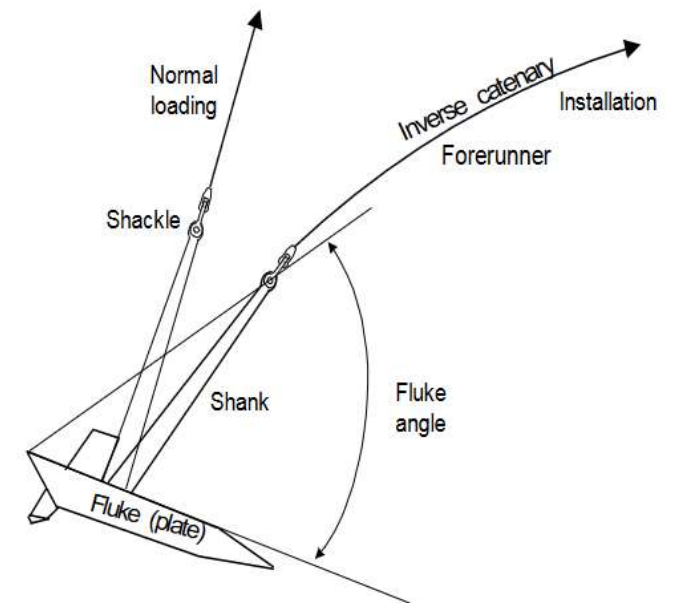
➤ Prédiction de la trajectoire de l'ancre dans l'argile décrite dans l'annexe D

➤ **Prise en compte des influences combinées**

- du remaniement à la mise en place
- de la cicatrisation après mise en place (thixotropie et consolidation, annexe E)
- des chargements cycliques (annexe F)
- de la vitesse de chargement (annexe G)

➤ **Dimensionnement par**

- chartes établies par les constructeurs (base de données propre à chaque constructeur)
- méthodes analytiques
- épreuves d'essai



# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Les points forts des recommandations

### Chapitre 9 (Fondations par pieux)

➤ **Généralement il s'agit de tubes métalliques battus dans des sols ou des roches tendres et d'élancement supérieur à 10**

- Ingénierie des pieux métalliques battus dans des sols conventionnels (sables siliceux, argiles, roches tendres) largement documentée dans les codes relevant des industries offshore
- Moins bien documentées pour les sols comme les craies, ou les calcarénites et sables carbonatés faiblement cimentés

➤ **D'où la section 9.3 dédiée aux pieux battus**

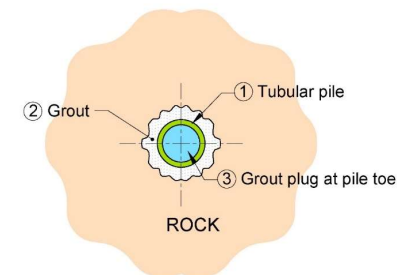
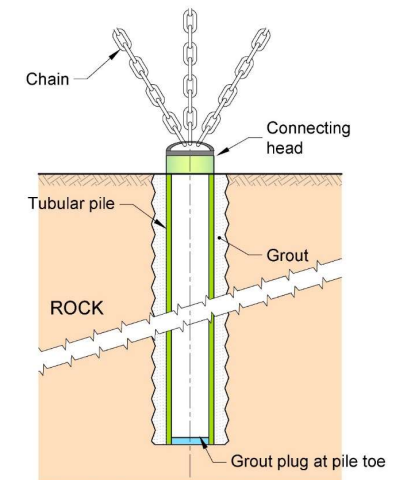
- Explicitant le comportement des pieux dans les différents types de sol
- Introduisant la possibilité de l'utilisation future des acquis des projets ALPACA et ALPACA+ (pieux battus dans la craie, soumis à des chargements cycliques)

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Les points forts des recommandations

### Chapitre 9 (Fondations par pieux)

- Dans les roches dures où le battage est impossible, recours aux pieux forés et cimentés à la roche par injection de coulis suivant la technique offshore
  - Tubes métalliques, pieux plus ou moins longs
  - La méthode des pieux forés coulés en place suivant la méthode terrestre n'est pas applicable dans le contexte des éoliennes flottantes du fait de la profondeur d'eau importante
- D'où la section 9.4 dédiée aux pieux forés et cimentés
  - Explicitant le comportement des pieux, en particulier le comportement latéral

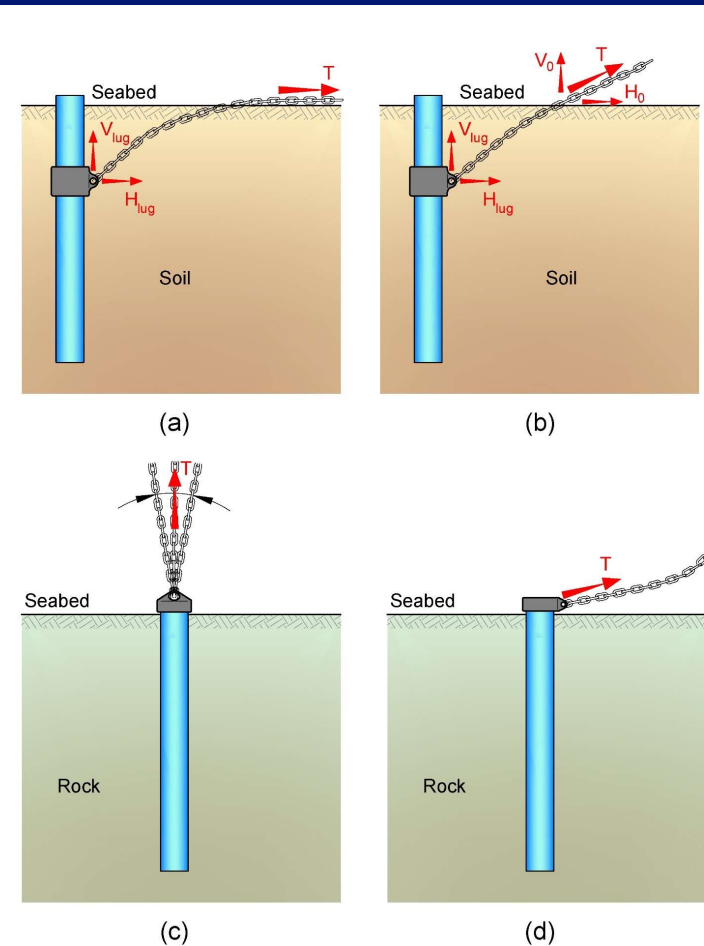


# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Les points forts des recommandations

### Chapitre 9 (Fondations par pieux)

- Les sections 9.3 et 9.4 prennent en compte les diverses configurations possibles de la liaison entre le pieu et la ligne d'ancrage
- Effets du chargement cyclique sur le comportement axial
- Importance de la raideur du massif rocheux sur le comportement axial et latéral des pieux forés et cimentés
- Précautions à prendre lors de l'installation des pieux battus ou forés
- Vibrofonçage: utile pour débiter la mise en place du pieu, mais
  - Non recommandé pour les pieux soumis à des efforts de traction importants
  - A proscrire pour les ancrages tendus



# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Les points forts des recommandations

### Annexe H (Pieux installés dynamiquement, DIP)

- Les DIP (ancres torpilles) sont des hybrides entre les ancres et les pieux
- Mise en place dynamique par chute libre à travers la hauteur d'eau (50m à 100m)
- Profondeur de pénétration pouvant atteindre 20m
- Comportement d'un pieu après mise en place
- Profondeur de pénétration = paramètre primordial pour la capacité d'ancrage
- Prédite par
  - Méthode d'équilibre limite
  - Méthode énergétique



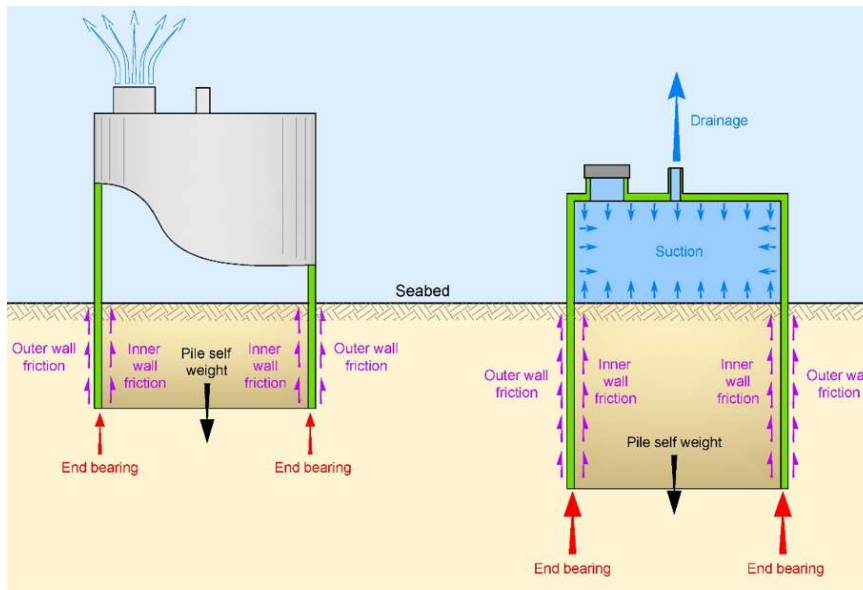


# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Les points forts des recommandations

### Chapitre 10 (Ancres à succion)

- Caissons métalliques de diamètre plurimétrique, ouverts en base, fermés en tête
- Pénétration par poids propre + sous-pression (suction)
- Bien adaptées aux argiles de résistance faible à très faible (nos recommandations sont limitées au cas des argiles)



1 - Self weight penetration

2 - Suction assisted penetration

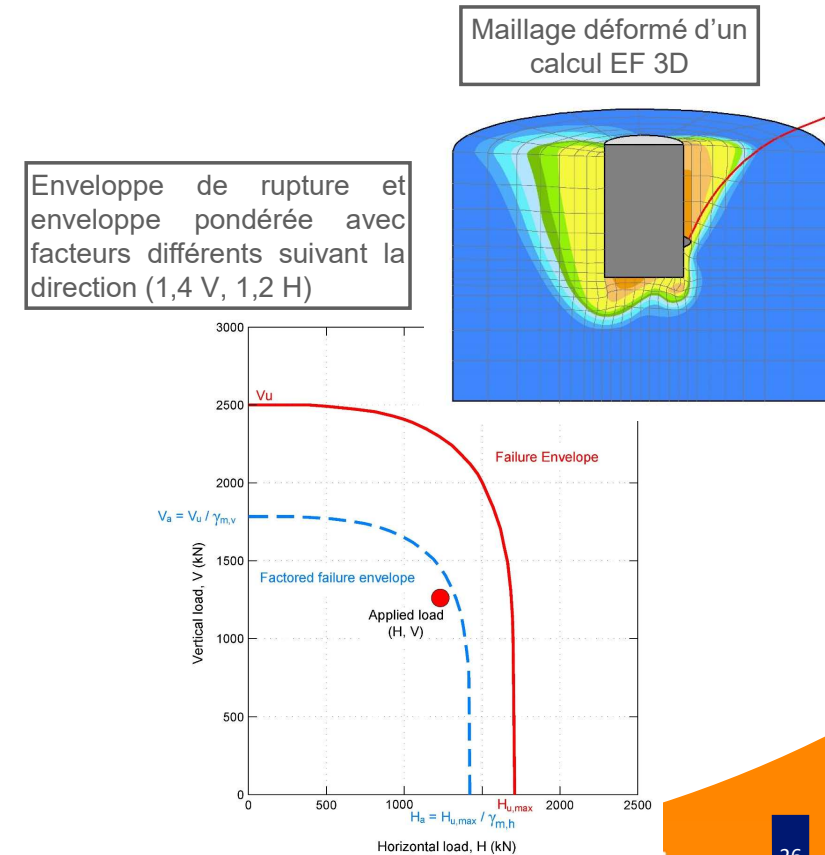


# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Les points forts des recommandations

### Chapitre 10 (Ancres à succion)

- **Capacités axiale et latérale dépendent uniquement du poids propre de la présence ou non d'un bouchon**
  - Sans bouchon, frottement intérieur et extérieur seulement
  - Avec bouchon, frottement extérieur + capacité portante inverse (reverse bearing capacity)
- **Capacité horizontale dépend de la position du point d'attache**
- **Il existe une position optimale de ce point d'attache, pour lequel la composante horizontale de la résistance ultime est maximale et la rotation nulle**
- **Couplage important entre composantes verticale et horizontale**
  - Utilisation de courbes enveloppes de rupture V-H (calculs EF 3D ou expressions analytiques)
- **Influence des chargements cycliques et du fluage sur la capacité de l'ancre**
- **Influence des tolérances d'installation sur la capacité de l'ancre (verticalité, mésalignement avec la ligne d'ancrage)**

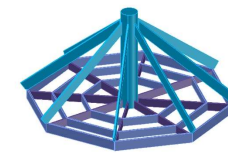


# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

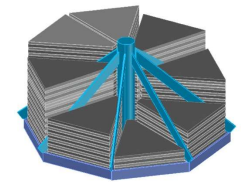
## Les points forts des recommandations

### Chapitre 11 (Ancres gravitaires)

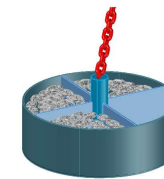
- **Capacités axiale et latérale dépendent essentiellement du poids propre de l'ancre**
  - Pas ou peu de pénétration dans le sol (jupes pour prévenir l'érosion)
  - Contribution des jupes en général négligée
- **Les recommandations CFMS 2024 ne traitent que le cas des fondations rigides (monoblocs)**
- **Capacité verticale au soulèvement limitée au poids propre déjaugé de l'ancre**
- **Résistance au glissement**
- **Effet des charges cycliques sur la résistance du sol (ULS)**
- **Effets des charges cycliques sur les déformations permanentes (SLS)**
- **Surface comprimée: valeurs recommandées**
  - SLS 100% de la surface de la base (aucun décollement)
  - ULS 50% de la surface de la base (et vérification de la capacité portante)



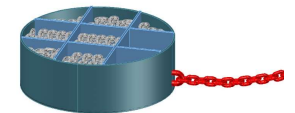
(a)



(b)



(c)



(d)

# Fondations d'ancrages d'éoliennes flottantes

## Remerciements

Au **CFMS** d'avoir accepté la création de ce groupe de travail

A tous les membres du Groupe de Travail

Au Président et à la Coordination de rédaction

Aux Entreprises, Sociétés, Bureaux d'études, Organismes et à leurs dirigeants de nous avoir permis de passer du temps dans nos nombreuses réunions

A EDF-Re et à Terrasol de nous avoir accueillis dans leurs locaux pour nos réunions

Aux relecteurs anglophones **Lloyd Miller** et **Way-Way Moinet** de FUGRO

A **Marc Anic Antic** de Terrasol pour la qualité des figures et dessins de ces Recommandations

# Eoliennes flottantes

## Merci de votre attention

