

PREPARATION DE RECOMMANDATIONS POUR LE DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS D'ÉOLIENNES OFFSHORE

FORTHCOMING RECOMMENDATIONS FOR DESIGNING OFFSHORE WINDFARM FOUNDATIONS

Alain PUECH¹, Patrick BERTHELOT²

1 FugroGeoConsulting, Nanterre, France

2 Bureau Veritas, Aix en Provence, France

RÉSUMÉ — Cette communication donne un aperçu du contenu des futures recommandations françaises pour le dimensionnement des fondations d'éoliennes offshore, en précisant les motivations et en soulignant la philosophie retenue, les spécificités des développements dans les eaux françaises (conditions de sols) et les aspects nécessitant une attention particulière.

ABSTRACT — The paper outlines the content of the forthcoming French recommendations for designing offshore windfarm foundations, with emphasis on motivations, general design philosophy, specificities of developments in French waters (soil conditions) and aspects requiring particular attention.

1. Introduction

Le Groupe de travail « Fondations d'éoliennes » précédemment mis en place par le Comité Français de la Mécanique des Sols et des Fondations (CFMS) a terminé son travail en 2011 par la rédaction de « Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des fondations d'éoliennes ». Ce document est disponible sur le site du CFMS (www.cfms-sols.org)

Il est précisé en introduction que ces Recommandations « s'appliquent aux éoliennes implantées sur le domaine terrestre (éoliennes onshore)... à destination industrielle dont l'axe de rotation du rotor est situé à plus de 12 mètres au-dessus de la plateforme ». L'installation prochaine d'éoliennes dans le domaine maritime (éoliennes offshore), ouvre de nouvelles possibilités mais met bien en lumière la grande diversité de référentiel potentiellement utilisable pour le dimensionnement de ces nouvelles structures.

Suite aux appels d'offres lancés par la puissance publique, quatre champs d'éoliennes offshore sont en cours de développement dans les eaux territoriales françaises pour une puissance totale à installer d'environ 2000 MW et dans des profondeurs d'eau atteignant les 40 m. Deux champs supplémentaires ont été plus récemment attribués pour une capacité d'environ 1000 MW.

Il est désormais important que la communauté scientifique française dispose, dans ce domaine, de recommandations faisant le point entre autres sur les référentiels applicables, les cas de charges et les sollicitations de calcul à considérer, les reconnaissances de sites à réaliser (géologiques, géophysiques et géotechniques), les méthodologies de détermination des paramètres de dimensionnement, et les procédures de dimensionnement applicables aux différents types de fondations.

Le Comité Français de Mécanique des Sols a mis en place début 2013 une commission d'experts pour rédiger des « Recommandations pour la conception et le

dimensionnement des fondations d'éoliennes offshore ». Des intervenants Maîtres d'ouvrage, Bureaux d'études, Entreprises, ont répondu présents et apportent leur expérience, le plus souvent acquise à l'étranger.

2. Objectifs et périmètre du projet

Il n'existe en France aucun document normatif ou de réglementation officielle concernant la conception et la réalisation des fondations des ouvrages offshore dans les eaux territoriales Françaises.

Ces Recommandations élaborées sous l'égide du Comité Français de Mécanique des Sols (CFMS) visent à pallier partiellement cette lacune en traitant spécifiquement des aspects géotechniques liés à la conception et au calcul des fondations des éoliennes offshore. Elles incluent également les aspects géotechniques liés à la conception et au calcul des fondations des sous-stations et des mâts météo ainsi qu'à la conception des routes de câbles présents sur les champs d'éoliennes et reliant le champ à la côte.

Ces Recommandations ne traitent pas des composants caractérisant une éolienne à savoir le mât (ou tour), la sous-structure, la nacelle, les rotors, le générateur. Cependant, dans le cadre du comportement d'interaction sol-structure, le mât (ou tour) et les éléments de sous-structure ou structure support doivent être pris en compte dès la conception.

La figure 1 illustre les différents éléments visés par les Recommandations.

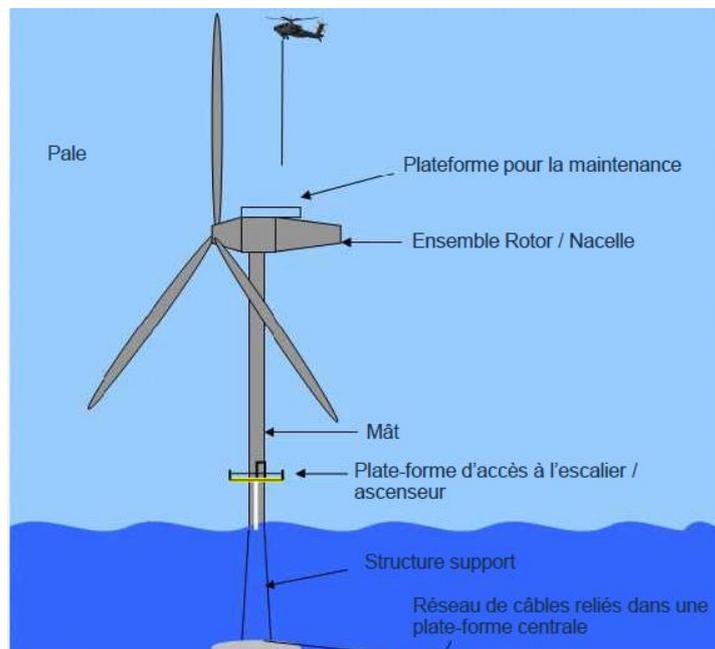


Figure 1. Les différents éléments composants une éolienne offshore (d'après IEC 61 400-3).

Le document en cours de rédaction est organisé en différents chapitres qui s'articulent de la manière suivante :

- Introduction : domaine d'application, définitions et rôle des intervenants, différents types de structures et concept de fondations;

- Référentiel : codes et standards, recommandations professionnelles;
- Conditions de sites : conditions marines, instabilité du fond marin, affouillement;
- Principes de dimensionnement : cas de charges et sollicitations ;
- Etudes de terrain : modèle géotechnique de site, reconnaissance recommandée;
- Dimensionnement : fondations gravitaires (ou sur embase poids), fondations sur pieux de type monopode ou multipodes;
- Annexes.

3. Types de structures et de fondations

Les structures supports des éoliennes offshore et des ouvrages connexes se déclinent suivant plusieurs types génériques qui sont essentiellement (Figure 2) :

- les structures sur pieux (de type monopode ou multipodes) ;
- les structures sur embase-poids ;
- les structures sur fondations semi-profondes ou sur caisson ;
- les structures flottantes avec ancrages.

Des structures supports qualifiées d'hybrides peuvent être utilisées en combinant les différentes configurations précédentes. La hauteur d'eau intervient comme un facteur de choix entre différentes configurations structurales et peut constituer un facteur limitatif.

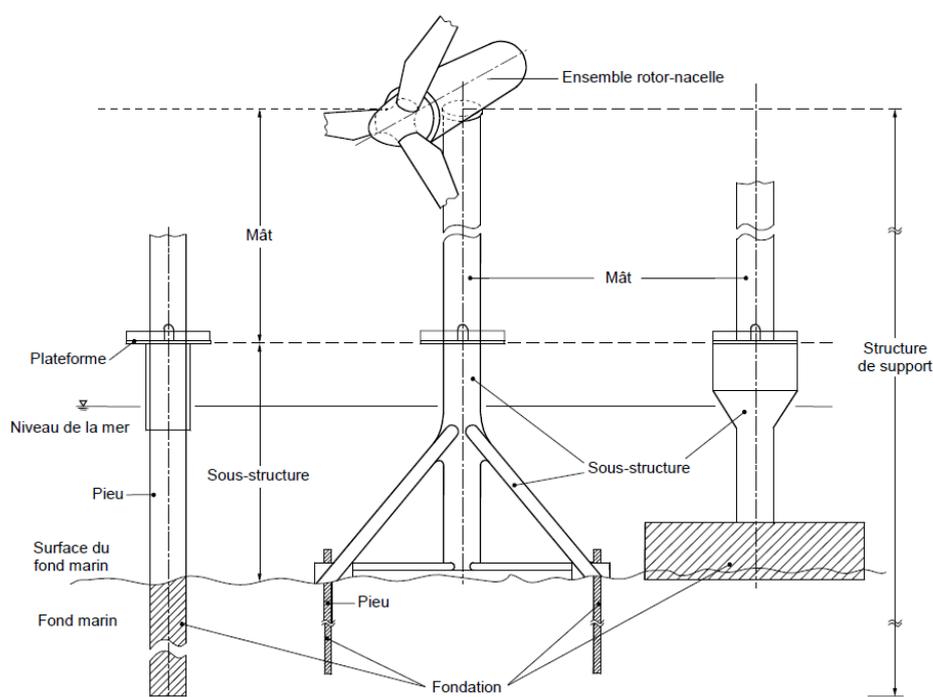


Figure 2. Principaux types de mode de fondation.

Les concepts de fondations les plus utilisés par l'industrie du vent peuvent être classés en fonction de leurs dimensions et configurations, leur méthode d'installation,

leurs matériaux de construction ou encore leur mode de fonctionnement. Les principaux types de fondations sont les suivants :

- *Monopieux* : les monopieux peuvent être vus comme des extensions du fût de l'éolienne dans le sol de fondation. Il s'agit de tubes de grand diamètre (typiquement 4 à 7m) avec des élancements D/B faibles (typiquement 2 à 4). Ils se comportent comme des caissons essentiellement rigides. Leur mise en place est le plus souvent effectuée par battage mais le recours au forage peut être nécessaire dans des matériaux compétents. Ce type de fondation est très répandu.
- *Fondations gravitaires* : il s'agit de fondations superficielles, posées sur une couche de forme ou très légèrement enterrées, pour lesquelles la stabilité est assurée par le poids propre de la structure. Ce type de fondations, de type radier, ont des diamètres importants (souvent de l'ordre d'une trentaine de mètres). Les embases gravitaires peuvent être munies de jupes dont le ratio hauteur de jupe sur diamètre est très faible (<0.1) et dont la contribution à la stabilité et au glissement est négligeable.
- *Fondations sur pieux* : les pieux sont des tubes métalliques de diamètres typiquement compris entre 1.5 et 3m et présentant des élancements supérieurs à 10, de sorte que leur comportement est de type flexible. Les pieux sont utilisés pour fixer des tripodes ou mini-jackets supports d'éoliennes ou comme fondations de jackets supports d'équipements lourds (e.g. sous-stations). Les pieux sont traditionnellement battus. Le recours au forage peut être nécessaire dans les sols très raides ou les roches tendres.
- *Ancrages pour structures flottantes* : Différent types d'ancrages sont utilisés (pieux d'ancrage, ancres dragues de forte capacité, ancres-caissons mises en place par succion,...) selon la nature du sol et du type de système d'ancrage. Le développement des éoliennes flottantes est encore au stade expérimental. Les ancres ne seront pas explicitement couverts par la première édition des Recommandations. Certaines parties du document pourront cependant s'appliquer (études de terrain ; dimensionnement des pieux)

4. Charges et sollicitations

Selon le type de fonctionnement des fondations, les sollicitations sont caractérisées par (Figure 3) :

- des efforts verticaux V en compression ou en traction
- des efforts horizontaux H
- des moments de renversement M
- des moments de torsion T (généralement faibles, non représentés sur la figure 3)

Pour le dimensionnement des structures-supports et des fondations, un grand nombre de cas de charge liés au vent agissant sur le rotor et le mât doivent être considérés, chacun correspondant à une situation particulière de dimensionnement de la turbine. L'IEC 61 400-3 identifie 36 cas de charges. Ces différentes situations de fonctionnement peuvent gouverner le dimensionnement de différents sous-ensembles de la structure et des fondations.

Les principaux critères pris en compte dans la définition des cas de charge incluent :

- une période de retour de 50 ans pour le dimensionnement en ELU ;
- l'ensemble des contributions à la fatigue sur la durée de vie du système en ELF ;
- les conditions anormales associées à de sévères situations de panne de la turbine en ELU.

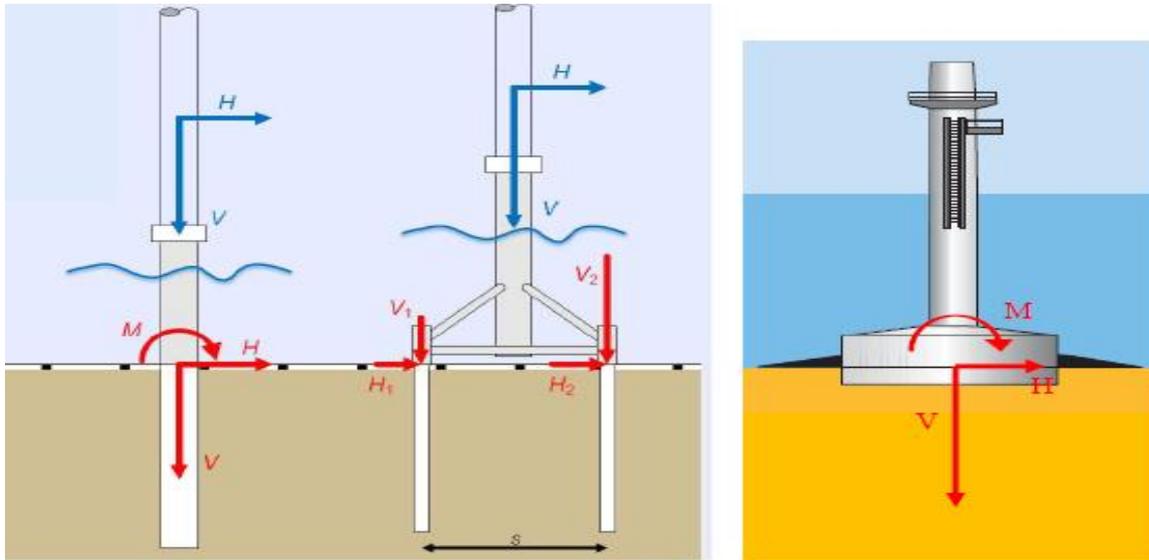


Figure 3. Différents types de sollicitations appliquées aux fondations

Du fait que les charges de turbine sont concomitantes avec les autres charges d'environnement telles que les charges de vagues, de courant et les niveaux d'eau, les combinaisons de charges à considérer doivent inclure non seulement les charges de turbine, mais aussi les conditions associées de vagues, courant et niveaux d'eau.

Combiner des charges environnementales en conditions opérationnelles peut s'avérer complexe. Ces charges sont basées sur des probabilités d'occurrence (Figure 4).

| Catégories de charges d'environnement et périodes de retour pour définir les valeurs caractéristiques de chargement | | | | |
|---|--------|---------|--------|---------------|
| Vent | Vagues | Courant | Glace | Niveaux d'eau |
| 50 ans | 5 ans | 5 ans | | 50 ans |
| 5 ans | 50 ans | 5 ans | | 50 ans |
| 5 ans | 5 ans | 50 ans | | 50 ans |
| 5 ans | | 5 ans | 50 ans | MSL |
| 50 ans | | 5 ans | 50 ans | MSL |

Figure 4. Exemple de règles de concomitance des charges environnementales (d'après IEC 61 400-3).

Les critères de dimensionnement des éoliennes incluent par ailleurs des tolérances drastiques sur l'inclinaison de l'axe de la turbine à long terme (durée de vie). L'identification des cas de charge intervenant pour déterminer le comportement en service (ELS) est délicate. Un sous-groupe particulier a été mis en place pour faire un pont entre les cas de charges définis par l'IEC 61400-3 et les sollicitations à considérer dans le dimensionnement géotechnique.

5. Etudes de terrain

Les propriétés du sol sur un site d'implantation d'éoliennes offshore doivent être évaluées au moyen d'une étude de terrain en conformité avec les normes et règlements applicables et en accord avec l'état de l'art. A ce jour aucun texte officiel français ne réglemente la construction d'ouvrages en haute mer. Le présent chapitre des Recommandations entend préciser les 'bonnes pratiques' à respecter pour les études de terrains à réaliser en vue de la construction d'éoliennes en mer. Compte tenu des développements en cours, le Groupe de Travail a décidé de se concentrer en priorité sur ce chapitre « études de terrains » et permettre ainsi de le publier séparément sans attendre la sortie finale des Recommandations. Le document sous forme provisoire est disponible sur le site www.cfms-sols.org

L'étendue d'une reconnaissance de terrain et le choix des méthodes à mettre en œuvre doivent prendre en compte le type et la taille de la structure de l'éolienne, et doivent être adaptés aux conditions géologiques anticipées du site (complexité du sol, conditions du fond marin, ...). La surface à couvrir par les investigations de terrain doit correspondre à la totalité du champ d'éoliennes et doit tenir compte des tolérances de positionnement et d'installation des ouvrages.

Les études de terrain doivent fournir des informations pertinentes sur les sols et les roches jusqu'à une profondeur telle qu'il soit possible de détecter l'existence de formations de faibles caractéristiques susceptibles :

- d'affecter la stabilité de l'ouvrage
- de générer des déformations excessives (tassements)

Les études de terrain comprendront normalement :

- les études du contexte géologique à l'échelle du site
- les études géophysiques
- les études géotechniques

Elles permettront de fournir des éléments répondant aux problématiques propres aux fondations d'éoliennes en mer à savoir : affouillement, capacité ultime, dégradations cycliques, déplacements permanents, déplacements cycliques, ensouillage de câbles, mise en place de pieux, mobilité des sédiments, pénétration de jupes, potentiel de liquéfaction, préparation du fond, raideur des fondations, stabilité d'ensemble.

La taille importante d'un développement éolien offshore, (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de km²) conjuguée à la faible densité des fondations, (environ un ouvrage par km² en moyenne), rend nécessaire l'élaboration d'une stratégie de reconnaissance adaptée. Il s'agit tout à la fois d'obtenir une appréciation globale des structures stratigraphiques et tectoniques sur la totalité du champ et de parvenir à la détermination des paramètres géotechniques nécessaires au dimensionnement des fondations de chaque éolienne.

Il est donc nécessaire de développer une connaissance des conditions géologiques et géotechniques à la fois à l'échelle du site et à l'échelle de la

fondation. Une manière de concilier ces deux échelles de connaissance est la constitution d'un modèle géologique et géotechnique évolutif. Il rassemble et synthétise, au fur et à mesure de l'avancement du projet, toutes les connaissances disponibles sur le site.

Les Recommandations ont donc voulu décrire les phases principales de la constitution du modèle, chacune d'entre elles représentant une version améliorée de la précédente :

Phase 1 : Modèle géologique initial

Phase 2 : Modèle stratigraphique (ou sismo-stratigraphique)

Phase 3 : Modèle géologique de site

Phase 4 : Modèle géotechnique

L'objectif principal est de définir in fine des profils géotechniques de calcul. Pour ce faire et lors des différentes étapes des études on définira :

- d'abord des provinces géologiques dont les caractéristiques (lithologie, stratigraphie) peuvent être considérées comme homogènes
- puis des provinces géotechniques se caractérisant par des problématiques similaires liées à la nature des sols, à l'épaisseur des couches, et aux aléas géotechniques.

Les provinces géotechniques permettent de proposer un ou plusieurs profils géotechniques de calcul présentant des épaisseurs de couches semblables et des propriétés mécaniques homogènes.

Chaque profil géotechnique doit définir:

- La classification et description des sols
- Les propriétés de résistance au cisaillement et de déformation, nécessaires pour le type d'analyses envisagées,
- L'état de contraintes in situ (OCR et K_0 , anisotropie ...)
- Les paramètres géotechniques permettant de répondre aux spécificités des éoliennes offshore (cyclique, fatigue ...)

Les paramètres géotechniques fournis doivent couvrir les besoins en vue des dimensionnements détaillés et complets des fondations. L'appréciation de leur variabilité est une donnée essentielle.

Une attention particulière a été portée sur procédures de reconnaissance à mettre en place pour les types de sols non conventionnels susceptibles d'être rencontrés sur le plateau continental français de métropole et d'outremer (craies, marnes, roches tendres de type calcarénites, sols d'origine volcanique)

6. Procédures de dimensionnement

L'industrie pétrolière a développé des procédures pour prendre en compte les effets des fortes houles sur les fondations des structures offshore. Elles sont explicitées dans des codes ou recommandations professionnelles (API RP2GEO, 2011; DnV Foundations, 1992 ; ISO 19901-4, 2003). L'industrie éolienne adapte progressivement ces procédures au cas des éoliennes offshore (par exemple DnV-OS-J101, 2011, 2014; BSH, 2007, 2011).

Trois sous-groupes ont été mis en place pour traiter les cas des éoliennes fondées sur 1) monopieux, 2) embases gravitaires et 3) pieux. D'une manière générale les Recommandations se référeront aux procédures explicitées dans l' ISO 19901-4 (2003).

Des compléments devront cependant être apportés pour :

- couvrir les types de sols spécifiques rencontrés sur le plateau continental français (voir section 5 ci-dessus). Les documents de l'industrie offshore internationale ne proposent de méthodes de dimensionnement géotechnique que pour les sols standards (sables, argiles) avec quelques commentaires sur les sables carbonatés.
- traiter de manière plus détaillée le cas des pieux forés. Ce type de pieu est peu employé en offshore pétrolier, mais sera probablement un recours nécessaire dans les roches tendres à dures présentes dans les eaux françaises
- d'une manière générale, harmoniser les approches typiquement offshore avec le savoir-faire français dans le domaine terrestre, l'expérience acquise dans les sols tels que les craies et les approches de dimensionnement couramment utilisées.
- introduire les apports du projet national SOLCYP dans le dimensionnement des pieux sous chargements cycliques (Puech et Garnier, 2016).

7. Conclusion

Les champs d'éoliennes offshore en cours de développement dans les eaux territoriales françaises avec des profondeurs d'eau atteignant 40 m mettent en évidence ces conditions environnementales et géotechniques diverses et complexes (craie, marnes compactes, calcarénites, roches granitiques). La conception, le dimensionnement et l'installation des structures supports de ces éoliennes représentent des défis importants pour l'industrie. La rédaction de recommandations professionnelles s'inspirant des documents étrangers existants ou en cours de rédaction et prenant en compte toutes ces spécificités est d'une grande importance. Grâce à la diversité des intervenants et aux rythmes soutenus des réunions des différents sous-groupes, le Groupe de Travail, mandaté par le Comité Français de la Mécanique des Sols (CFMS), devrait mener à bien sa mission pour produire un document complet fin d'année 2017.

8. Références

- API RP2GEO (2011) API Recommended Practice, Geotechnical and Foundation Design Considerations, First Edition, April 2011.
- BSH (2007, 2011) Design of Offshore Wind Turbines.
- DnV-OS-J101 (2011, 2014) Design of Offshore Wind Turbines Structures, DnV Offshore Standards.
- GL Rules and Guidelines (2005): IV Industrial Services. Part 2 - Guidelines for the Certification of Offshore Wind Turbines, Germanischer Lloyd, Reprint 2007.
- IEC 61 400-3 (2009) Wind Turbines – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines. Ed. 1.0. International Electrotechnical Commission.
- ISO 19901-4 (2003) Petroleum and Natural Gas Industries, Specific requirements for offshore structures, Part 4: Geotechnical and Foundation Design Considerations.
- Puech A., Garnier.J. (2016) Recommandations SOLCYP pour le dimensionnement des pieux sous chargements cycliques. *Proceedings JNGG 2016*, Nancy
- CFMS (2011) Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des fondations d'éoliennes. www.cfms-sols.org