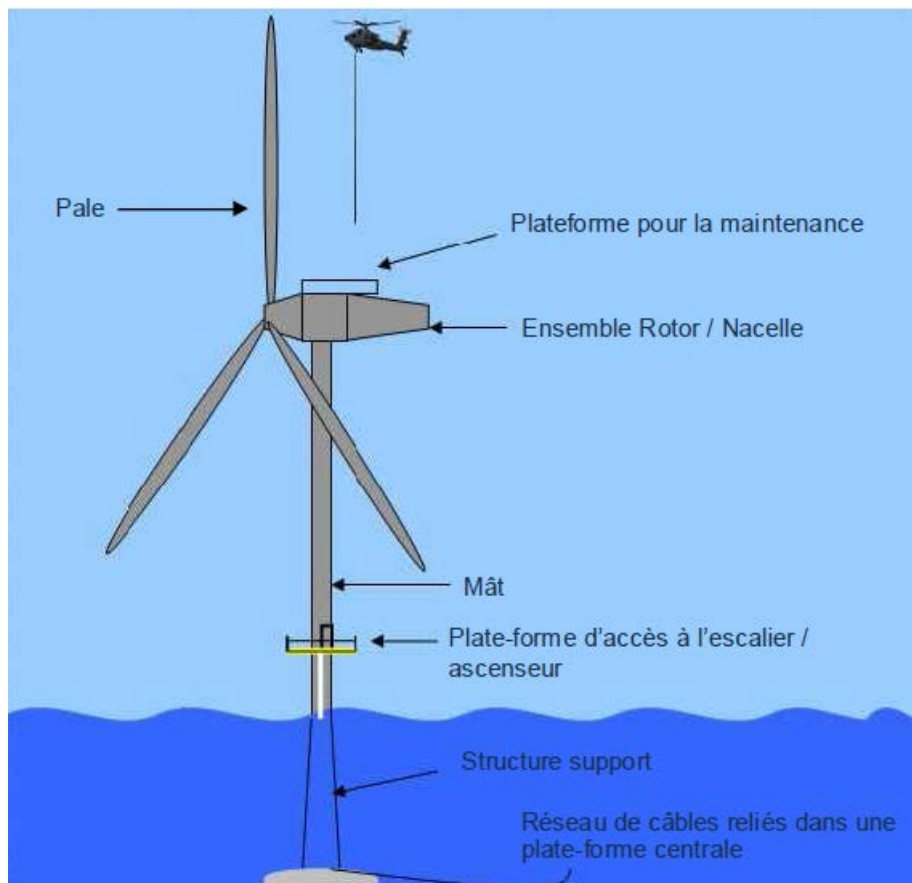


Groupe de Travail « Fondations d'éoliennes offshore »

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

Partie I – Etudes de terrain (version provisoire)



SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| SOMMAIRE | 2 |
| NOTATIONS | 3 |
| ACRONYMES | 4 |
| GROUPE DE TRAVAIL « FONDATIONS D’EOLIENNES OFFSHORE » | 5 |
| AVANT PROPOS | 7 |
| ETUDES DE TERRAINS | 8 |
| 1. INTRODUCTION | 8 |
| 2. ELEMENTS A FOURNIR AU GEOTECHNICIEN | 9 |
| 3. OBJECTIFS DES ETUDES DE TERRAINS | 10 |
| 3.1. PROBLEMATIQUES PROPRES AUX FONDATIONS D’EOLIENNES EN MER..... | 12 |
| 3.1. OBTENTION DES PARAMETRES NECESSAIRES AU DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS D’EOLIENNES EN MER..... | 15 |
| 3.2.1 Parametres nécessaires au dimensionnement des fondations d’éoliennes en mer | 15 |
| 3.2.2 Pertinence des techniques in situ et de laboratoire pour l’obtention des paramètres..... | 19 |
| 4. MODELE GEOLOGIQUE DE SITE | 25 |
| 5. RECONNAISSANCES RECOMMANDEES | 28 |
| 5.1. PHASAGE DES ETUDES..... | 28 |
| 5.2. ETUDE SUR DOCUMENTS EXISTANTS | 33 |
| 5.3. RECONNAISSANCES PRELIMINAIRES..... | 35 |
| 5.4. RECONNAISSANCES DETAILLEES | 42 |
| 5.5. ROUTES DE CABLES..... | 47 |
| 5.6. SOUS-STATION..... | 53 |
| 5.7. MAT METEO | 54 |
| LEXIQUE | 55 |
| REFERENCES | 58 |

NOTATIONS

| | |
|---|--|
| Bq | rapport de pression interstitielle |
| G₅₀ | module de cisaillement sécant à 50% de la résistance ultime |
| G_o ou G_{max} | module de cisaillement à très faible taux de distorsion |
| K₀ | coefficient de pression des terres au repos |
| LL | Limite de Liquidité (Liquid Limit) |
| LP | Limite de Plasticité (Plastic Limit) |
| OCR | Rapport de surconsolidation (Over Consolidation Ratio) |
| q_c | résistance de pénétration au cône |
| q_t | résistance au cône corrigée |
| R_c | résistance à la compression uniaxiale |
| R_f | rapport de frottement (essai de pénétration au cône) |
| V_p | vitesse des ondes de compression |
| V_s | vitesse des ondes de cisaillement |
| δ_r | angle d'interface résiduel |
| ε₅₀ | déformation axiale d'un échantillon à 50% de la résistance ultime (essai triaxial) |
| φ' | angle de frottement effectif |
| φ'_{car} | angle de changement de phase ou angle caractéristique |
| φ'_{cv} | angle d'état critique (volume constant) |

ACRONYMES

| | |
|----------------|---|
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| BRGM | Bureau de Recherches Géologiques et Minières |
| BS | British Standards |
| CIRIA | Construction Industry Research and Information Association |
| Ifremer | Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer |
| ISO | International Organisation for Standardization |
| ISSMGE | International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering |
| NF | Norme Française |
| SHOM | Service Hydrographique et Océanographique de la Marine |
| CAD | consolidé anisotropiquement, drainé (anisotropically consolidated, drained) |
| CAU | consolidé anisotropiquement, non drainé (anisotropically consolidated, undrained) |
| CID | consolidé isotropiquement, drainé (isotropically consolidated, drained) |
| CIU | consolidé isotropiquement, non drainé (isotropically consolidated, undrained) |
| CPT | essai de pénétration au cône électrique (Cone Penetration Test) |
| CPTU | essai de pénétration au piézocône |
| CSS | cisaillement simple direct cyclique (Cyclic direct Simple Shear) |
| DSS | cisaillement simple direct (Direct Simple Shear) |
| DTS | Desk Top Study |
| FEED | Front End Engineering design |
| HPDT | essai au dilatomètre haute pression (High Pressure Dilatometer Test) |
| MASW | Multichannel Analysis of Surface Waves |
| MBES | bathymétrie multi-faisceaux (Multibeam Echo Sounder) |
| PMT | essai au pressiomètre Ménard (Pressuremeter Test) |
| RQD | Rock Quality Designation |
| SIG | système d'information géographique |
| SSS | Side Scan Sonar |
| THR | Très Haute Résolution |
| UHRS | Sismique Ultra Haute Résolution (Ultra High Resolution Seismic) |
| UU | non consolidé, non drainé |
| UXO | Unexploded Ordnances |
| VST | Vane Shear Test |

GRUPE DE TRAVAIL « FONDATIONS D'EOLIENNES OFFSHORE »

Président

Berthelot* Patrick Bureau Veritas

Animateur

Puech* Alain FugroGeoConsulting

Membres du Groupe de Travail

Les membres désignés par * ont directement participé à la rédaction de la Partie I : Etudes de terrain

| | | |
|-------------|------------|--------------------|
| Bois* | Patrice | Technip |
| Borel* | Denys | FugroGeoconsulting |
| Caillet | Benoît | Doris Engineering |
| Carpinteiro | Luis | Socotec |
| Chalivat* | Pascal | GDF – Suez |
| Coste* | François | Technip |
| Demay | Bruno | Bouygues |
| De Muynck | Pascale | EDF-EN |
| Denois* | Thierry | EDF-EN |
| Dupouy | Henry | Ceteal |
| Ehrhart | Silke | EoleRes |
| Guerpillon | Yves | Egis |
| Hammann | Martin | Cathie Associates |
| Heisel | Pascal | Ceteal |
| Jaeck | Christophe | Cathie Associates |
| Palix | Elisabeth | EDF-EN |
| Pozzi | Nathalie | Demathieu Bard |

| | | |
|-----------------|-----------|-------------|
| Puzenat* | Yves | Saipem |
| Roby | Matthieu | GDF-Suez |
| Ropers* | Françoise | GDS |
| Souviat | Benjamin | SMA Consult |
| Thorel | Luc | IFSTTAR |
| Tomas Dominguez | Fernando | GDF-Suez |
| Wallerand | Regis | Subsea7 |
| Zerhouni | Moulay | Fondasol |

AVANT PROPOS

Les « Recommandations sur la conception et le calcul des fondations d'éoliennes offshore » en cours d'élaboration sous l'égide du Comité Français de Mécanique des Sols (CFMS) traitent des aspects géotechniques liés à la conception et au calcul des fondations des éoliennes offshore.

Ces recommandations visent à pallier l'absence de documents normatifs et de réglementation officielle concernant la conception et la réalisation des fondations des ouvrages offshore dans les eaux territoriales françaises

Le document actuel dénommé « Etudes de terrain » est destiné à constituer un chapitre du document final. Il a été élaboré en priorité compte tenu de l'accélération des développements éoliens au large des côtes françaises. Il est présenté dans une version provisoire susceptible de recevoir des modifications ou améliorations avant publication dans le document final.

Tout commentaire relatif à cette version provisoire peut être adressé jusqu'au 30 Juin 2016 à :

a.puech@fugro.com et patrick.berthelot@fr.bureauveritas.com

ETUDES DE TERRAINS

1. INTRODUCTION

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 règlemente la construction d'ouvrages en haute mer. Ce document et plus particulièrement le présent chapitre entendent préciser les 'bonnes pratiques' à respecter pour les études de terrains à réaliser en vue de la construction d'éoliennes en mer.

Les études de terrain doivent fournir in fine toutes les données nécessaires à un dimensionnement détaillé. Elles sont généralement divisées en études géologiques, géophysiques et géotechniques. Ces études seront réalisées en différentes phases selon les besoins et l'avancement du projet.

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 champs d'éoliennes offshore comportent un grand nombre de machines (plusieurs dizaines à plusieurs centaines) et concernent une superficie importante (plusieurs dizaines à centaines de km²). La stratigraphie du terrain, les propriétés mécaniques des matériaux et leur variabilité verticale et latérale doivent pouvoir être déterminées avec précision au droit de chaque fondation. De plus, une bonne connaissance des propriétés mécaniques des sédiments superficiels est nécessaire sur le tracé des routes de câbles entre les éoliennes et depuis le champ jusqu'à la côte. La reconnaissance des zones d'atterrage proprement dites n'est pas couverte par le présent document.

2. ELEMENTS A FOURNIR AU GEOTECHNICIEN

Les données à fournir par le maître d'ouvrage ou le maître d'œuvre au géotechnicien sont dans une large mesure dépendantes de la nature des prestations demandées et de la phase du projet. Les éléments à fournir sont à définir pour chacune des phases d'intervention.

Les indications données dans la suite de ce paragraphe sont fournies à titre informatif et doivent être considérées comme un minimum.

Quelle que soit la nature de son intervention (études, prestations de reconnaissance), le géotechnicien doit être informé :

- de la localisation précise du projet,
- de l'état de développement du projet (études conceptuelles, avant-projet, projet détaillé)
- des décisions prises en amont et leurs évolutions possibles quant au type de fondations et à leur implantation,
- de l'historique et des résultats des reconnaissances effectuées,
- des objectifs précis de sa mission.

Le géotechnicien sollicité pour réaliser des opérations de reconnaissance de terrain doit en outre avoir à disposition un descriptif complet des conditions de site, notamment : bathymétrie, morphologie des fonds, géologie anticipée, conditions météocéaniques (vague, vent, courant, marées) opérationnelles et extrêmes.

Le maître d'ouvrage doit faire part, sans restriction, de sa connaissance des aléas géologiques (geohazards) et anthropiques (épaves, câbles, munitions non explosées). En cas de présence possible ou suspectée de munitions non explosées, il est de la responsabilité du maître d'ouvrage de prendre toutes dispositions pour établir, préalablement à toute intervention sur site, la nature et le niveau des risques associés ainsi que les mesures de prévention appropriées.

3. OBJECTIFS DES ETUDES DE TERRAINS

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

Les études géologiques doivent permettre d'identifier les aléas majeurs et les risques qui en découlent.

Les études géophysiques comportent essentiellement des relevés à l'écho-sondeur, au sonar latéral et en sismique réflexion. L'objectif est d'établir la bathymétrie et la morphologie du fond, de définir les unités lithologiques et les structures tectoniques et de fournir les données pour l'établissement de profils stratigraphiques. Elles permettront une corrélation spatiale avec les données ponctuelles des sondages et essais in situ,

Les études géotechniques comprennent des investigations géotechniques et l'interprétation des données. Les investigations géotechniques comportent :

- des reconnaissances à base d'essais in situ [par exemple essais pénétrométriques (CPT/CPTU), essai pressiométriques (PMT), essais au dilatomètre (HPDT)] et d'échantillonnages suivis d'essais de laboratoire ;
- l'exploitation des résultats.

L'objectif des investigations géotechniques est d'obtenir pour chaque formation géotechnique les données suivantes :

- Classification et description des sols ;
- Paramètres géotechniques : propriétés de résistance au cisaillement et de déformation, état de contraintes in-situ (e.g. surconsolidation) nécessaires pour le type d'analyses envisagées.

L'interprétation des paramètres géotechniques fournis devra permettre le dimensionnement détaillé et complet des fondations. L'extension latérale des unités géotechniques et la variation latérale des paramètres géotechniques devront pouvoir être évaluées.

Il est particulièrement important que les échantillons de sol recueillis lors de la reconnaissance géotechnique et destinés aux essais de laboratoire, soient d'une qualité satisfaisante pour permettre l'obtention de paramètres géotechniques à utiliser pour le dimensionnement.

Le programme d'essais de laboratoire pour la détermination des propriétés de résistance et de déformation du sol doit comprendre des essais adaptés, réalisés en nombre suffisant.

L'effet sur les paramètres géotechniques des chargements cycliques générés par la houle et par le vent doivent être pris en compte dans le dimensionnement des fondations d'éoliennes en mer.

Ces effets sont de plusieurs ordres et concernent notamment :

- L'évolution de la résistance au cisaillement et du module de cisaillement due au cumul des cycles de chargement ;
- La modification des résistances et des modules en fonction de la vitesse de chargement.

Ces évolutions dépendent notamment des variations de pressions interstitielles.

La combinaison de ces effets peut influencer significativement sur la réponse à long terme des fondations (mouvements cycliques, tassements, déplacements horizontaux). L'évolution des raideurs de l'ensemble sol-fondation peut affecter les périodes propres et la résistance à la fatigue de la structure. Des essais spécifiques sont nécessaires pour déterminer le comportement cyclique des sols et la variation de leur module de cisaillement avec le taux de distorsion.

Plusieurs étapes sont nécessaires pour parvenir à une connaissance suffisante des conditions géologiques et géotechniques du site (voir section 6.5). Chaque étape doit se conclure par la proposition d'un modèle de site (voir section 6.4). Ce modèle initialement provisoire et nécessairement incomplet servira à définir le contenu des phases ultérieures et sera progressivement enrichi pour arriver au modèle final caractérisé par une description exhaustive de la géologie sur l'ensemble du site, une stratigraphie fine des différentes unités et la proposition de profils de paramètres géotechniques pour le dimensionnement des fondations au droit de chaque ouvrage (éolienne, sous-station, mât météo, câbles).

3.1. PROBLEMATIQUES PROPRES AUX FONDATIONS D'EOLIENNES EN MER

Les principales problématiques du dimensionnement des fondations d'éoliennes en mer sont évoquées dans cette section.

Affouillement: les vagues et les courants sont susceptibles de provoquer des affouillements autour des fondations (pieux ou embases gravitaires). Les affouillements sont particulièrement à redouter en présence de sables fins à moyens propres mais leur ampleur est toujours difficile à évaluer. Des dispositifs anti-affouillements peuvent être nécessaires. Les mouvements alternatifs de basculement sous l'effet des vagues peuvent également causer des "chasses d'eau" à la périphérie des embases gravitaires et des phénomènes d'érosion.

Capacité ultime: quel que soit le type de fondation, le sol environnant doit être en mesure de supporter les charges statiques et cycliques qui lui sont transmises avec une marge de sécurité suffisante vis à vis de la rupture et sans génération de déplacement excessif. Pour des fondations monopodes ou gravitaires les charges sont des charges de compression. Dans le cas d'ancrages ou de fondations multipodes il peut s'agir de charges en tension. La capacité sous chargement cyclique peut être différente de la capacité sous chargement monotone. La capacité sous chargement cyclique doit être considérée avec attention.

Dégradation cyclique: certains types de sols (par exemple argiles molles, argiles sensibles, sols carbonatés) sont susceptibles de subir une dégradation significative de leurs propriétés mécaniques sous l'effet des sollicitations cycliques. Ce phénomène affecte la capacité ultime et les déplacements des fondations.

Déplacements permanents: les charges statiques (permanentes) provoquent des déplacements initiaux de la fondation qui peuvent être suivis par des déplacements engendrés au cours du temps par des phénomènes de consolidation du sol et de fluage. Les chargements cycliques dus au vent et aux vagues peuvent également générer des déplacements permanents additionnels résultant de déformations de cisaillement et de la dissipation de pressions interstitielles générées par la répétition des charges dans les sols peu perméables. Les déplacements verticaux ou tassements sont à considérer dans le cas de fondations gravitaires. Les déplacements horizontaux permanents sont particulièrement critiques dans le cas de fondations monopodes. Ces déplacements horizontaux ou verticaux sont particulièrement critiques lorsqu'ils induisent une rotation permanente.

Déplacements cycliques: les charges cycliques provoquent des déplacements cycliques et post-cycliques de la fondation et de la structure. Certains sols (argiles molles ou sensibles, matériaux granulaires lâches, sols carbonatés) peuvent être particulièrement sensibles à ces phénomènes et provoquer des tassements excessifs. L'ensemble de ces déplacements (permanents et cycliques) ramenés au niveau du rotor doivent rester inférieurs aux tolérances liées aux risques d'usure et/ou de fatigue.

Ensouillage des câbles: dans les zones actuellement envisagées pour l'installation d'éoliennes en mer, la protection des câbles nécessitera préférentiellement leur ensouillage. Les techniques d'ensouillage sont diverses: charruage, lançage, tranchage. L'efficacité de chaque technique dépend fortement du type de sol rencontré sur la hauteur d'ensouillage nécessaire à la protection du câble ou imposée réglementairement. Dans les matériaux rocheux, des techniques alternatives de protection de surface par mise en place d'enrochements ou d'éléments préfabriqués peuvent être envisagées. Le type et les caractéristiques des moyens à utiliser doivent être établis pour chaque application.

Mise en place de pieux: le battage d'éléments métalliques (tubes essentiellement) est la solution la plus communément utilisée pour la réalisation de pieux en mer. Le battage de monopieux de grand diamètre (typiquement: 5 à 7 mètres) est réalisable. Dans les sols raides, il peut être nécessaire de curer le bouchon ou de forer des avant-trous pour aider la pénétration par battage. Dans les sols rocheux le forage avec cimentation est une solution toujours possible.

Des études spécifiques sont nécessaires pour s'assurer 1) de la possibilité de battre les pieux jusqu'à la profondeur requise pour mobiliser la résistance de projet, 2) choisir les marteaux adéquats et 3) vérifier que les contraintes de battage n'endommagent pas les éléments de pieux. Dans les sols durs et les roches tendres, une attention particulière sera apportée aux risques liés au refus prématuré, à l'endommagement de la pointe des pieux sur les niveaux durs, à l'écrasement du tube par instabilité structurelle et à la fatigue de l'acier sous un grand nombre de coups. Des essais préalables de faisabilité de battage pourront s'avérer nécessaires. Ils devront être organisés suffisamment tôt dans le déroulement du projet, soit en mer sur le site même, soit sur un site terrestre présentant des caractéristiques géotechniques similaires démontrées.

Mobilité des sédiments: l'évolution éventuelle du niveau du fond marin sur la durée de vie du parc devra être déterminée par une étude hydro-sédimentaire prenant en compte le déplacement des dunes, l'érosion des fonds, l'accrétion....

Pénétration de jupes: il peut être nécessaire de munir les embases gravitaires de jupes (ou bèches) soit pour assurer la stabilité de la fondation, soit pour se prémunir de certains phénomènes tels que

l'affouillement périphérique ou l'érosion due à des expulsions d'eau sous la base. La pénétration de ces éléments doit pouvoir être assurée jusqu'à la cote nécessaire.

Potentiel de liquéfaction: le risque de liquéfaction (perte de résistance mécanique) des sables ou sables silteux sous l'effet de charges cycliques doit être analysé dans les zones sismiques et / ou en présence de fortes houles.

Préparation du fond: une préparation du fond marin pourra être requise avant mise en place des fondations. Il pourra s'agir par exemple de travaux de déroctage et nivellement avant installation de pieux ou ensouillage de câble. Dans le cas de fondations gravitaires, il sera le plus souvent nécessaire de créer une plate-forme artificielle plane par apport de matériaux. Dans certains cas, l'enlèvement de sédiments de surface hétérogènes ou de propriétés médiocres pourra être à considérer. La stabilité des matériaux d'apport devra faire l'objet d'études spécifiques.

Raideur des fondations: la raideur des fondations est une composante essentielle dans l'évaluation de la période propre de la structure. Les éoliennes offshore sont particulièrement sensibles aux phénomènes de résonance et de fatigue. La période propre et son évolution au cours du temps sous l'effet des chargements cycliques (dégradation des raideurs) doivent être évaluées avec précision.

Réactions de sols: les fondations gravitaires doivent être dimensionnées pour les réactions de sol sous l'embase générées sous l'effet des charges monotones et cycliques. Dans le cas de sols raides ou à granulométrie fortement hétérométrique ces réactions peuvent être très élevées.

Stabilité d'ensemble: la stabilité d'ensemble des massifs de sols supportant les fondations devra être assurée notamment en présence de pentes sous-marines et lorsque les fondations induisent des contraintes significatives sur de larges surfaces (e.g. fondations gravitaires). Des études spécifiques de stabilité des pentes pourront être requises. Elles devront considérer les différents phénomènes déclenchant envisageables (gravité, accélération sismique, gaz dans les sédiments, etc.) et l'effet des contraintes apportées par l'ouvrage.

3.1. OBTENTION DES PARAMETRES NECESSAIRES AU DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS D'EOLIENNES EN MER

3.2.1 Parametres nécessaires au dimensionnement des fondations d'éoliennes en mer

Afin d'apporter des réponses aux problèmes évoqués ci-dessus, il convient de collecter un certain nombre d'informations de nature géologique et géotechnique. Le tableau 1 liste les paramètres de base nécessaires pour identifier et classer les sols et les roches rencontrés dans le profil stratigraphique. La classification devra être faite selon une norme reconnue (ISO, BS, ASTM, NF). Les tableaux 2 et 3 indiquent les paramètres additionnels qui peuvent être requis pour certains problèmes spécifiques ou pour certains types de sols ayant un comportement non standard tels que sables carbonatés, sols d'origine volcanique ou craies. Ces matériaux, quelquefois qualifiés de sols non conventionnels (ISO 19901-8), sont présents dans les eaux françaises de métropole ou d'outremer.

Tableau 1: Paramètres nécessaires à une caractérisation standard des sols et des roches

| ARGILE,LIMON | SABLE, GRAVE | ROCHE |
|---|--|--|
| Description générale Lithographie | Description générale Lithographie | Description générale Lithographie |
| Distribution granulométrique et sédimentométrique | Distribution granulométrique et sédimentométrique Angularité | Présence d'éléments hétéro- gènes (blocs, silex, gypse ...) Fracturation (RQD, ouverture et état des fractures, espace- ment, orientation) Altération |
| Teneur en eau Poids volumique total Limites d'Atterberg (LL et LP) | Densités maximale et mini- male Densité relative | Poids volumique total Porosité, saturation Poids volumique des blocs so- lides |
| Teneur en matière organique Teneur en carbonates | Teneur en matière organique Teneur en carbonates | Teneur en carbonates |
| Résistance au cisaillement non drainée Résistance au cisaillement drainée Résistance au cisaillement re- maniée et/ou résiduelle | Angle de frottement effectif (ϕ') Résistance au cisaillement non drainée | Résistance à la compression simple (R_c) |
| Minéralogie | Minéralogie | Mineralogie |
| ----- Histoire des contraintes ----- | ----- Histoire des contraintes ----- | |

Tableau 2 : Paramètres additionnels pouvant être requis pour des problématiques spécifiques

| PROBLEMATIQUE | PARAMETRES |
|--------------------------------|--|
| Résistance ultime | <ul style="list-style-type: none"> - Résistance au cisaillement monotone sous différents chemins de contraintes (anisotropie de sollicitation) - Résistance au cisaillement cyclique sous différentes combinaisons de contraintes moyenne et d'amplitude cyclique pour des chemins de contraintes triaxiaux ou de cisaillement simple - Sable: Angle de frottement effectif (ϕ'), angle critique (ϕ'_{cv}), angle de changement de phase (ϕ'_{car}) |
| Déplacements permanents | <ul style="list-style-type: none"> - Compressibilité - Perméabilité - Déformations et pressions interstitielles permanentes générées sous différentes combinaisons de contraintes moyennes et d'amplitude cyclique pour des chemins de contraintes triaxiaux ou de cisaillement simple - Compressibilité après cycles |
| Déplacements cycliques | <ul style="list-style-type: none"> - Déformation de cisaillement cyclique en fonction de la contrainte de cisaillement cyclique pour des chemins de contraintes triaxiaux ou de cisaillement simple - Module de cisaillement cyclique initial |
| Raideur de fondation | <ul style="list-style-type: none"> - Déformation de cisaillement cyclique en fonction de la contrainte de cisaillement cyclique pour des chemins de contraintes triaxiaux ou de cisaillement simple - Module de cisaillement à très faible distorsion (G_o ou G_{max}) et évolution avec le taux de distorsion - Amortissement |
| Réactions de sol | <ul style="list-style-type: none"> - Résistances au cisaillement monotone et cyclique - Compressibilité sous chargement vierge et rechargement - Déformations permanentes et cycliques et pressions interstitielles permanentes sous différentes combinaisons de contraintes moyenne et d'amplitude cyclique pour des chemins de contraintes triaxiaux ou de cisaillement simple - Topographie et morphologie du fond, présence d'anomalies sur le fond |
| Pénétration de jupes | <ul style="list-style-type: none"> - Résistance au cisaillement non drainé - Résistance au cisaillement remaniée (ou sensibilité) - Angle de frottement drainé (ϕ) - Sable - Angle d'interface résiduel (δr) sable-acier ou sable-béton - Résistance au cône (q_c) - Topographie et morphologie du fond, présence d'anomalies sur le fond - Présence de blocs dans le sol |

| PROBLEMATIQUE | PARAMETRES |
|----------------------------------|--|
| Mise en place de pieux | <ul style="list-style-type: none"> - Résistance au cisaillement - Module de cisaillement (G_{50}) ou déformation à 50% de la résistance ultime (ϵ_{50})- Argiles - Résistance au cône (q_c) - Résistance à la compression simple (R_c)- Roches - Abrasivité - Sensibilité des argiles |
| Potentiel de liquéfaction | <ul style="list-style-type: none"> - Données CPTU (q_c ou q_t, R_f, B_q) - Granulométrie et teneur en fines - Limites d'Atterberg et teneur en eau - Vitesses des ondes de cisaillement (V_s) |
| Affouillement et érosion | <ul style="list-style-type: none"> - Granulométrie - Perméabilité |
| Ensoilage de câbles | <ul style="list-style-type: none"> - Résistance au cône (q_c)- Sables et argiles - Granulométrie et Perméabilité – Sables - Abrasivité des roches - Conductivité thermique - Résistivité électrique - Vitesse des ondes de compression (V_p) et cisaillement (V_s) |

Tableau 3: Paramètres additionnels requis pour caractériser certains sols et roches non standards

| TYPE DE SOL | PARAMETRES | COMMENTAIRES |
|---|--|--|
| Sables carbonatés avec ou sans cimentation | <ul style="list-style-type: none"> - Compressibilité (indice de compressibilité limite) - Ecrasabilité - Degré de cimentation - Résistance à la compression simple si cimentation | <ul style="list-style-type: none"> - Classification selon Clark et Walker basée sur trois critères: teneur en carbonates, granulométrie, résistance à la compression simple - Voir Argema: Guide pratique sur les ouvrages en mer – Pieux dans les formations carbonatées. |
| Sols d'origine volcanique | <ul style="list-style-type: none"> - Compressibilité - Autres: à étudier au cas par cas | <ul style="list-style-type: none"> - Forte variabilité de nature et de comportement - A étudier au cas par cas |
| Craies | <ul style="list-style-type: none"> - Description précise des degrés d'altération - Compressibilité - Fluage - Perméabilité de la matrice - Perméabilité du massif - Absorption d'eau | <ul style="list-style-type: none"> - Classification selon CIRIA (publication C574 – « Engineering in chalk ») basée sur densité, altération, état de fracturation |
| Sols organiques | <ul style="list-style-type: none"> - Teneur en matière organique - Compressibilité - Fluage - Présence de gaz | |

3.2.2 Pertinence des techniques in situ et de laboratoire pour l'obtention des paramètres

La pertinence des différents essais in situ et de laboratoire pour déterminer les paramètres de sols est évaluée dans les tableaux suivants. On distingue les essais qui sont couramment utilisés dans le cadre d'investigations usuelles (Tableau 4) et les essais spécifiques qui doivent être réalisés pour des applications particulières (Tableau 5). Un tableau est dédié aux essais sur roches (Tableau 6). Le niveau d'applicabilité de chaque technique est évalué sur une échelle de 1 à 5.

1 = faible ou inapproprié

4 = bon

2 = acceptable pour des analyses non critiques

5 = très bon

3 = moyennement bon

Tableau 4: Techniques pour investigations usuelles

| Paramètres de sol | Essais in situ | | | Essais de laboratoire | | |
|---|-----------------------------------|---------------|--------|------------------------|---------------|--------|
| | Type d'essai | Applicabilité | | Type d'essai | Applicabilité | |
| | | Sable | Argile | | Sable | Argile |
| Stratigraphie | Sismique réflexion ^(a) | 2 à 3 | 2 à 3 | | | |
| Classification des sols de surface (fond marin) | Bathymétrie | | | Granulométrie | 5 | 2 |
| | multifaisceaux | 1 | 1 | Granulo+sédimento | | 4 |
| | Side Scan Sonar (SSS) | 1 | 1 | Teneur en eau | 2 | 3 |
| | | | | Limites d'Atterberg | | 5 |
| Classification des sols de subsurface | CPT | 2 | 2 | Granulométrie | 5 | 2 |
| | CPTU | 4 à 5 | 4 à 5 | Granulo+sédimento | | 4 |
| | | | | Teneur en eau | 2 | 3 |
| | | | | Limites d'Atterberg | | 5 |
| Densité en place | CPT, CPTU | 2 | 2 | Mesure poids volumique | | 4 |
| Résistance au cisaillement non drainée | CPT, CPTU | | 3 à 4 | Triaxial UU | | 2 à 3 |
| | VST | | 4 à 5 | Triaxial CIU | 4 | 4 |
| | PMT | | 2 à 3 | DSS | | 4 |
| | Tbar, Ball probe | | 4 à 5 | Fall cone, torvane | | 2 |
| | | | | Pénétromètre de poche | | 2 |

| Paramètres de sol | Essais in situ | | | Essais de laboratoire | | |
|--|-------------------------|---------------|-------------------------------|--|------------------|--------|
| | Type d'essai | Applicabilité | | Type d'essai | Applicabilité | |
| | | Sable | Argile | | Sable | Argile |
| Angle de frottement effectif | CPT, CPTU | 2 à 3 | 1 | Triaxial CIU, CID* | 5 ^(b) | 5 |
| | | | | Boîte de cisaillement | 4 | 1 |
| Sensibilité | CPT, CPTU | | 2 | Fall cone, lab vane | | 3 à 4 |
| | VST Tbar, ball probe | | 3 à 4 4 à 5 ^(c) | Triaxial UU sur matériau intact et remanié | | 3 à 4 |
| Déformabilité (G ₅₀ , E ₅₀) | PMT | 3 à 4 | 4 à 5 | Triaxial CIU, CID | 3 à 4 | 4 |
| | | | | DSS | 3 à 4 | 4 |
| Propriétés de consolidation | CPTU | 1 | 3 | Oedomètre | 3 ^(b) | 5 |
| Perméabilité | CPTU | | 3 | Oedomètre | 4 | 3 |
| | | | | Perméamètre | | 4 |

(a) doit être multitrace (multicanaux) lorsque la hauteur d'eau est inférieure ou égale à la pénétration cible (nécessité d'effacer le multiple)

(b) sous réserve de connaître la densité en place

(c) à condition de faire des essais cycliques

Tableau 5: Techniques pour applications particulières

| Paramètres de sol | Essais in situ | | | Essais de laboratoire | | |
|--|--|--|--|---|--------------------|--------|
| | Type d'essai | Applicabilité | | Type d'essai | Applicabilité | |
| | | Sable | Argile | | Sable | Argile |
| Interpolation lithographique | Sismique réfraction Résistivité électrique | 3 à 4 ^(a) 1 à 3 ^(b) | 3 à 4 ^(a) 1 à 3 ^(b) | | | |
| Identification des sols carbonatés | CPT, CPTU | 4 ^(c) | 3 | Teneur en carbonates | 5 | 5 |
| Compressibilité des sables carbonatés | | | | Oedomètre Ecrasabilité | 4 3 | |
| Anisotropie de résistance des argiles | | | | Triaxial CAUc, CAUe et DSS | | 5 |
| Réponse cyclique et effet de vitesse | | | | Triaxial CIU/CAU (statique/cyclique) DSS/CSS | 5 | 5 |
| Thixotropie | | | | Essai de thixotropie | | 4 |
| Comportement d'interface (pieux, caissons) | | | | Cisaillement annulaire (sol/sol et sol/acier) Boîte de cisaillement (sol/sol et sol/acier) | 3 à 4 3 à 4 | 3 à 4 |
| Module de cisaillement | Cône sismique | 4 à 5 | 4 à 5 | Colonne résonante Bender elements | 4 à 5 | 4 à 5 |

| Paramètres de sol | Essais in situ | | | Essais de laboratoire | | |
|---------------------------|--------------------------------|---------------|--------|--------------------------------|----------------------|--------|
| | Type d'essai | Applicabilité | | Type d'essai | Applicabilité | |
| | | Sable | Argile | | Sable | Argile |
| initial G_{max} | MASW | 3 à 4 | 3 à 4 | sur Triaxial, DSS ou oedomètre | 4 à 5 | 4 à 5 |
| Potentiel de corrosion | Cône de résistivité électrique | 4 | 4 | Résistivité électrique | 4 | 4 |
| Potentiel de liquéfaction | CPT, CPTU | 3 à 4 | | Triaxial cyclique | 3 à 4 ^(d) | |

(a) sous réserve d'une bonne calibration avec des essais in situ (CPT) ou sur échantillons

(b) mauvaise définition des interfaces et nécessité d'une calibration extensive sur essais in situ (CPT) ou sur échantillons

(c) les données CPT sont très sensibles au degré de cimentation

(d) sous réserve de bien connaître la densité en place

Tableau 6: Techniques spécifiques pour investigations dans les roches

| Paramètres de sol | Essais in situ | | Essais de laboratoire | |
|--|---------------------------------------|---------------|--|-----------------------|
| | Type d'essai | Applicabilité | Type d'essai | Applicabilité |
| Stratigraphie | Videologging | 3 à 5 | | |
| | Neutron | 3 à 4 | | |
| | Gamma-ray | 3 à 4 | | |
| Fracturation (fréquence et orientation) | Videologging | 3 à 4 | | |
| | Camera Eastman | 4 à 5 | | |
| Densité en place | Gammagraphie (gamma-gamma) | 3 à 4 | Mesure densité | 4 à 5 |
| Résistance | | | Essai de compression simple | 4 |
| | | | Essai Brésilien | 4 |
| | | | Essai Franklin | 1 ou 3 ^(a) |
| Déformabilité (G_{50} , E_{50}) | HPDT | 3 à 5 | Essai de compression simple avec jauges de déformation | 3 à 5 |
| Module de cisaillement initial G_{max} | Logging sismique (V_p ; V_s) | 4 à 5 | Mesures V_p ; V_s sur carottes | 3 à 4 |
| | MASW | 3 à 5 | | |

(a) sous réserve de corrélation avec la résistance à la compression simple

4. MODELE GEOLOGIQUE DE SITE

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.

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.

Chaque étape du modèle aide à optimiser le phasage, la nature et le contenu des campagnes de reconnaissance en tenant compte des connaissances antérieurement acquises.

Le modèle intègre les différents aléas géologiques susceptibles d'affecter le choix du type de fondation, le dimensionnement de celles-ci, ou leur construction. Les aléas géologiques à prendre en considération sont listés en section 5.2

Les aléas qui sont susceptibles d'affecter le projet doivent faire l'objet d'études spécifiques. Certaines études peuvent faire appel à des compétences hors du champ du présent document.

Les systèmes d'information géographique (SIG) peuvent constituer des outils efficaces pour la gestion des données et la construction du modèle géologique et géotechnique.

Les phases principales de la constitution du modèle sont décrites ci-après. Chacune d'entre elles représente une version améliorée de la précédente.

Phase 1 : Modèle géologique initial

La première version du modèle est réalisée à partir de l'étude sur documents (bibliographie, cartes bathymétriques, cartes géologiques régionales ou locales, études géotechniques sur la même zone ou à proximité,...), telle que détaillée en section 5.2. La qualité et la précision de ce premier modèle peuvent fortement varier selon que la zone concernée a fait ou non l'objet de recherches scientifiques et / ou d'études antérieures. Il doit normalement permettre d'établir les éléments suivants:

- Stratigraphie générale et lithologie des principales formations géologiques
- Eléments tectoniques
- Principaux aléas et contraintes géologiques

Phase 2 : Modèle stratigraphique (ou sismo-stratigraphique)

La deuxième phase du modèle est élaborée à partir des résultats des reconnaissances préliminaires (en particulier géophysiques), menées sur l'ensemble du champ (section 5.3, tableau 8). Les données bathymétriques sont utilisées pour établir un modèle numérique de terrain, et les données de sismique réflexion pour définir la géométrie des principales unités stratigraphiques. A ce stade, la transformation des temps de propagation des ondes sismiques en profondeurs est le plus souvent basée sur des hypothèses de vitesses de propagation dans les différentes strates. De ce fait la définition de la géométrie des unités stratigraphiques reste entâchée d'incertitude.

S'il existe à ce stade des sondages, les données correspondantes doivent être prises en compte pour préciser et calibrer les données géophysiques.

Le modèle stratigraphique permet de définir des zones de nature et de caractéristiques sismiques similaires permettant d'orienter les reconnaissances géotechniques préliminaires.

Phase 3 : Modèle géologique de site

Le modèle géologique de site est constitué de l'intégration des résultats de la reconnaissance géotechnique préliminaire (section 5.3, tableau 9) dans le modèle sismo-stratigraphique précédent. Les données géotechniques préliminaires vont permettre:

- D'améliorer le modèle de vitesse et donc d'affiner la géométrie des strates et leur variation latérale d'épaisseur,
- D'améliorer la caractérisation lithologique des strates,

- D'attribuer à ces strates des paramètres géotechniques préliminaires,
- De proposer une ébauche de provinces géotechniques.

Phase 4 : Modèle géotechnique

A ce stade, les données issues des reconnaissances détaillées (section 5.4, tableaux 10 et 11) sont intégrées dans le modèle. L'intégration des données géotechniques dans le modèle géologique de site doit permettre de préciser les provinces géotechniques précédemment proposées.

Cet exercice peut conduire à la définition d'unités géotechniques distinctes des unités sismo-stratigraphiques préalablement définies, et ce pour une des raisons suivantes:

- Plusieurs unités sismo-stratigraphiques peuvent présenter des paramètres géotechniques similaires,
- Au contraire, certaines unités sismo-stratigraphiques peuvent présenter des variations internes qui nécessitent la définition de plusieurs unités géotechniques en leur sein,
- Enfin, certains phénomènes non détectables à l'aide de méthodes géophysiques indirectes, (altération en particulier), peuvent affecter tout ou partie d'unités sismo-stratigraphiques.

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.

5. RECONNAISSANCES RECOMMANDEES

5.1. PHASAGE DES ETUDES

L'objectif des investigations de sols (études géologiques, reconnaissances géophysiques et géotechnique est de parvenir à une connaissance aussi complète que possible des conditions de sols de manière à :

- élaborer un modèle géologique et géotechnique du site (section 4).
- définir le ou les types de fondations le(s) mieux adapté(s) aux profils géotechniques établis et aux caractéristiques du projet

Par référence à la pratique internationale, le développement d'un champ d'éoliennes marines comporte 3 phases principales:

- une **phase préliminaire** destinée à établir la faisabilité technique et financière du projet ;
- la **phase de projet** proprement dite qui couvre les étapes liées à la conception et à la réalisation des ouvrages ;
- la **phase d'exploitation** dans laquelle le maître d'ouvrage se doit d'inspecter et de maintenir les ouvrages en état de fonctionnement.

Le tableau 7 présente une synthèse des différentes phases du développement d'un champ d'éoliennes marines.

i. PHASE PRELIMINAIRE

Le contexte français actuel de passation des marchés publics implique l'enchaînement de deux étapes dans le cours de la phase préliminaire :

- la première étape dite de **pré-projet** fait suite à un appel d'offre de la puissance publique : le soumissionnaire est amené à présélectionner un type de structure et de fondation associée, à effectuer un prédimensionnement et à évaluer un coût. La pertinence des choix effectués à ce stade et la représentativité des coûts estimés sont dans une large mesure tributaires de la représentativité du modèle géologique initial disponible à ce stade. Il appartient au soumissionnaire de définir les risques associés à son offre et de décider d'un éventuel investissement en travaux de reconnaissance pour les réduire. Le présent document n'émet aucune recommandation sur la nécessité d'engager des investigations sur site au cours de cette étape.

- la deuxième étape dite d'**avant-projet** ou de **confirmation des offres** s'étend sur une durée de 1 à 2 ans après attribution de la concession. Dans cette phase, la validité des options techniques retenues doit être démontrée et les évaluations financières doivent être affinées. En particulier tous les aléas géotechniques majeurs doivent être identifiés. Cette phase doit comporter un volume significatif de reconnaissances géophysiques et géotechniques. Les résultats de ces investigations alimentent les modèles sismostratigraphique et géologique de site. La nature et l'ampleur de ces reconnaissances préliminaires à mener pendant cette étape sont développées ci-après et résumées en section 5.3 (tableaux 8 et 9).

ii. PHASE DE PROJET

La phase projet comporte deux étapes : conception puis réalisation.

A l'issue de la phase projet, les paramètres géotechniques nécessaires pour le dimensionnement final et l'installation du système de fondation de chaque éolienne devront avoir été collectés. L'ampleur et la nature des reconnaissances dépendront en particulier du type de fondation retenu et de l'hétérogénéité de chaque site. Ce dernier critère peut être prépondérant dans le contexte géologique du plateau continental français.

La décision finale d'investissement est prise à l'issue de la phase de conception. Au cours de cette étape de conception, les aléas géotechniques importants doivent être identifiés. Le modèle géotechnique doit être finalisé. Il comprendra in fine des profils géotechniques de calcul applicables au droit de chaque éolienne ou par groupes d'éoliennes.

Lors de l'étape de réalisation du projet, des reconnaissances complémentaires pourront encore s'avérer nécessaires pour lever des risques mineurs ou localisés.

Les programmes des reconnaissances détaillées à mener en phase de projet sont développés ci-après et résumés en section 5.4 (tableaux 10 et 11)

iii. PHASE D'EXPLOITATION

En phase d'exploitation des ouvrages, des travaux d'inspection et de maintenance doivent être assurés par le maître d'ouvrage afin de garantir la stabilité et la sécurité à long terme des installations. Des campagnes d'inspection des fonds ou de reconnaissances complémentaires pourront par exemple être envisagées pour répondre à des problématiques particulières telles que les risques liés aux affouillements.

Il est par ailleurs recommandé d'organiser un retour d'information sur le comportement de l'ouvrage. Celui-ci passe par une instrumentation en service des structures et des fondations et par une analyse des données obtenues.

Tableau 7 : Phasage d'un projet de développement d'un champ d'éoliennes marines et organisation des reconnaissances et études géologiques et géotechniques

| Phases de projet | | | Objectifs de la phase de projet | Etudes géologiques, reconnaissances géophysiques et géotechniques à effectuer |
|---------------------|--------------------------|---------------------|---|---|
| | | | Levée des risques géotechniques | |
| Préliminaire | <i>Conceptual design</i> | Pré-projet | Présélection des types de structures et de fondations Estimation technique et financière du projet | Etude géologique (bibliographique) indispensable (DTS) Constitution du modèle géologique initial Reconnaissance géophysique et/ou reconnaissance géotechnique facultatives |
| | | Avant-projet | Levée des risques majeurs Confirmation des offres dans le contexte français Validation des options techniques Validation de l'estimation financière Etablissement des principes généraux de construction Choix du type de structures et de fondations Implantation des structures Prédimensionnement des fondations Faisabilité d'installation des fondations et des câbles | Reconnaissances géophysique et géotechnique préliminaires obligatoires. Objectif : - Identification des aléas géotechniques majeurs - Définition de la stratigraphie, de la lithologie - Constitution du modèle stratigraphique et du modèle géologique de site - Définition des paramètres géotechniques de prédimensionnement des fondations par province géologique- Caractérisation préliminaire des routes de câbles et des conditions d'installation |
| Projet | <i>Basic design FEED</i> | Conception | Levée des risques importants Validation des moyens de construction, des coûts et du planning. Dimensionnement par groupes d'éoliennes Décision d'investissement et passage en phase de réalisation | Reconnaissances géophysique et géotechnique détaillées obligatoire Objectifs : - Identification des aléas importants - Définition des profils stratigraphiques et des profils de paramètres géotechniques pour le dimensionnement des fondations |

| Phases de projet | | | Objectifs de la phase de projet | Etudes géologiques, reconnaissances géophysiques et géotechniques à effectuer |
|---------------------|-------------------------------|--|--|--|
| | | | Levée des risques géotechniques | |
| | | | | <ul style="list-style-type: none"> - Constitution du modèle géotechnique - Définition des conditions de pose et d'ensouillage des câbles <p>Essais de faisabilité d'installation ou d'ensouillage si nécessaires</p> |
| | <i>Detailed design</i> | Réalisation Etudes détaillées d'exécution | <p>Levée des risques mineurs ou localisés</p> <p>Etude détaillée de chaque éolienne. Dimensionnement par fondation. Prédiction d'ensouillage.</p> <p>Procédures détaillées d'installation des fondations et des câbles. Procédures de remédiation.</p> | <p>Reconnaissance(s) complémentaire (s) spécifiques si et selon nécessité</p> <p>Objectifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Identification des aléas mineurs ou localisés |
| | <i>Installation</i> | Installation | Suivi d'installation | Mise en oeuvre de contrôles |
| Exploitation | <i>Inspection Maintenance</i> | Inspection Maintenance | <p>Garantir la stabilité et la sécurité à long terme des ouvrages</p> <p>Organiser le retour d'information sur le comportement des ouvrages</p> | <p>Suivi d'affouillement (bathymétrie)</p> <p>Instrumentation en service et analyse des données</p> |

5.2. ETUDE SUR DOCUMENTS EXISTANTS

Cette étude initiale (désignée par Desk Top Study ou DTS dans le contexte anglo-saxon) consiste à récupérer et exploiter l'ensemble des données « bibliographiques » existantes et accessibles.

L'étude complète doit permettre d'identifier les aléas majeurs et les risques qui en découlent. Elle fait appel à des compétences diverses et porte généralement sur une compilation des informations concernant l'ensemble des conditions environnementales de site:

- Les conditions bathymétriques (profondeurs d'eau)
- Les conditions météo-océanologiques
- Les conditions géologiques et géotechniques
- La présence d'éléments anthropiques sur site : câbles ou conduites en service ou désaffectés, épaves, munitions non explosées (UXO) ou autres obstacles sur le fond ou enfouis
- Les activités de pêche
- Le trafic maritime
- Les activités de plaisance
- L'existence de réserves naturelles et/ou protégées
- Les zones d'interdiction (militaire, ...)

L'objectif de l'étude bibliographique géologique et géotechnique est de rassembler le maximum d'informations disponibles pouvant permettre de faire ressortir les aléas majeurs liés aux sols et d'orienter ou de définir le choix d'une solution de fondation réaliste. Les données peuvent concerner directement le site ou sa proximité.

Les conclusions de l'étude peuvent s'avérer primordiales dans l'appréciation de la faisabilité technique de certains types de fondations et des implications économiques sur le projet global. Dans tous les cas elles sont essentielles pour orienter les phases ultérieures.

On s'attachera à caractériser plus particulièrement les risques liés aux problématiques suivantes :

- Réseaux de failles et leur activité
- Zones fracturées
- Thalweg fossiles
- Conditions hydrogéologiques complexes, artésianisme

- Aléas sismiques
- Liquéfaction et mobilité cyclique des sables
- Gaz superficiels,
- Stabilité de pentes
- Karsts, cavités
- Erosion
- Mobilité des sédiments de surface, soit d'origine naturelle, soit liée à l'influence des structures, substructures et fondations
- Sols à comportements spécifiques (carbonatés, volcaniques, pollués ...)
- Présences d'éléments de grande taille (blocs,...) ou de zones indurées pouvant empêcher la construction des fondations
- Présence de sols susceptibles d'évoluer à l'échelle de la durée de vie des ouvrages

Ces informations seront à rechercher dans la littérature et les publications techniques, auprès d'organismes spécialisés : Ifremer, SHOM, BRGM,... fonds documentaires privés ou universitaires. L'expérience montre que des relevés géophysiques plus ou moins ré-exploitable peuvent être accessibles. Dans certains cas des données géotechniques acquises sur ou à proximité du site ou dans des formations de même nature peuvent s'avérer utiles et pertinentes.

Cette phase bibliographique débouche sur l'élaboration du modèle géologique initial et permet de définir :

- le niveau de connaissance des caractéristiques géologiques et géotechniques sur l'ensemble du site,
- les paramètres essentiels (morphologiques, stratigraphiques ou géotechniques) manquants pour la conduite des phases suivantes,
- les objectifs et spécifications des reconnaissances préliminaires géophysiques et géotechniques à conduire.

5.3. RECONNAISSANCES PRELIMINAIRES

A l'issue de la phase préliminaire de développement les aléas majeurs liés aux sols devront avoir été identifiés, les types de structure et de fondations devront être définis et le prédimensionnement des fondations devra permettre une estimation réaliste des coûts.

Ces objectifs nécessitent :

- D'une part, une bonne connaissance des caractéristiques géologiques et géophysiques du site ;
- D'autre part, une évaluation des caractéristiques géotechniques des matériaux et de leur variabilité spatiale.

Les données issues de la campagne géophysique préliminaire devront être disponibles le plus tôt possible, afin de prendre en compte des hétérogénéités géologiques éventuelles, et afin de spécifier correctement les objectifs de la campagne géotechnique qui suivra.

Les reconnaissances préliminaires doivent permettre d'identifier clairement les moyens tant géophysiques que géotechniques les mieux adaptés à la caractérisation des sols rencontrés sur le site et à privilégier pour les reconnaissances ultérieures.

Reconnaissance préliminaire géophysique

La reconnaissance préliminaire géophysique sur l'ensemble du site d'implantation des éoliennes doit permettre :

- d'établir la bathymétrie et la morphologie du fond,
- de définir les unités lithologiques et les structures tectoniques,
- de comprendre la configuration géologique du site,
- de proposer un modèle sismo-stratigraphique, au moins jusqu'à la profondeur d'influence des fondations,
- d'orienter la reconnaissance géotechnique de manière notamment à recueillir des données sur l'ensemble des provinces géologiques.

Les moyens mis en œuvre usuellement sont :

- échosondeur multi-faisceaux
- sonar latéral
- sismique réflexion

- géo-magnétométrie

Les moyens mis en œuvre permettent également de détecter les obstructions d'origine anthropique (épaves inconnues, câbles, munitions non explosées). Dans le cas de munitions non explosées (UXO), il faut préciser que, si le relevé des anomalies magnétiques liées à leur présence peut être mené lors de la campagne de géophysique, la spécification des données à recueillir et leur interprétation ne sont pas de la compétence du géophysicien. Les relevés magnétométriques sont d'ailleurs généralement réalisés lors de campagnes distinctes de la campagne géophysique pour répondre à des objectifs précis nécessitant un plan de quadrillage dense.

Les spécifications des matériels et leur mise en œuvre sont décrites dans le document « Geotechnical and geophysical investigations for offshore and nearshore developments » édité par l'ISSMGE

Le programme de **reconnaissance préliminaire géophysique recommandé** est décrit dans le Tableau 8.

Les quantités indiquées, conformes aux règles de l'art, sont considérées comme nécessaires. Elles pourront cependant être adaptées en fonction :

- Des informations disponibles telles que recensées lors de l'étude bibliographique (DTS),
- De la complexité avérée du site.

Une attention particulière devra être accordée aux techniques de sismique réflexion à mettre en œuvre dans le cadre de la reconnaissance géophysique. Les deux problématiques suivantes doivent en particulier être abordées :

- choix du type de source : il existe plusieurs types de source sismique, notamment électriques (Sparker), électromécanique (Boomer), piézoélectriques (Pinger), Chirp, chacune présentant des puissances et fréquences de signal émis différentes. Ces paramètres influent sur la précision des résultats ainsi que sur la profondeur de pénétration. Le choix de la technique devra donc être adapté aux objectifs de pénétration et de précision de la campagne. Il est de plus fréquent de tester en début de campagne géophysique plusieurs sources afin de déterminer laquelle fournit les meilleurs résultats. La mise en œuvre en parallèle de deux systèmes pendant la même campagne peut être nécessaire pour répondre à des objectifs différents de pénétration et de résolution (e.g. système Pinger avec pour objectif 5 ou 10 m de pénétration avec 0.2 m de résolution et système Sparker ou Boomer avec pour objectif 50 m de pénétration et 0.5 m de résolution)
- Sismique monotrace ou multitrace (UHRS). La sismique réflexion monotrace présente une limitation majeure en pénétration causée par le phénomène de réflexions multiples

entre la surface de l'eau et le fond marin. Les multiples du fond apparaissent à une pénétration équivalente à une fois la profondeur d'eau et il devient alors très difficile d'identifier les réflecteurs sous cette limite. Les objectifs de pénétration à atteindre dans le cadre de projets éoliens offshore étant généralement de 50 à 100 m, par des profondeurs d'eau comprises entre 15 et 40m, la sismique monotrace ne permet pas d'atteindre la pénétration requise avec suffisamment de précision. Une technique de sismique multi-trace, qui permet par traitement numérique d'enlever les multiples, doit donc généralement être mise en œuvre pour ce type de projet

La qualité des relevés géophysiques est par ailleurs dépendante des conditions de mise en œuvre des équipements et des caractéristiques du support naval. Il est communément admis que la vitesse du bateau doit rester inférieure à 4 nœuds et que les opérations ne doivent pas être menées dans des états de mer excédant force 4.

Tableau 8 : Programme de reconnaissance géophysique préliminaire recommandé

R : recommandation spécifique T : toléré

| Objectif | Méthode | Quadrillage | Pénétration | Remarques |
|--|---|---|---|---|
| Topographie du fond | Bathymétrie Multifaisceaux (MBES) | Couverture totale du champ avec recouvrement de 50% à 100% (T : recouvrement de 20%) | NA | Traitement des données MBES en retrodiffusion (backscattering) recommandé Echosondeur mono-faisceau pour calibration du MBES |
| Morphologie du fond Nature des sédiments de surface | Side Scan Sonar (bi-fréquence) | Couverture totale du champ avec recouvrement de 50 à 100 % | NA | R : prélever des échantillons pour calibrer la nature des sédiments : benne preneuse (ou carottier gravitaire), |
| Stratigraphie | Sismique réflexion mono ou multitrace Source : boomer ou sparker pour pénétrations importantes ; R : compléter par pinger/chirp pour faibles pénétrations | Quadrillage de 250 m x 1000 m (cross lines) | Typiquement 50 -100m selon conditions de sols/roches Résolution : < 1m en profondeur Pinger/chirp : Résolution < 0.3m | Couverture de la totalité du champ Sismique de surface nécessaire sur routes de câbles (cf. Chap. 6.4.5) |

Reconnaissance préliminaire géotechnique

Une **reconnaissance préliminaire géotechnique** doit permettre sur l'ensemble du site des éoliennes d'établir un profil géotechnique type sur chaque province géologique mise en évidence lors de l'interprétation des données géophysiques :

- stratigraphie,
- nature des sols et identification,
- propriétés géotechniques de base : résistance mécanique, déformabilité, histoire des contraintes;

Ces objectifs peuvent être atteints par la réalisation :

- de sondages avec prélèvement d'échantillons intacts et essais de laboratoire ;
- d'essais in situ ;
- d'une combinaison des deux types précédents.

Le programme préliminaire de reconnaissance géotechnique recommandé est décrit dans le Tableau 9.

Les moyens nautiques et de reconnaissance doivent être compatibles avec les objectifs proposés.

Les spécifications des matériels, leur mise en œuvre et les exigences en termes de qualité sont décrites dans les documents « Geotechnical and geophysical investigations for offshore and nearshore developments » de l'ISSMGE déjà cité et ISO/DIS 19901-8 « Petroleum and natural gas industries - Specific requirements for offshore structures - Part 8 : Marine soil investigations »

La campagne doit être conçue de manière à fournir les éléments indispensables pour :

- Renseigner le modèle géologique de site. Pour cela la pénétration des sondages doit être suffisante pour recouper les principales formations et appréhender leur configuration à l'échelle du site. Les profondeurs sont à définir par le géotechnicien selon le contexte local. Typiquement des pénétrations de 30 à 50 mètres, voire supérieures sur certains sondages et pour des configurations particulières, sont à privilégier en liaison avec l'examen des données géophysiques.
- Fournir les paramètres géotechniques requis pour un prédimensionnement des fondations envisagées par province géologique. Il est vivement recommandé de combiner essais in situ et prélèvement d'échantillons. Les profils de paramètres géotechniques doivent pouvoir être établis sur la hauteur d'influence des fondations.
- Evaluer la variabilité des données géotechniques sur l'ensemble du site.

Lorsque les provinces géologiques sont en nombre réduit, la réalisation de sondages jumelés peut être intéressante à ce stade si les conditions de sols le permettent. Par sondage jumelé on entend un sondage avec carottage continu et un sondage avec essais CPT continus réalisés à quelques mètres de distance. Cette technique introduite en travaux pétroliers offshore (voir par exemple Borel et Puech, 2010) permet une bonne intercorrélation des données géotechniques et d'extrapoler par la suite les données sur la base de sondages CPT seuls, plus rapides et économiques à exécuter.

Dans le cas de sites très hétérogènes, il pourra s'avérer plus pertinent en reconnaissance préliminaire de multiplier les sondages de façon à couvrir les principales provinces géologiques en alternant dans un même sondage prélèvement et essais in-situ.

La pratique internationale actuelle montre qu'un nombre de sondages de l'ordre de 10% du nombre d'éoliennes à installer permet d'atteindre les objectifs fixés sur la plupart des sites. Ce pourcentage ne doit toutefois pas être considéré de manière restrictive mais plutôt indicative, le volume des investigations à réaliser pouvant varier en fonction de l'hétérogénéité du site. Dans le cas de provinces géologiques nombreuses, le nombre de sondages nécessaires peut être significativement plus important. Il est recommandé d'introduire suffisamment de flexibilité dans le contrat de reconnaissance pour adapter le programme final à la complexité du site telle que révélée par les premiers sondages.

Dans tous les cas, l'expertise du géotechnicien devra être sollicitée et prise en compte pour optimiser le programme de reconnaissance.

Tableau 9 : Programme de reconnaissance préliminaire géotechnique recommandé

| Objectif | Méthode | Programme | Pénétration | Remarques |
|---|--|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Stratigraphie • Nature des sols et identification, • Propriétés géotechniques de base • Profil géotechnique type sur chaque province géologique • Evaluation des caractéristiques géotechniques des matériaux et de leur variabilité spatiale | <p>Sondages carottés + Sondages avec essais in situ de type CPTU, PMT ou HPDT et/ou avec diagraphies (radioactivité naturelle, Vp, Vs, imagerie)</p> | <p>Réalisation de sondages jumelés* : - 1 sondage avec carottage continu - 1 sondage avec essais in situ Au minimum un couple de sondage dans chaque province géologique</p> <p style="text-align: center;">OU / ET</p> <p>Sondages isolés de type : - Sondage alterné** CPTU/carottage - sondage avec CPTU aussi continu que possible si pertinent - sondage avec carottage continu et diagraphies</p> <p>A répartir sur l'ensemble du champ pour établir la variabilité spatiale du site.</p> | <p>Suffisante pour :</p> <p>1- recouper les principales formations et appréhender leur configuration à l'échelle du site</p> <p>2- établir des profils de paramètres géotechniques sur la hauteur d'influence des fondations</p> | <p>* Sondages jumelés à privilégier si pertinents et nombre de provinces géologiques réduit</p> <p>** Les sondages alternés peuvent constituer une solution économiquement attractive en phase préliminaire</p> |

5.4. RECONNAISSANCES DETAILLEES

La phase de projet comporte deux étapes :

- la phase de conception, qui doit permettre de caractériser les aléas importants et à l'issue de laquelle les paramètres géotechniques doivent être connus avec suffisamment de précision pour procéder au dimensionnement des fondations, individuellement ou par groupes d'éoliennes. Les moyens de construction, les coûts et le planning doivent pouvoir être validés ;
- la phase de réalisation au cours de laquelle sont effectuées les études d'exécution.

Les reconnaissances détaillées sont destinées à couvrir l'ensemble des besoins de la phase de projet. Une seule reconnaissance géophysique détaillée et une seule reconnaissance géotechnique détaillée pourront le plus souvent répondre aux objectifs. Toutefois des reconnaissances complémentaires spécifiques pourront s'avérer nécessaires en phase de réalisation pour lever des incertitudes liées à des risques mineurs ou localisés.

Reconnaissance géophysique détaillée

La campagne de reconnaissance géophysique détaillée est destinée à compléter les reconnaissances géophysiques déjà réalisées au stade d'avant-projet. Les objectifs de cette campagne sont les suivants :

- Fournir des données plus précises (bathymétrie, morphologie du fond marin, obstructions) sur les emplacements des ouvrages ;
- Compléter les données existantes de sismique réflexion au droit des ouvrages, avec des objectifs spécifiques en terme de pénétration et de résolution ;
- Fournir des données complémentaires en utilisant les techniques dites d'« ingénierie géophysique » (sismique réfraction, ondes de surfaces, résistivité électrique). Ces techniques seront employées uniquement si les objectifs le nécessitent.

Le Tableau 10 indique le type de programme de reconnaissance géophysique détaillée recommandé.

Tableau 10 : Programme de reconnaissance géophysique détaillée recommandé

T : toléré

| Objectif | Méthode | Quadrillage | Pénétration | Remarques |
|--|---|---|---|---|
| Topographie du fond | Bathymétrie Multifaisceaux (MBES) | Couverture de chaque emplacement d'ouvrage avec recouvrement de 100% | NA | Taille dépendante du type d'ouvrage (éoliennes, mât météorologique, station de transformation et câbles). |
| Morphologie du fond Obstructions de surface | Side Scan Sonar (bi-fréquence) | Couverture de chaque emplacement d'ouvrage avec recouvrement de 100% | NA | Taille dépendante du type d'ouvrage (éoliennes, mât météorologique, station de transformation et câbles). |
| Stratigraphie | Sismique réflexion mono ou multitrace Source : -boomer ou sparker pour pénétrations importantes -chirp pour faibles pénétrations | Deux lignes perpendiculaires par ouvrage | Selon type de fondation et objectifs particuliers | |
| Mesure de vitesse des ondes de compression Vp par sismique réfraction | Réfraction (traînée sur le fond ou statique) | Sur emplacements d'ouvrages : à définir selon objectifs route de câble : un profil continu | 5 à 20 m selon objectifs 5 m | |
| Mesure de vitesse des ondes de cisaillement Vs par ondes de surface | MASW | Sur emplacements d'ouvrages : à définir selon objectifs | 5 à 15 m selon objectifs | |

Reconnaissance géotechnique détaillée

Le dimensionnement final des fondations et les études d'installation supposent la définition d'un profil de paramètres géotechniques applicable au droit de chaque éolienne.

Par principe, il conviendra lors de la **campagne géotechnique détaillée** d'exécuter au moins un sondage représentatif par emplacement d'éolienne quel que soit le type de fondation envisagé.

Le nombre de sondages représentatifs pourra être exceptionnellement réduit s'il peut être démontré que l'homogénéité du site ou d'une partie du site est suffisante pour permettre d'interpoler les données géotechniques à certains emplacements. Cette démonstration devra s'appuyer sur un modèle géologique de grande qualité, une analyse de risque détaillée et un travail d'intégration approfondi de données géophysiques et géotechniques. Les méthodes de la géostatistique pourront s'avérer utiles.

Sur les sites caractérisés par une hétérogénéité géologique et géotechnique marquée, et dans le cas où il est envisagé des fondations de type gravitaire, il sera nécessaire de réaliser au minimum trois sondages périphériques en plus du sondage profond « central » pour s'assurer de l'homogénéité des conditions de sol de subsurface sur une profondeur au moins égale à 10 m ou jusqu'au refus (sondage pénétrométrique). Dans le cas où il est envisagé des fondations équipées de jupes, il conviendra de s'assurer que la profondeur atteinte est au moins égale à la pénétration prévisible des jupes plus 2 mètres.

Pour les fondations sur pieux, la hauteur d'influence de la fondation est au moins égale à la pénétration du pieu (hauteur du fût) augmentée de la zone d'influence de la pointe. Celle-ci est généralement estimée à 3 diamètres pour des pieux de diamètres usuels (< 2m). Pour les pieux de monopodes de très grand diamètre où la capacité est essentiellement assurée par frottement, la zone d'influence sous le pieu peut être limitée à 0,5 fois le diamètre du pieu

Pour les fondations gravitaires la zone d'influence vis-à-vis de la capacité portante pourra être limitée par la profondeur de la ligne de rupture la plus profonde compatible avec les caractéristiques (inclinaison) de la charge maximale appliquée. La zone d'influence vis-à-vis des tassements peut être importante dans les sols compressibles et atteindre jusqu'à 1,5 fois le diamètre de la fondation. Dans tous les cas, en présence d'un substratum, la zone d'influence pourra être limitée à la profondeur de ce substratum.

Le Tableau 11 indique le type de programme de reconnaissance géotechnique détaillé recommandé.

Tableau 11 : Programme de reconnaissance géotechnique détaillée recommandé

| Objectif | Méthode | Type de fondation | Programme | Pénétration | |
|---|--|--|--|---|-------|
| <ul style="list-style-type: none"> • dimensionnement final des fondations • études d'installation | <p>Sondages carottés</p> <p>Sondages avec essais in situ de type CPT/CPTU</p> <p>Sondages avec essais in situ de déformation (PMT, HPDT)</p> <p>Sondages mixtes avec carottages et essais in situ alternés</p> | SUR PIEUX | 1 sondage au centre de chaque emplacement d'éolienne | Longueur prévisible des pieux + 3D minimum | |
| | | ----- | ----- | ----- | ----- |
| | | MONOPIEU | 1 sondage au centre de chaque emplacement | Longueur prévisible des monopieux + 0.5D minimum | |
| | | ----- | ----- | ----- | ----- |
| | | GRAVITAIRE | 1 sondage au centre de chaque emplacement | 1.5 x Largeur de la fondation ou pénétration de 2m min. dans substratum | |
| | | + | 3 sondages sur la périphérie** | Sur 10 m de profondeur minimum ou jusqu'au refus (CPT) | |
| ----- | ----- | ----- | ----- | | |
| SUPER - FICIELLE AVEC JUPES | 1 sondage au centre de chaque emplacement | 1.5 x Largeur de la fondation ou pénétration de 2m min dans substratum | | | |
| + | 3 sondages CPT sur la périphérie | Hauteur des jupes + 2 m; min. 5m | | | |
| ----- | ----- | ----- | ----- | | |
| ANCRAGE | 1 sondage au droit de chaque ancrage | Selon type d'ancrage et nature des sols- | | | |

** en cas d'hétérogénéité géologique ou géotechnique marquée

Lorsque des fondations sur pieux sont envisagées dans des sols pour lesquels on ne dispose pas de méthode de dimensionnement éprouvée (par exemple : sols carbonatés ou volcaniques, craies, roches tendres), il pourra être pertinent de réaliser un ou plusieurs essais préalables de chargement sur un ou plusieurs pieux d'essais. Le(s) pieu(x) d'essai devront être mis en place selon la technique envisagée pour les fondations des éoliennes. Idéalement les essais sont à réaliser sur le site même des éoliennes. Toutefois compte tenu du coût élevé de tels essais, il pourra être opportun de réaliser les essais sur un site terrestre présentant des caractéristiques similaires, et à une échelle réduite.

Lorsque le battage dans des formations dures ou rocheuses est envisagé, il pourra être pertinent de réaliser au préalable un ou plusieurs essais de faisabilité pour s'assurer de la possibilité de mettre en place les pieux et garantir leur intégrité structurelle. Idéalement les essais sont à réaliser sur le site même des éoliennes. Toutefois compte tenu du coût élevé de tels essais, il pourra être opportun de réaliser les essais sur un site terrestre présentant des caractéristiques similaires et à une échelle réduite.

Dans le cas où il est envisagé de réaliser des essais sur site (en mer ou à terre) à une échelle réduite, il faut prendre en compte les effets d'échelle. Les effets d'échelle en géotechnique proviennent du non respect des conditions de contraintes entre le modèle réduit et la fondation réelle et/ou du non respect de la taille relative des éléments de sol vis-à-vis des dimensions du modèle. Il en résulte des distorsions sur les contraintes et/ou les déformations mesurées sur le modèle qui ne peuvent être simplement extrapolées à la fondation réelle. Dans le cas d'essais à échelle réduite sur un site (en mer ou à terre) le matériau sol utilisé pour le modèle et celui de la fondation sont réputés identiques. Il faut alors s'assurer que les dimensions du modèle sont suffisamment proches de celles de la fondation pour ne pas trop distordre les niveaux de contraintes et les dimensions relatives du modèle pour que les phénomènes observés et les quantités mesurées soient directement extrapolables. Pour la plupart des problématiques envisageables, une réduction d'échelle de 1/2 à 1/3 peut être considérée comme acceptable. Le pieu devra présenter des caractéristiques géométriques (rapport longueur battue/diamètre) et structurelles (rapport diamètre pieu/épaisseur tube) compatibles avec la nature des phénomènes induits par le battage (formation d'un bouchon, risques d'instabilité structurelle).

5.5. ROUTES DE CABLES

Les routes de câbles se déploient entre les éoliennes sur le champ même et entre le champ et la côte. Les câbles sont le plus souvent ensouillés (dans la limite des contraintes technico-économiques) afin d'assurer leur protection, garantir leur stabilité et/ou ne pas obstruer le fond marin. Les profondeurs d'ensouillage n'excèdent généralement pas 2 mètres sauf par exemple sur des zones d'ancrage de bateaux ou dans l'emprise de chenaux entretenus.

La reconnaissance des routes de câbles s'effectuera en principe en deux étapes.

La **première étape** est destinée à:

- orienter le choix de la disposition des corridors de câbles,
- évaluer le risque encouru par les câbles et définir leur niveau de protection
- définir la profondeur d'enfouissement cible
- déterminer la faisabilité des moyens de pose et d'ensouillage.

Cette première étape se déroule normalement lors de l'Avant-Projet (Tableau 7). Elle se compose d'une reconnaissance géophysique complétée par une reconnaissance géotechnique légère.

Reconnaissance de première étape

La **reconnaissance géophysique de première étape** doit comporter en principe:

- des relevés bathymétriques et des explorations au sonar latéral sur l'emprise totale de la zone d'implantation des éoliennes et des tracés de câbles anticipés ;
- des explorations sismiques de subsurface sur quelques lignes types sélectionnées en fonction de leur intérêt particulier (alignement d'éoliennes, tracé anticipé des câbles entre le site et la côte, etc.)

Les moyens mis en œuvre sont de même nature que ceux utilisés pour la reconnaissance préliminaire géophysique du site. Il est généralement réalisé une seule campagne géophysique préliminaire qui doit permettre d'atteindre les objectifs fixés pour les routes de câbles. Toutefois les moyens de sismique réflexion devront être sélectionnés de manière à privilégier la précision dans les premiers mètres sous le fond marin plutôt que la pénétration.

La reconnaissance géophysique doit être complétée par une caractérisation directe des matériaux présents sur les premiers mètres sous le fond marin. Les profondeurs concernées sont entre 1 et 5 mètres avec une profondeur cible qui sera le plus souvent de 3 mètres. La détermination préliminaire des pro-

priétés physiques et mécaniques des sols de surface et subsurface peut être obtenue, en complément des informations recueillies lors des sondages profonds effectués par ailleurs, par la mise en oeuvre d'outils géotechniques légers, c'est-à-dire ne nécessitant pas de moyens navals importants (voire pouvant être opérés à partir du support naval utilisé pour réaliser les relevés de géophysique) :

- Grab-sampler (limité à l'identification des sols de surface)
- Carottier gravitaire
- Vibrocarottier
- CPT opéré à partir d'un bâti de fond
- Carottier en rotation opéré à partir d'un bâti de fond (dans le cas d'un fond rocheux)

La fréquence des prélèvements doit en toute rigueur être fonction de la variabilité latérale des sédiments. A ce stade, cette variabilité latérale reste a priori inconnue. On peut considérer qu'une évaluation statistique des propriétés des sols concernés par l'ensouillage des câbles peut être approchée en disposant de quelques dizaines de sondages judicieusement répartis soit sur l'ensemble du site des éoliennes et sur le tracé présumé site-côte, si les routes de câbles ne sont pas définies à ce stade, soit plus directement sur les routes, si un tracé provisoire a été établi. La détermination du nombre de points de sondage à réaliser et leur localisation devra s'effectuer sur la base des données des relevés géophysiques. Les informations recueillies aux emplacements des sondages profonds pourront être utilisées mais ne fourniront pas toujours des données pertinentes sur les premiers mètres.

Des mesures de conductivité thermique in situ ou sur carottes en laboratoire, habituellement requises pour le dimensionnement des câbles, pourront compléter les reconnaissances géotechniques.

Tableau 12 : Programme de reconnaissance préliminaire recommandé pour routes de câbles

| Objectif | Méthode | Quadrillage | Pénétration | Remarques |
|---|---|--|--|--|
| Topographie du fond | Selon Tableau 8 | | | |
| Morphologie du fond | Selon Tableau 8 | | | |
| Nature des sédiments de surface | Selon Tableau 8 | | | |
| Stratigraphie | Selon Tableau 8 Privilégier la précision sur les 5 à 10 premiers mètres au détriment de la pénétration | | | |
| Caractérisation de la nature et de la résistance des sols et roches sur la hauteur prévisible d'ensouillage des câbles | Suivant contexte : Carottage gravitaires, Vibrocarottage, carottage en rotation CPT/CPTU opéré à partir d'un bâti de fond | Typiquement 20 à 30 points de sondage pour un site de 100km ² | Le plus souvent 2 à 3 mètres selon profondeur d'ensouillage envisagée, exceptionnellement jusqu'à 5m | Souvent réalisé dans le cadre de la reconnaissance préliminaire géotechnique |
| Isolation thermique | Mesures de conductivité thermique: in situ par sonde mise en place par fonçage ou sur carottes prélevées | Quelques mesures par province géotechnique | Le plus souvent 2 à 3 mètres selon profondeur d'ensouillage envisagée | |

Reconnaissance de deuxième étape

La **seconde étape** est destinée à:

- permettre le routage des câbles dans les corridors préalablement définis,
- confirmer / préciser les profondeurs cibles d'enfouissement en fonction de la protection recherchée, et leur variation le long de la route,
- déterminer les moyens d'ensouillage adaptés aux conditions de sols (technique adaptée, type de machine et d'outils, puissances requises, ...)

- prédire les conditions opérationnelles (vitesse d'avancement notamment) et leur variation le long de la route de câbles,
- localiser les zones nécessitant un traitement particulier (remontée rocheuse, obstruction à contourner etc....).

Cette seconde étape se déroule en phase de **conception**

Elle se compose nécessairement:

- d'une reconnaissance géophysique à base de sismique haute résolution sur les corridors de câbles préalablement définis ;
- d'une reconnaissance géotechnique spécifique le long de la route de câble définie.

Elle pourra éventuellement être suivie d'essais d'ensouillage destinés à démontrer la faisabilité d'une technique particulière ou comparer les performances de plusieurs techniques.

Le routage sera préférentiellement effectué avant la reconnaissance géotechnique afin que les points de sondages soient bien localisés sur le tracé projeté.

Si une contrainte UXO existe sur le site, la reconnaissance UXO pourra être (avec une réserve quant à sa validité limitée dans le temps) réalisée avant le routage de façon à optimiser lors du routage le nombre d'anomalies magnétiques à identifier.

La reconnaissance géophysique comportera la réalisation d'une bathymétrie et d'une reconnaissance par sonar latéral de haute résolution, complétée si besoin par de la sismique réflexion de surface et par des relevés de type « géophysique d'ingénierie » (sismique réfraction de surface).

La reconnaissance géotechnique comportera la réalisation de sondages sur l'axe des tracés de câbles au moyen de CPTs et/ou de sondages carottés (ou vibrocarottés) judicieusement alternés ou jumelés de manière à disposer à chaque emplacement d'un profil géotechnique sur les 3 premiers mètres de pénétration. La fréquence de sondage devra être adaptée aux conditions de site. Un espacement de l'ordre de 500 à 1000m pourra être acceptable sur des sites réputés homogènes. Sur des sites dont la géologie de subsurface est complexe, une information tous les 300m environ pourra s'avérer pertinente.

Les données recueillies, de nature géophysique et géotechnique, doivent ensuite être corrélées de manière à produire un modèle de terrain aussi continu que possible le long du tracé et sur la hauteur d'ensouillage.

Des systèmes de mesures géophysiques à base de sismique réfraction traînés sur le fond permettent une caractérisation des sols en termes de vitesses d'ondes de compression (V_p). La constitution d'un

profil continu de vitesses le long des routes de câbles facilite grandement l'intégration des données et la constitution du modèle de terrain. La mise en œuvre de ces techniques est particulièrement recommandée lorsque les conditions de sols sont jugées difficiles pour l'ensouillage des câbles, notamment en cas de suspicion de présence de rocher ou de couche indurée à faible profondeur.

On attire l'attention sur les aspects suivants :

- En présence de conditions de sols durs en surface ou près de la surface, les méthodes de géophysique à base de sismique réflexion ne permettent pas de définir les conditions de sols avec une précision suffisante pour les besoins d'une étude d'ensouillage ;
- Une reconnaissance insuffisante ou non pertinente se traduit le plus souvent par des difficultés opérationnelles, des pertes de temps et des surcoûts importants lors des travaux d'ensouillage.

Tableau 13 : Programme de reconnaissance complémentaire type dans le cadre de la 2^{ème} étape pour routes de câbles

| Objectif | Méthode | Quadrillage | Pénétration | Remarques |
|---|---|--|--|--|
| Topographie du fond | Bathymétrie Multi-faisceaux (MBES) | Corridor de 200 m* Centré sur axe du câble avec recouvrement de 50% à 100% | NA | *Largeur du corridor à définir en fonction de l'hétérogénéité de la géologie de surface et de la densité d'obstruction |
| Morphologie du fond Nature des sédiments de surface si traitement du signal approprié (retrodiffusion ou « backscattering ») | Side Scan Sonar | Corridor de 200 m* Centré sur axe du câble avec recouvrement de 100% | NA | *Largeur du corridor à définir en fonction de l'hétérogénéité de la géologie de surface et de la densité d'obstruction |
| Stratigraphie | Sismique réflexion HR Source : à définir suivant la géologie (pingger /chirp) | Un passage sur axe du câble et deux passages à une distance de 100m de part et d'autre Recouvrements transversaux réguliers (300m à 500m environ) | Privilégier la précision sur les 3 à 5 premiers mètres | |
| Caractériser en continu les conditions de sols sur la hauteur d'ensouillage au moyen des vitesses acoustiques (Vp, Vs) | Sismique réfraction THR mise en œuvre près du fond (système trainé sur le fond ou remorqué près du fond) Optionnel : combiner sismique réfraction et mesures en MASW | Passage sur l'axe du câble | 3 à 5m | Les flûtes seront de type court (typiquement 24m) avec un minimum de 24 géophones répartis de manière à fournir un maximum de précision sur les 2 à 3 premiers mètres) |
| Caractériser ponctuellement la nature et la résistance des sols et des roches sur la hauteur prévisible d'ensouillage des | CPT/CPTU opéré à partir d'un bâti de fond Carottages gravitaires, Vibrocarottages, Carottages en rotation à partir de sondeuses | Un point de sondage tous les 300 à 1000 m selon complexité des conditions géologiques de subsurface | Le plus souvent 2 à 3 mètres selon profondeur d'ensouillage envisagée, ex- | |

| | | | | |
|-----------------------------|---|--|---|--|
| câbles | immergées. | | ception- nellement jusqu'à 5m | |
| Isolation thermique* | Mesures de conductivité thermique : in situ par sonde mise en place par fonçage ou sur carottes prélevées | Quelques mesures par province géotechnique | Le plus souvent 2 à 3 mètres selon profondeur d'ensouillage envisagée | |

* si besoin et pas obtenu en phase préliminaire

5.6. SOUS-STATION

Un réseau de câbles sous-marins assure l'interconnexion des turbines et dirige l'ensemble de la production vers une (ou plusieurs) sous-station(s) située(s) dans l'emprise ou à la périphérie immédiate du champ. Le rôle d'une sous-station est de centraliser la production et de la reconditionner pour être exportée par câble vers la terre.

Les sous-stations sont des structures relativement chargées (transformateurs), le plus généralement constituées de structures de type jacket fixées au sol par des pieux (battus ou forés).

La reconnaissance géophysique et géotechnique des sols pour l'implantation des sous-stations pourra être combinée avec les différentes campagnes (préliminaires et détaillées) réalisées pour les turbines. On se reportera aux indications des tableaux 8 à 11. La méthodologie et les moyens à mettre en œuvre sont identiques.

Selon la complexité des conditions de sol à l'emplacement de la sous-station, la définition du profil de paramètres de sol pour l'ingénierie des fondations de la plate-forme devra être basée au minimum sur les données d'un sondage alterné (essais in situ et prélèvements avec essais de laboratoire) ou de deux sondages jumelés, l'un avec essais in situ et l'autre avec carottages et essais de laboratoire.

5.7. MAT METEO

L'installation d'un mât météo sur un site de ferme éolienne est fréquente mais pas systématique. Le mât météo est généralement constitué d'une structure réticulée légère.

Les fondations du mât météo sont le plus souvent constituées d'un monopieu ou d'une structure support de type réticulé fixée par pieux. Dans l'hypothèse où le mât météo est installé très tôt dans le processus de développement du champ, il peut servir de banc d'essais pour les futures fondations des turbines.

La planification des reconnaissances à conduire pour l'implantation du mât météo ne sera généralement pas compatible avec celle des reconnaissances destinées aux turbines.

Il sera le plus souvent nécessaire de planifier une campagne géophysique spécifique centrée sur la zone retenue pour la mise en place du mât. Cette campagne sera du type campagne géophysique préliminaire telle que définie pour les turbines (voir section 5.3 et Tableau 8) comprenant des relevés bathymétriques et des explorations au sonar latéral sur une superficie de l'ordre du kilomètre carré et des explorations sismiques de subsurface sur quelques lignes se croisant au droit de l'emplacement présumé du support.

Il conviendra en outre de disposer au minimum d'un sondage géotechnique alterné (essais in situ et carottages avec essais de laboratoire) au droit du support. La pénétration de ce sondage sera fonction du type de fondation envisagé (voir section 5.4 et Tableau 11)

Dans l'hypothèse où le mât météo serait installé tardivement, les reconnaissances correspondantes pourraient être intégrées dans la phase de reconnaissance préliminaire des turbines.

LEXIQUE

Alea géologique:

Evènement géologique dont l'occurrence éventuelle serait susceptible de générer des effets défavorables sur les objectifs du projet

Atterrage :

Zone d'arrivée à la côte d'un câble sous-marin

Ecrasabilité:

Susceptibilité à la rupture des grains de sols sous contrainte. Ce phénomène est particulièrement important dans les sables carbonatés.

Etudes de terrain :

Les études de terrain comprennent l'ensemble des études géologiques, géophysiques et géotechniques. Elles incluent toutes les activités effectuées sur le terrain ou au bureau permettant d'établir les modèles géologiques et géotechniques de la zone d'étude.

Géotechnicien :

Le géotechnicien est la personne physique ou morale qui réalise des prestations d'investigations géotechniques et/ou d'ingénierie géotechnique.

Hauteur d'influence

La hauteur d'influence d'une fondation se caractérise par la profondeur sous la surface du sol au-delà de laquelle les propriétés des matériaux rencontrés ne sont plus susceptibles d'impacter le comportement de la fondation aussi bien en termes de capacité portante que de déplacements sous chargements cycliques ou à long terme (tassements par consolidation et fluage)

Investigations :

Les investigations comprennent l'ensemble des reconnaissances et l'exploitation des données recueillies

Profil géotechnique :

Succession d'unités géotechniques d'épaisseur définie

Profil stratigraphique :

Succession d'unités stratigraphiques définies par leur lithologie et leur épaisseur

Province géologique :

Partie du site caractérisée par une même succession d'unités géologiques. La notion de province géologique peut évoluer en cours de projet notamment en fonction des données sismo-stratigraphiques.

Province géotechnique :

Partie du site caractérisée par un même profil géotechnique ou plusieurs profils géotechniques présentant une même succession d'unités géotechniques

Reconnaitances :

Ensemble des opérations effectuées sur site pour recueillir des informations géologiques, géophysiques et géotechniques sur les sols et les roches tels que leur nature, leur composition, leur structure, leur répartition spatiale, leurs caractéristiques physiques, chimiques, géomécaniques et hydrogéologiques. Ces opérations peuvent être de nature intrusive (mise en œuvre de matériel de forage et de sondage, mesures et essais géotechniques in situ et en laboratoire) ou indirectes (mesures géophysiques)

Risque:

Effet défavorable d'une incertitude ou d'un aléa sur les objectifs du projet

Risque géotechnique majeur :

Risque pouvant remettre en cause le projet

Risque géotechnique important :

Risque pouvant justifier des changements significatifs en phase de conception

Risque géotechnique mineur :

Risque pouvant justifier des adaptations en phase de réalisation/exécution

Routage:

Ensemble des études permettant l'optimisation du tracé d'un câble sous-marin en tenant compte de la topographie et de la nature du fond marin ainsi que des contraintes ou obstructions de nature anthropique ou naturelle.

Sondage représentatif :

Un sondage peut être considéré comme représentatif vis-à-vis d'un problème géotechnique particulier s'il apporte des éléments adaptés en termes de profondeur et de contenu de l'information.

Note 1. Le sondage doit être suffisamment profond pour renseigner sur une hauteur au moins équivalente à la hauteur prévisible d'ensouillage d'un câble, à la pénétration d'une jupe ou à la hauteur d'influence d'une fondation.

Note 2. Les paramètres géotechniques recueillis doivent permettre d'apporter des éléments probants vis-à-vis du problème géotechnique posé. Par exemple : un simple forage avec enregistrement de paramètres pourra être jugé représentatif pour une recherche de cavité. De même un essai pénétrométrique pour estimer la pénétrabilité d'une jupe. En revanche pour être considéré représentatif vis-à-vis d'une étude de fondation, le sondage devra contenir des informations suffisantes en quantité et en qualité pour permettre l'établissement d'un profil de paramètres géotechniques.

Substratum :

On désigne par substratum, dans ce document, une formation dont les caractéristiques mécaniques sont telles que, compte tenu des dimensions de la fondation et des charges qui lui sont appliquées, d'une part aucune ligne de rupture n'est susceptible de s'y développer et d'autre part, la compressibilité est suffisamment faible pour être négligée dans le calcul des tassements de la fondation.

Unité géologique :

Formation de sol ou de roche définie par son histoire géologique et sa lithologie

Unité géotechnique :

Formation de sol ou de roche définie par une homogénéité de paramètres géotechniques : paramètres d'identification, paramètres d'état et paramètres mécaniques

Unité sismo-stratigraphique :

Formation de sol ou de roche définie à partir de données géophysiques de sismique réflexion caractérisée par un faciès sismique et délimitée par des réflecteurs

REFERENCES

- ARGEMA – CLAROM (1994) *Foundations inn carbonate soils*. Design guides for offshore structures. Editions Technip, Paris
- ARGEMA (1992) *Offshore pile design*. Design guides for offshore structures. Editions Technip, Paris
- Borel D., Puech, A. and Po S. (2010) *A site investigation strategy to obtain fast-track shear strength design parameters in deep water soils*. 2nd International Symposium Offshore Frontiers in Geotechnics (ISFOG 2010) Perth, Australia.
- BSH (2008) Standard 704 - *Ground investigations for offshore windfarms*. First Update: 25 February 2008_ Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg
- CIRIA publication - LORD, J. A., CLAYTON, C. R. I. and MORTIMORE, R. N., 2002. Engineering in Chalk, Construction Industry Research and Information Association, CIRIA C574, London.
- ISO/DIS 19901-8 (2013) *Petroleum and natural gas industries - Specific requirements for offshore structures - Part 8 : Marine soil investigations*
- ISSMGE (2005) *Geotechnical and geophysical investigations for offshore and nearshore developments*. Technical Committee on Offshore and Nearshore Geotechnical Engineering (TC1), International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (September 2005)
- SUT (2013) *Guidance notes for the planning and execution of geophysical and geotechnical ground investigations for offshore renewable developments*. Offshore Site Investigation and Geotechnics Committee (OSIG). 2nd Draft, 02/05/13.