

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



Etudes de Terrain

D. BOREL

ETUDES DE TERRAIN

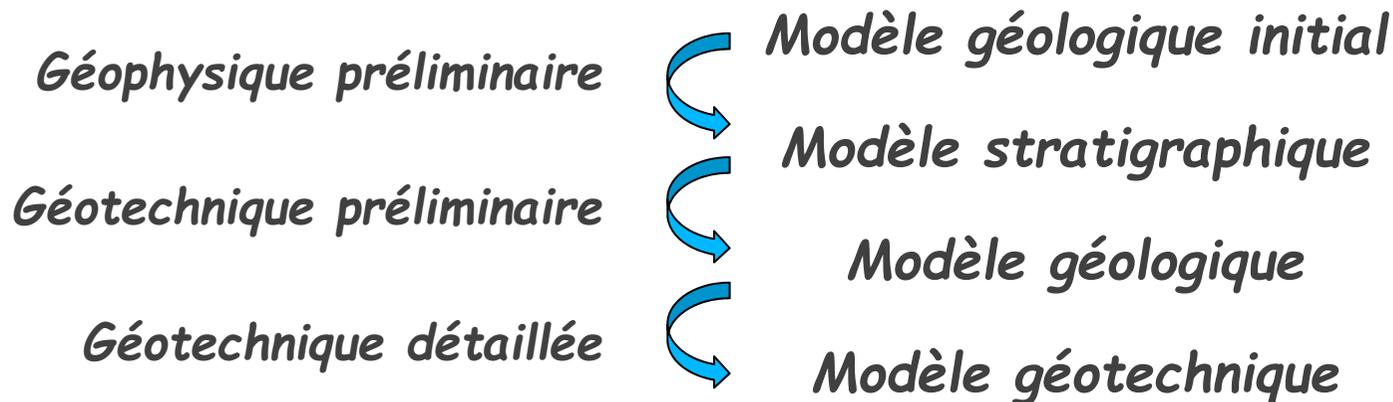
- Stratégie de reconnaissance basée sur la constitution d'un modèle géologique et géotechnique évolutif.
- Rationalisation des études par la définition des:
 - Unités géologiques, sismo-stratigraphiques et géotechniques ;
 - Provinces géologiques et géotechniques ;
 - Profils stratigraphiques et géotechniques ;
 - Risques géotechniques Majeurs, Importants et Mineurs ;
 - Sondages représentatifs.
- Définition d'un phasage des études.

ETUDES DE TERRAIN

- Programmes géophysiques et géotechniques quantifiés pour chaque phase.
- Tableaux de recommandations
 - Paramètres géotechniques
 - Techniques de reconnaissance et essais in situ
 - Essais de laboratoire
- Prise en compte de tous les éléments constitutifs du parc éolien:
 - turbines
 - mât météorologique
 - sous-station électrique
 - câbles inter-éoliennes
 - câble export.

LE MODELE GEOLOGIQUE DE SITE

- Les études de terrains s'appuient sur et alimentent le **modèle géologique de site** (souvent intégré dans un SIG)
- Ce modèle doit être initié dès le démarrage du projet à partir d'une synthèse des données bibliographiques existantes.
- Ce modèle sera ensuite alimenté à chaque phase de reconnaissance par les données collectées.
- Le modèle doit couvrir la totalité du site de développement afin de permettre des modifications d'implantation des structures.



LE MODELE GEOLOGIQUE DE SITE

Objectifs du modèle géologique de site

- Définir et optimiser les objectifs, le phasage, la nature et les spécifications de chaque campagne de reconnaissance ;
- Définir des unités sismo-stratigraphiques puis des unités géotechniques ( **Différence**) ;
- Définir des provinces géologiques puis des provinces géotechniques
- Fournir des profils géotechniques de calculs pour chaque élément constitutif du projet (un ou plusieurs profils géotechnique par province géotechnique) ;
- Recenser les aléas géologiques susceptibles d'affecter le choix, le dimensionnement, la construction ou le comportement des fondations.

ALEAS GEOLOGIQUES

- Leur extension et probabilité d'occurrence, leur origine et leur fonctionnement doivent être étudiés et intégrés dans le modèle géologique

 - Aléas notables à prendre en compte:
 - Aléa sismique
 - Eléments tectoniques et failles...: extension, activité...
 - Paléo-vallées
 - Sols liquéfiables sous sollicitation cyclique
 - Karsts et cavités
 - Erosion et mobilité des sédiments superficiels (avec prise en compte des structures installées)
 - Zones très indurées (intrusions magmatiques...)
 - Blocs
 - ...
- Les aléas ci-dessus ont presque tous affecté certains sites français**

PHASAGE DES RECONNAISSANCES

- L'organisation et le phasage des études de terrains sont basées sur la pratique internationale avec **trois phases principales**:
 - Une phase préliminaire : Faisabilité technique et financière
 - Une phase de projet : Conception et réalisation
 - Une phase d'exploitation : Inspection et maintenance
- La phase préliminaire peut comprendre deux étapes, en lien avec l'organisation des appels d'offre gouvernementaux (AO1, AO2 et AO3)
 - Etape de pré-projet: présélection du type de structure et de fondation sur la base d'un modèle géologique initial
 - Etape d'avant-projet
- La phase de projet comprend deux étapes: **Conception et Réalisation**

PHASE PRELIMINAIRE

Pré- projet	<ul style="list-style-type: none">• Présélection des types de structures et de fondations• Estimation technique et financière du projet	<ul style="list-style-type: none">➤ Etude géologique (bibliographique) indispensable (DTS)➤ Constitution du modèle géologique initial➤ Reconnaissance géophysique et/ou reconnaissance géotechnique facultatives
------------------------	--	--

Le contenu de cette phase de pré-projet dépend de la structure des appels d'offre gouvernementaux

PHASE PRELIMINAIRE

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

- **Reconnaitances géophysique et géotechnique préliminaires obligatoires**
- Objectifs :
 - 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

PHASE DE PROJET

Conception	<ul style="list-style-type: none">• 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	<ul style="list-style-type: none">➤ Reconnaissances géophysique et géotechnique détaillées obligatoires➤ Objectifs :<ul style="list-style-type: none">- Identification des aléas importants- Définition des profils stratigraphiques et des profils de paramètres géotechniques pour le dimensionnement des fondations- Constitution du modèle géotechnique- Définition des conditions de pose et d'ensouillage des câbles <p>Essais de faisabilité d'installation ou d'ensouillage si nécessaire</p>
-------------------	--	---

PHASE DE PROJET

<p>Réalisation</p> <p>Etudes détaillées d'exécution</p>	<ul style="list-style-type: none">• Levée des risques mineurs ou localisés• Etude détaillée de chaque éolienne• Dimensionnement par fondation• Prédiction d'ensouillage• Procédures détaillées d'installation des fondations et des câbles• Procédures de remédiation	<ul style="list-style-type: none">➤ Reconnaissance(s) complémentaire(s) spécifique(s) si et selon nécessité➤ Objectifs :<ul style="list-style-type: none">- Identification des aléas mineurs ou localisés
--	--	--

INSTALLATION & EXPLOITATION

Installation	<ul style="list-style-type: none">• Suivi d'installation	<ul style="list-style-type: none">➤ Mise en œuvre de contrôles
Exploitation Inspection Maintenance	<ul style="list-style-type: none">• Garantir la stabilité et la sécurité à long terme des ouvrages• Organiser le retour d'information sur le comportement des ouvrages	<ul style="list-style-type: none">➤ Suivi d'affouillement (bathymétrie)➤ Instrumentation en service et analyse des données

RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUES

Reconnaissance préliminaire

- 100% couverture sur l'ensemble du site
- Techniques: MBES - Side scan sonar - Sismique
- Donnée essentielle pour construire le modèle de sol
- Elle doit fournir la définition des unités lithologiques et des structures tectoniques
- Elle doit permettre l'identification des aléas géologiques et anthropiques majeurs

- Attention à la technique de sismique réflexion:
 - Choix du type de source en fonction de la précision et de la profondeur requise
 - Il est courant de mobiliser plusieurs systèmes différents pour réaliser soit des tests en début de campagne, soit les mettre en oeuvre en parallèle en fonction des objectifs

RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUES

Reconnaissance détaillée

- Techniques: MBES - Side scan sonar - Sismique
- Couverture de chaque emplacement d'ouvrage: turbines; sous-station
- Cette campagne doit fournir des données plus précises sur ces emplacements
- Elle permet de mettre en œuvre des techniques non conventionnelles d' « ingénierie géophysique »:
 - Sismique réfraction - V_p
 - Ondes de surface - V_s
 - Résistivité électrique
- Parfois suivie d'une reconnaissance complémentaire

RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES

Reconnaissance préliminaire

- A définir à partir du modèle stratigraphique de sol (reconnaissance géophysique préliminaire intégrée)
- Objectifs: définir un profil de paramètres géotechniques par province géologique; établir la variabilité spatiale du site
- Profondeurs de pénétration suffisantes pour traverser les principales formations géologiques et permettre la construction du modèle (généralement minimum 30-50m)
- Quantité: - **minimum un sondage par province**
 - sondages jumelés (échantillonnage/carotté + essai in-situ)
 - quantité indicative de 10% des emplacements de turbine
 - Essais in situ & diagraphies (essayer plusieurs méthodes à ce stade)
- **Attention à la qualité de la reconnaissance préliminaire: des résultats pauvres (récupération, échantillons remaniés) affectent fortement le projet jusqu'à la reconnaissance détaillée (parfois plusieurs années après)**

RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES

Reconnaissance détaillée

- Objectif: permettre le dimensionnement final des fondations et les études d'installation
- Principe: au moins un sondage représentatif par turbine
Pondération: si le modèle géotechnique est suffisamment robuste pour permettre l'interpolation des données sur la base d'études détaillées d'intégration géophysique/géotechnique assorties d'analyse de risque
En pratique (A01-A02): >90% des turbines reconnues avec au moins un sondage représentatif
- Certains types de fondation peuvent nécessiter plusieurs sondages - (Trois sondages périphériques supplémentaires de surface dans le cas de fondations gravitaires sur sols superficiels hétérogènes)

ROUTES DE CABLES

Câbles inter-éoliennes et câble d'export (souvent dissociés)

- Reconnaissance de **première étape** en phase d'avant-projet
 - Elle doit permettre d'orienter le tracé des câbles et de définir la profondeur d'ensouillage en fonction des moyens de pose
 - Reconnaissance géophysique souvent associée à la reconnaissance préliminaire du site, avec mise en œuvre de sismique de subsurface
 - Reconnaissance géotechnique légère
- Reconnaissance de **deuxième étape** en phase de conception
 - Elle doit permettre le routage précis des câbles et la prévision des conditions opérationnelles d'installation (moyens, vitesse d'avancement,...)
 - Géophysique: sismique haute résolution (+ géophysique d'ingénierie si besoin)
 - Géotechnique: sondages CPT et/ou (vibro-) carottés. 3 à 5m pén. Avec espacement de 300m (stratigraphie de surface hétérogène) à 1000m (stratigraphie homogène)

UXO - ENGINES EXPLOSIFS

- Bien que souvent assimilées aux campagnes géophysiques, les campagnes de détection d'engins explosif (UXO) sont en pratique distinctes:
 - En raison des planning et de la validité des données dans le temps
 - En raison du quadrillage très dense requis
- Les campagnes UXO ne sont pas systématiques mais réalisées uniquement si préconisées par les études bibliographiques UXO
- Deux types de campagnes UXO :
 - Campagnes préalables aux reconnaissances intrusives
 - Campagnes préalables aux travaux d'installation

Merci de votre attention

