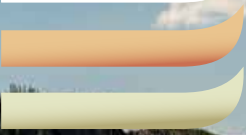


SOLSCOPE



CHANTIERS À CREUSER

TRAITEMENT DE SOL PAR JET-GROUTING
SUR LA NOUVELLE LIGNE 17 LOT 1

page 30

LE RETOUR DU PIEU BOIS
DANS LES FONDATIONS

page 38

DOSSIER

L'EAU DANS LE SOL

UNE DES PRINCIPALES CAUSES DE
SINISTRALITÉ EN GÉOTECHNIQUE

PAGE 18



© pexels-photo

ACTUALITÉS

Félicitations à la deuxième
promotion de sondeurs
en géotechnique

page 8

Loi ELAN : obligations
et responsabilités

page 12

Groupe Géotec dans le vent des énergies renouvelables

Depuis fin 2017, Géotec participe en tant que bureau d'études en ingénierie géotechnique à la réalisation d'un site industriel de pré-assemblage à Saint-Nazaire (Loire-Atlantique), dédié aux énergies marines renouvelables.

Ce site industriel consiste en l'aménagement d'une zone de 12 ha permettant le stockage, le transit et le pré-assemblage des composants de 80 éoliennes, type Haliade 150-6MW, en vue de leur installation sur le parc de Banc de Guérande à Saint-Nazaire, pour le compte de GE Renewable Energy.

Dans ce cadre, Nantes – Saint-Nazaire Port met à disposition ses surfaces de terre-plein et bord à quai pour une durée d'exploitation du site fixée à 3 ans.

Ce terre-plein portuaire, comportant notamment 19 blockhaus de la Seconde Guerre mondiale, était utilisé précédemment par STX France, par un terminal sablier et par des entreprises d'échafaudages.

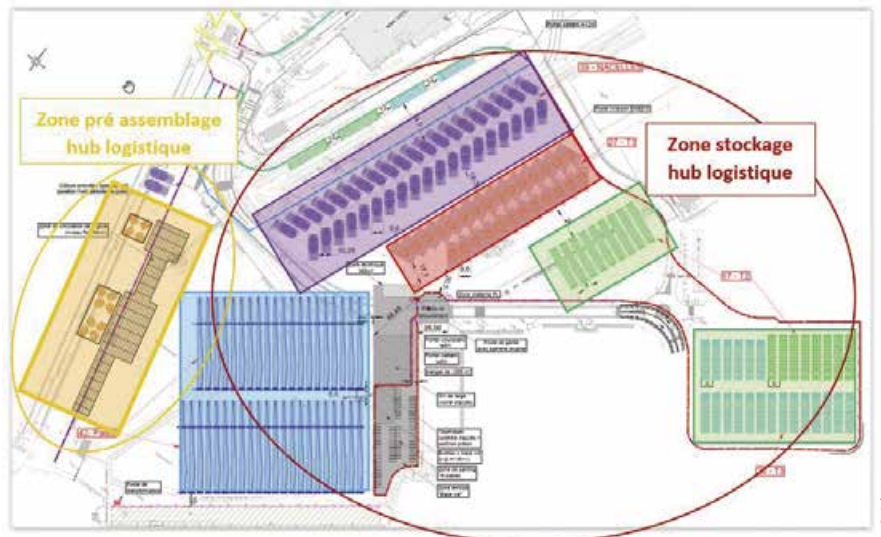
Dès 2021, il est prévu de stocker les composants d'éoliennes au droit du site industriel de pré-assemblage avant leur pré-montage et leur embarquement sur le navire d'installation autoélévateur offshore (Jan De Nul).

Courant 2021, les composants des éoliennes seront amenés sur site, stockés, puis acheminés par remorques de manutention lourde, de type modulaire, autopropulsées en bord à quai de la forme Joubert pour être assemblés (tronçons des mâts d'éoliennes) et chargés (ensemble des composants) sur le navire d'installation possédant une grue.

Compte tenu de l'historique du site, le sous-sol présente des horizons de remblais hétérogènes d'épaisseurs très variables (de plusieurs mètres à une dizaine de mètres) recouvrant des alluvions argilo-vasardes variablement sableuses ou limoneuses. Le toit du substratum gneissique, pouvant être altéré en tête, est fortement irrégulier.

Pour ces raisons, l'aménagement de ces zones de stockage et de pré-assemblage requiert des travaux de renforcement de sol et le recours à des fondations spéciales.

Géotec a réalisé, au sens de la norme NF P94-500, les diagnostics géotechniques (G5), les études géotechniques pré-alables (G1), les études géotechniques de conception (G2) et les supervisions géotechniques d'exécution (G4) des

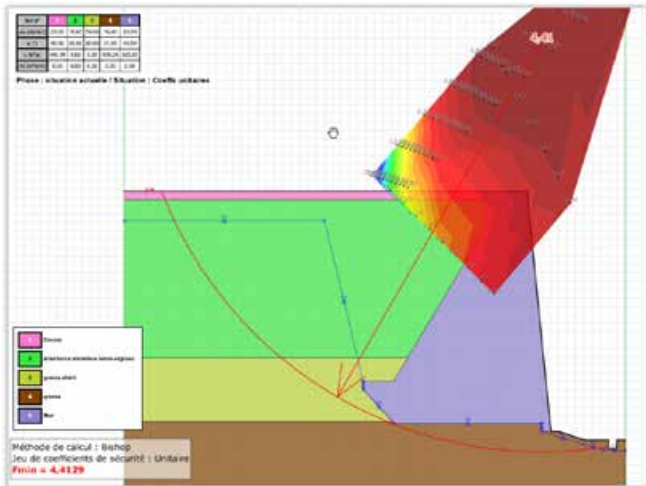


Vue générale des zones de stockage et de pré-assemblage du hub logistique de Saint-Nazaire.

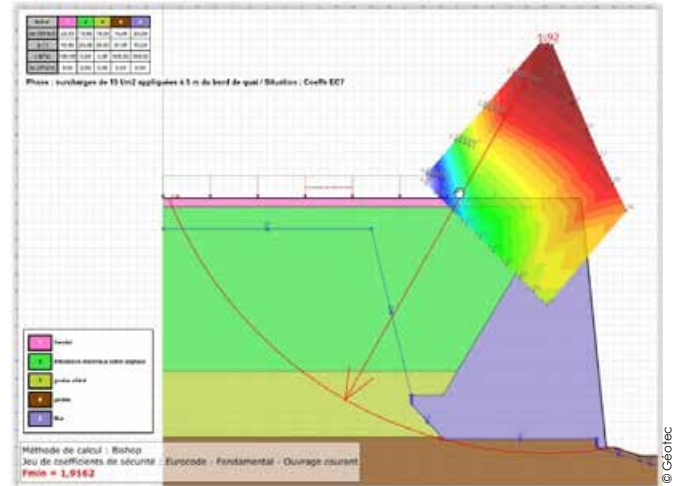
- Zone 1** Stockage des nacelles
- Zone 2** Stockage vertical des mâts (tronçon T1)
- Zone 3** Stockage horizontal des mâts (tronçons T2 et T3)
- Zone 4** Stockage horizontal des pales
- Zone 5** Pré-assemblage des mâts et voie de circulation grue sur bajoier Est de la forme Joubert



Nouvelle grue mobile portuaire Liebherr LHM600 (poids à vide 5 400 kN, capacité de levage de 2 000 kN) acheminée par bateau, le 10 décembre 2020, et déchargée au droit du bassin de Penhoët, à proximité de la forme Joubert.



Stabilité générale du quai en l'absence de surcharge.



Stabilité générale du quai avec l'application d'une surcharge de 15 t/m² à partir de 5 m du bord de quai.

ouvrages géotechniques de site industriel de pré-assemblage.

Actuellement, Géotec assure la supervision géotechnique d'exécution du renforcement de la future zone de circulation de la grue LHM 600, en bord de la forme Joubert, au port de Saint-Nazaire.

Dans le cadre du projet de la requalification du site nazairien en zone de pré-assemblage dédiée aux énergies marines renouvelables, le terre-plein côté Est de la forme Joubert à Saint-Nazaire sera le siège de stockage de matériels lourds d'éoliennes.

La forme Joubert construite dans les années 1930 se situe entre deux bajoyers distants de 50 m sur 350 m de longueur. Selon les archives, les bajoyers Est et Ouest sont des murs poids en béton fondés sur le gneiss compact.

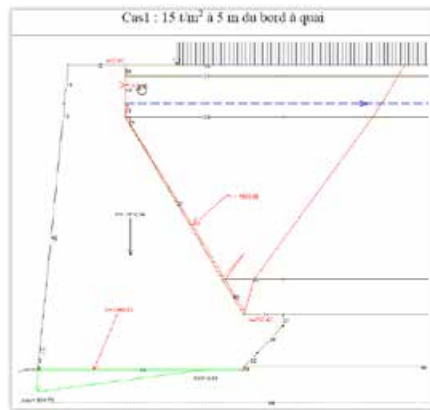
À la demande et pour le compte de Nantes – Saint-Nazaire Port, Géotec a notamment réalisé un diagnostic géotechnique de la stabilité du bajoyer Est (mission G5).

Au regard de la variation de la nature de sol rencontrée avec la présence ou non d'une couche d'arène gneissique recouvrant le gneiss fragmenté compact, deux modèles géotechniques ont été retenus.

Ce diagnostic a montré que la stabilité du quai n'était pas assurée pour l'application de certains cas de surcharges.

Les vérifications de la stabilité générale ont été conduites selon la norme NF P94-282 à l'aide du logiciel Talren 5 suivant la méthode Bishop dites des « tranches ».

La stabilité externe du quai a été vérifiée selon la norme NF P94-281 à l'aide du logiciel Geomur en utilisant la méthode de Culmann avec la vérification de la stabilité externe au glissement, au renversement et au poinçonnement selon les critères de mur 73 et du fascicule 62 titre V.



Etude de la stabilité externe avec l'application d'une surcharge de 15 t/m² à 5 m du bord à quai.

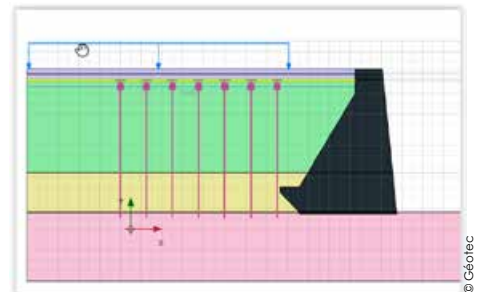
À l'issue de ce diagnostic, dans le cadre d'une étude géotechnique de conception, phase projet (mission G2 Pro), Géotec a étudié une solution de renforcement de sol permettant de justifier l'ensemble des critères de la stabilité externe non justifiés précédemment.

Cette solution consiste en la réalisation de files d'inclusions rigides en arrière du bajoyer Est suivant un maillage suffisant, surmontées d'une structure de chaussée faisant office de matelas de répartition de manière à réduire la poussée active transmise au mur par les surcharges envisagées.

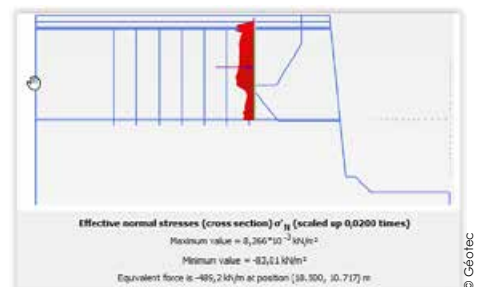
Des modélisations aux éléments finis ont permis de définir le mode et le dimensionnement du renforcement de sol à mettre en œuvre au droit du terre-plein côté Est de la forme Joubert.

L'ensemble des études géotechniques réalisé par Géotec entre 2017 et 2020 (investigations géotechniques, diagnostics, études géotechniques préalables, études géotechniques de conception) a débouché sur le lancement de plusieurs marchés de travaux en 2020.

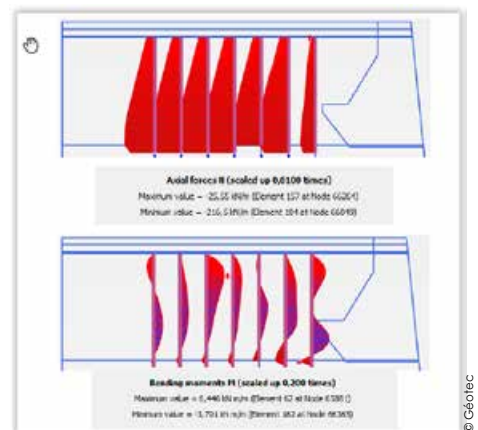
Géotec en assure la supervision géotechnique d'exécution.



Vue du modèle aux éléments finis avec l'application d'une surcharge de 200 kPa à partir de 7 m du bord de quai.



Détermination de la poussée active sous l'application d'une surcharge de 200 kPa.



Détermination des efforts axiaux et des moments fléchissants au droit des files d'inclusions rigides.

••• Pour accueillir ces composants d'éoliennes, des travaux de renforcement de sol sont entrepris depuis 2020, par zone de stockage et de pré-assemblage, pour s'adapter aux différents cas de charge projetés et aux exigences d'exploitation du site industriel de pré-assemblage.

On notera les intervenants suivants :

■ **Au droit des zones 1 à 4 :**

- Maître d'ouvrage : GE Renewable Energy ;
- Maître d'œuvre : SCE ;
- Bureau de contrôle : Apave ;
- G2/G4 : Géotec ;
- G3/G5 : Charier/Fondouest ;
- Entreprise adjudicatrice des travaux : Charier.

■ **Au droit de la zone 5 (dalle de pré-assemblage des mâts) :**

- Maître d'ouvrage : GE Renewable Energy ;
- Maître d'œuvre : SCE ;
- Bureau de contrôle : Apave ;
- G2/G4 : Géotec ;
- G3 : Charier/Soletanche Bachy
- Entreprises adjudicatrices des travaux : Charier (mandataire)/Soletanche Bachy Fondations Spéciales.

■ **Au droit de la zone 5 (circulation et stockage de charges lourdes en arrière du quai de la forme Joubert) :**

- Maître d'ouvrage : Nantes – Saint-Nazaire Port ;
- Maître d'œuvre : Nantes – Saint-Nazaire Port ;
- Contrôle extérieur : Géotec (inclusions), Cerema (béton) et Epsilon (chaussée) ;
- G5/G2/G4 : Géotec ;
- G3 : Viaud Moter/Keller ;
- Entreprises adjudicatrices des travaux : Viaud Moter (mandataire), Presqu'île Environnement (co-traitant), Keller Fondations Spéciales (co-traitant), Vinci Construction Maritime et Fluvial (co-traitant)

La durée d'exploitation du site industriel de pré-assemblage est fixée à 3 ans avec une durée de vie des ouvrages vis-à-vis des chargements du projet de 5 ans.

5 zones ont ainsi été identifiées avec pour chacune des caractéristiques et des objectifs spécifiques.

ZONES 1 ET 2 : AIRE DE STOCKAGE DES NACELLES ET AIRE DE STOCKAGE VERTICAL DES TRONÇONS T1 DES MÂTS

Les critères de réception ont été fixés par le maître d'ouvrage GE Renewable Energy :

- tassement absolu maximal sous appui de type « elephant feet » : 5 cm ;

- inclinaison maximale longitudinale et transversale : 1,5° ;

- portance ≥ 220 kPa ELS (nacelles) ;

- portance ≥ 244 kPa ELS (tronçon T1).

Les travaux ont été réalisés en mai 2020 par Menard, consistant en un traitement de sol par compactage dynamique et plots ballastés sur une surface de 15 650 m², à l'aide d'une pelle à câble de 1200 kN sur chenilles de type Sennebogen HD180, d'une masse poinçonnante de 17 t, de diamètre de 1,6 m, avec une hauteur de chute maximale de 20 m.

Au total, il a été réalisé :

- 264 plots ballastés pilonnés (sous massifs de fondations) ;

- 320 plots de compactage dynamique (autour des massifs de fondations).



Compactage dynamique réalisé par l'entreprise Menard au droit de la future zone de stockage des nacelles.

Des planches d'essais préalables ont permis de valider la procédure d'exécution et de contrôler l'atteinte des objectifs. Elles ont consisté en la réalisation d'un suivi vibratoire par des mesures de vitesses particulières avec la mise en place de capteurs de surveillance (géophones triaxiaux) au droit des infrastructures avoisinantes selon la circulaire du 23 juillet 1986 et de 4 sondages pressiométriques selon la norme NF EN ISO 22476-4 de mai 2015 pour vérifier l'atteinte des objectifs.

13 sondages pressiométriques de contrôle ont été réalisés jusqu'à 7 m de profondeur, selon la norme NF EN ISO 22476-4 de mai 2015, pour réceptionner les ouvrages réalisés.

ZONE 3 : STOCKAGE HORIZONTAL DES TRONÇONS T2 ET T3 DES MÂTS

Les critères de réception ont été fixés par le maître d'ouvrage GE Renewable Energy :

- contrainte au sol au droit des plaques de répartition : 110 kN/m² ;

- tassement absolu maximal : 10 cm ;
- inclinaison maximale longitudinale et transversale : 1,5°.

Les travaux réalisés par Charier ont consisté à un reprofilage des sols en place avec l'apport d'une GNT 0/31, d'épaisseur variable pour mise à la cote, surmontée d'un monocouche gravillonné et d'une couche de 7 cm de BBME 0/10.

Des essais de réflexion ont été réalisés pour réceptionner la plateforme réalisée.

ZONE 4 : STOCKAGE DES PALES

Les critères de réception ont été fixés par le maître d'ouvrage GE Renewable Energy :

- Défaut d'implantation : ± 20 cm longitudinalement ;
- Plateforme de portance EV2 ≥ 80 MPa
- Tassement absolu maximal sous longrines béton armé : 10 cm ;
- Inclinaison maximale longitudinale : 1,5° ;
- Inclinaison maximale transversale : 0,5°.

Les travaux réalisés par Charier ont consisté au traitement du sol support, sur une épaisseur de 35 cm, de manière à obtenir une portance présentant un EV2 ≥ 50 MPa, surmonté d'un géotextile, puis d'une couche de 35 cm de GNT 0/63 et d'une couche de 20 cm de GNT 0/31,5. La capacité portante des plateformes ainsi réalisées est estimée à 150 kN/m².

Des essais de réflexion ont été réalisés pour réceptionner la plateforme réalisée.

ZONE 5 : PRÉ-ASSEMBLAGE DES MÂTS EN BORD DE FORME JOUBERT (BAJOYER EST)

Les critères de réception ont été fixés par le maître d'ouvrage GE Renewable Energy :

- absence de tassement et de contrainte au droit de la forme Joubert (bajoyer Est) ;
- inclinaison maximale de l'interface à la base de la tour : $\pm 0,3^\circ$ à la construction et $\pm 0,5^\circ$ sous cas de charge ;
- planéité de la bride : 2 mm maximum entre 2 points de la bride situés sur une section de 360° et 1 mm maximum entre 2 points de la bride situés sur une section de 30°.

Les travaux ont été réalisés de mai à juillet 2020 par Soletanche Bachy Fondations Spéciales (Pieux) et Charier GC •••

••• (dalles béton armé) consistant à la création de deux dalles béton armé recevant les futurs mâts d'éoliennes en vue de leur pré-assemblage :

■ dalle pouvant accueillir 4 mâts (17,5 m x 17,5 m x 1,00 m) reposant sur 32 pieux, de diamètre 820 mm, de longueur variable avec un ancrage minimum de 1 m dans le gneiss compact), la charge maximum sur pieu étant de 2 717 kN à l'ELS ;

■ dalle pouvant accueillir 8 mâts (41,5 m x 181,5 m x 1,00 m) reposant sur 82 pieux, de diamètre 820 mm, de longueur variable avec ancrage minimum de 1 m dans le gneiss compact), la charge maximum sur pieu étant de 2 778 kN à l'ELS.



Forage des pieux de type Starsol par l'entreprise Soletanche Bachy Fondations Spéciales.



Recépage par l'entreprise Charier des 32 pieux de la future dalle béton armé siège des futurs mâts d'éoliennes à pré-assembler.

Les pieux ont été réalisés selon le procédé Starsol à l'aide d'une foreuse de 800 kN sur chenilles de type Fundex F3500.

20 % des pieux ont été testés par essais d'impédance mécanique, conformément à la norme NF P 94 160-4 de mars afin de réceptionner les pieux réalisés avant mise en œuvre des dalles béton armé.

ZONE 5 : CIRCULATION GRUE EN BORD DE FORME JOUBERT (BAJOYER EST)

Il s'agit de zone de surface d'environ 25 m x 200 m en arrière du quai Est de la forme Joubert dédiée à la circulation de la grue LHM600 et au stockage de charges lourdes (chargement réparti de 150 kN/m², chargement ponctuel de 800 kN/m²) faisant partie intégrante du projet hub logistique dédié aux énergies maritimes renouvelables.

Les objectifs fixés par le maître d'ouvrage Nantes – Saint-Nazaire Port sont :

■ assurer la stabilité du bajoyer sous différents cas de charge, dont un chargement réparti de 150 kN/m² et sous charge ponctuelle de la grue LMH600 en service (3 800 kN sur le patin le plus chargé) ;

■ garantir la portance du sol renforcé par inclusions rigides ;

■ limiter les tassements absolus prévisibles à 10 cm.

Les travaux de renforcement de sol consistent en la réalisation de 545 inclusions rigides à refoulement de type Inser, de diamètre 420 mm, disposées selon 8 files d'inclusions (dont 4 files d'inclusions rigides armées toute hauteur) avec un maillage de 3 m x 3 m, de longueur variable avec un ancrage minimum de 1 m dans l'arène gneissique/ gneiss compact, sur une surface d'environ 25 m x 200 m.

QUELQUES CHIFFRES-CLÉS DU FUTUR PARC ÉOLIEN DE SAINT-NAZAIRE

- Nombre d'éoliennes : 80
- Puissance nominale : 6 MW
- Puissance totale : 480 MW
- Fabrication des composants du parc éolien en usine : à partir de 2020
- Installation en mer des fondations, des câbles et de la sous-station : à partir de 2021
- Type de fondations : monopieux
- Distance à la côte : ±12 km
- Superficie du champ éolien : 78 km²
- Installation des éoliennes et mise en service progressive du parc : 2022
- Exploitation pour 25 ans : horizon 2023

Ces inclusions sont surmontées d'une structure de chaussée constituée de 30 cm de graves et 75 cm d'un matelas en béton maigre de type Bétonpack.

Une 1^{re} tranche de travaux a été réalisée par Keller en novembre-décembre 2020 avec la réalisation de 264 inclusions rigides de type Inser, à l'aide d'une foreuse de type Enteco-2, et une 2^e tranche est en cours de réalisation depuis janvier 2021 à l'aide d'une foreuse.



Réalisation inclusions rigides de type Inser par l'entreprise Keller.

Un essai de chargement de 2 500 kN a été réalisé sur une inclusion rigide de diamètre 420 mm, selon la norme NF EN ISO 22477-1 de décembre 2018.



Essai de compression de 2 500 kN sur inclusions rigides.

Dans une volonté de participer aux changements sociétaux en ayant un impact positif sur l'environnement, Géotec a participé à la réalisation de ce hub logistique dédié aux énergies marines renouvelables permettant au projet du champ éolien de Saint-Nazaire de prendre son envol.

Il s'inscrit pleinement dans les objectifs de développement des énergies renouvelables que la France s'est fixé dans le cadre de la loi de transition énergétique pour la croissance verte adoptée en 2015, avec à l'horizon 2030, 40 % d'énergies renouvelables dans sa consommation finale d'énergie. ■

François-Xavier Baummy
Ingénieur expert Géotec