

---

# Etude du transfert des charges permanentes et variables d'une éolienne de grande hauteur

S. Imanzadeh <sup>1,2</sup>, A. Pantet <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Normandie Univ., INSA Rouen Normandie, LMN, 76000 Rouen, France

saber.imanzadeh@insa-rouen.fr

<sup>2</sup> Normandie Univ., UNIHAVRE, CNRS, L0MC, 76600 Le Havre, France

---

**RÉSUMÉ :** Dans le cadre d'un projet AMI ADEME, le groupe international FREYSSINET a récemment développé la construction d'éoliennes de grande hauteur, constituées d'éléments cylindriques préfabriqués en béton assemblés par précontrainte. Le montage des éléments est réalisé grâce à un dispositif de levage innovant, nommé EOLIFT. Le premier chantier se situe sur le site de TRAIRI, dans la province de CEARA au NE du Brésil. Pour comprendre le comportement du sol sous ce type d'ouvrage, il a été décidé d'examiner à l'aide du logiciel PLAXIS 3D, la réponse du massif de sol sous un torseur des efforts défini par le projet. Pour représenter au mieux les tassements sous l'ouvrage, il faut pouvoir disposer du jeu de paramètres, réellement caractéristiques du site étudié. En l'absence de données, il a été décidé dans cette étude générale de définir les sols suite à une étude bibliographique, en considérant des matériaux similaires à ceux du site de TRAIRI. Nous avons donc examiné les champs de déplacements sous différents scénarii de charges. Les résultats montrent l'influence significative des charges dynamiques sur le tassement différentiel du sol sous ces ouvrages qui peut provoquer les dysfonctionnements dans les fonctionnements des éoliennes.

**ABSTRACT:** As part of an AMI ADEME project, the international group FREYSSINET has recently developed the construction of large onshore wind turbines, made up of precast concrete cylindrical elements assembled by prestressing. Erection of such towers performed using a purpose-made tool (called EOLIFT) allowing the erection to take place at high wind speed without the use of large cranes. The first construction site is located at TRAIRI site, in the province of CEARA in the NE of Brazil. To understand the soil behavior under this type of superstructure, it was decided to examine with PLAXIS 3D, the response of the massive soil by considering a soil behavior under loads defined by the project. To represent the construction site in the model, it is necessary to have the set of data which characterize the construction site. In the lack of such data, it was decided, in this general study, to define the soil parameters from the similar case studies. Next, the displacement field under the foundation with different load scenarii were studied considering the Mohr-Coulomb as a soil behavior. The results show the significant influence of dynamic loads on the differential soil settlement under the foundation of these superstructures, which can cause dysfunction in the operation of wind turbines.

**MOTS-CLÉS :** Fondation, Eolienne, Charge dynamique, Modèle éléments finis, Energie renouvelable, Fatigue.

**KEY WORDS:** Foundation, Wind turbine, Dynamic load, Finite element model, Renewable energy, Fatigue.

---

## 1. Introduction

Outre la lutte contre le changement climatique et les actions en faveur du développement durable, actuellement le domaine des énergies renouvelables est en plein développement et présente un grand intérêt économique pour les entreprises. La production d'énergie éolienne on-shore nécessite de concevoir des superstructures de grande hauteur dans des sites adaptés pour aller capter des vents réguliers, peu perturbés par la couche limite qui se développe à la surface du sol. La construction d'ouvrages pour le transport et la distribution doit accompagner le projet.

Les éoliennes de grande hauteur correspondent à des ouvrages de classe 3, tels qu'ils sont définis dans l'EC7 [COL 96], à savoir des ouvrages construits dans des conditions de sol complexes ou de chargement anormal. Classiquement, les charges appliquées au sol sont représentées par un torseur des efforts  $M$  (moment),  $V$  (charge verticale),  $H$  (charge horizontale) [KAC 16], [IMA 16], [NOR 13]. Selon l'AFNOR [AFN 06], Association Française de Normalisation dans la norme NF EN 61400-1, les charges de vent correspondent aux rafales extrêmes présentes dans la zone pendant les dernières 10 années. Les données météorologiques (vitesses en fonction de la hauteur et orientations) doivent être en nombre suffisant pour obtenir les charges représentatives. Il est important de rappeler qu'une rafale du vent a une durée d'environ 10 secondes.

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons à la détermination du champs de déplacements sous une fondation circulaire reposant dans un massif de sol sous l'effet des charges appliquées avec le poids de la structure ( $V$ ) statique et les autres ( $H$  et  $M$ ) périodiques. Les actions considérées sont issues du projet de TRAIRI, et ont été données par l'entreprise qui fournit les turbines. Sur ce site du Brésil, FREYSSINET International a réalisé vingt éoliennes, grâce au procédé EOLIFT qui a bénéficié d'un financement de l'ADEME dans le cadre des Investissements d'Avenir. Chaque éolienne repose sur plus d'une centaine de colonnes ballastées de longueurs variables suivant les caractéristiques du sol naturel. Les calculs ont été réalisés avec le logiciel PLAXIS 3D, développé par Technical University of Delft, version 2016.

## 2. Définition du problème et modèle éléments finis

On considère que la fondation circulaire de 19,8 m de diamètre est située dans un sol complètement homogène à 4,20 m de profondeur. Les charges correspondent à une éolienne d'une hauteur de 118,5m et d'une puissance de 3 MW. Le torseur est défini par une charge verticale  $V = 17,3$  MN, une charge horizontale  $H = 1,37$  MN et un moment  $M = 108$  MN.m.

Le tableau 1 indique les paramètres des différents sols étudiés. Les paramètres de Mohr Coulomb ont été déterminés suite à une étude bibliographique, en considérant des matériaux similaires à ceux identifiés sur le site [BOW 96], [CFM 11]. L'étude sous chargement statique a montré que pour atteindre la rupture, les efforts doivent être bien plus importants que ceux définis par le torseur. Pour ce type d'ouvrage, le tassement différentiel est à examiner avec attention, aussi nous avons considéré des sols à la rigidité différente en s'appuyant sur des données bibliographiques. Les conditions présentées dans le tableau 1 correspondent à une éolienne ayant sa fondation située soit dans un sol sableux naturel (Sol 3), soit dans un sol renforcé avec des Colonnes Ballastées (Sol 2) ou avec du Soil Mixing (Sol 1) à partir de données homogénéisées. Aucun mécanisme de consolidation n'est considéré dans ces sols granulaires. Les charges verticales et horizontales sont dans le même plan et le moment tourne autour de l'axe perpendiculaire à ce plan. Ainsi pour raison de symétrie, un demi-massif est étudié. Les dimensions du maillage sont de 80 m \* 100 m. Un maillage fin a été utilisé à proximité de la fondation (figure 1).

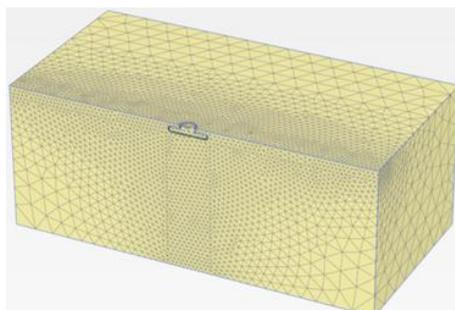


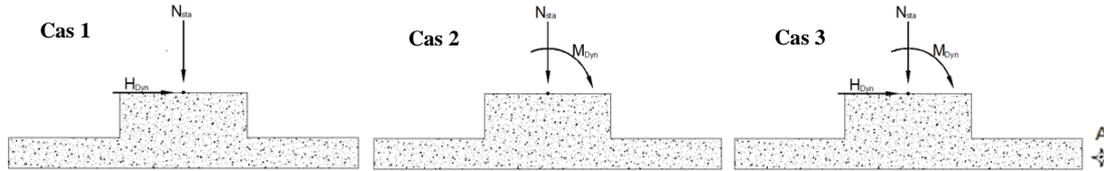
Figure 1. Modèle éléments finis (PLAXIS 3D)

**Tableau 1. Propriétés des sols et de la fondation**

Paramètres	Fondation	Sol 1	Sol 2	Sol 3
Modèle	Linéaire Elastique	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	25	18	18	18
$E$ (MPa)	30000	200	35	25
$\nu$	0,2	0,2	0,2	0,2
$c'$ (kPa)	-	10	10	10
$\varphi'$ (°)	-	40	40	40

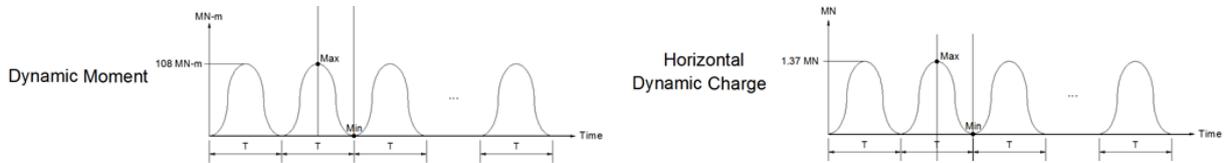
$\gamma$  : Poids volumique sec,  $E$  : Module d'Young,  $\nu$  : coefficient de Poisson,  $c'$  : cohésion,  $\varphi'$  : l'angle de frottement

Trois cas de charges sont étudiés. La charge verticale est toujours statique, alors que la charge horizontale et le moment sont périodiques (Figure 2).



**Figure 2. Trois cas étudiés**

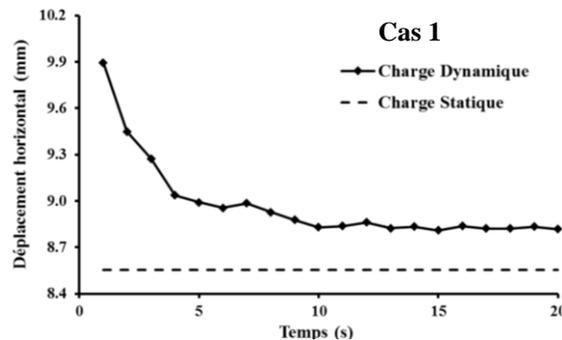
La force horizontale et le moment sont représentés pour une harmonique translatée dans la partie positive, comme indiqué sur la figure 3. Les paramètres pour la décrire sont la période  $T$ , l'Amplitude  $A$  et le nombre de cycles  $n$  et aucun amortissement n'a été pris en compte ( $F = Ma + Cv + Ku$  avec  $C=0$ ;  $M$  : masse du système,  $C$  : amortissement,  $K$  : rigidité,  $a$  : accélération,  $v$  : vitesse,  $u$  : déplacement).



**Figure 3. Spectres des actions appliquées (force horizontale et moment)**

### 3. Résultats et discussions

Nous proposons de suivre le déplacement du point A, positionné à côté de la fondation dans la zone d'influence de la force horizontale (voir figure 2) car c'est celui qui se déplace le plus lors de l'application du moment.



**Figure 4. Déplacement horizontal en fonction du temps dynamique pour le sol 3**

Comme l'indique la figure 4, au-delà de 10 s, le temps dynamique a peu d'influence sur le déplacement horizontal du point A (cas 1) pour le sol naturel. Quel que soit le mode de calcul (statique ou dynamique), la valeur du déplacement horizontal du point A est proche : 8,6 mm en statique et de 8,8 à 9,9 mm en fonction du temps dynamique. C'est à fréquence élevée, que l'écart est maximal. Par la suite, le temps dynamique sera fixé à 20 s.

La figure 5 indique le déplacement total (somme vectorielle du déplacement horizontal et vertical) au point A en fonction des étapes caractéristiques de la construction : (1-2) correspond à la charge de la fondation, (2-3) caractérise la construction de la superstructure. Les quatre étapes suivantes représentent les effets harmoniques du moment dû au vent en considérant la composante horizontale (cas 3) et en la négligeant (cas 2).

Dans la figure 5a, il apparaît logiquement sous l'effet du chargement vertical que le déplacement total (23 mm) a une direction privilégiée verticale (8,8 mm horizontal, 21 mm vertical). L'influence d'une composante horizontale au chargement dû à la superstructure a un effet limité sur le déplacement total. Par ailleurs, plus le sol est rigide, moins le déplacement total est important.

Pour la figure 5b, l'effet du moment généré par le vent contribue fortement à l'augmentation du déplacement total (36 mm). La prise en compte de l'inclinaison du chargement à cause de la composante horizontale a peu d'effet. L'augmentation du niveau des contraintes varie entre 60 et 70 KPa sous l'effet harmonique. Le cas 3 est similaire au cas 2. Dans toutes les situations, les sols traités (avec des caractéristiques homogénéisées à discuter) présentent des déplacements plus faibles que ceux du sol naturel. Le traitement de sol diminue les déplacements de 85% pour le sol 1 et de 30% pour le sol 2. La succession de cycles identiques n'a aucun effet sur les déplacements, ce qui est logique compte tenu du modèle de Mohr Coulomb, le sol n'est sollicité que dans la partie élastique. Seul le paramètre de déformation E a une influence sur le champ de déplacement. Avec le modèle « Hardening soil », non présentés ici, les déplacements sont supérieurs mais restent aussi stables. Il faudrait introduire un paramètre de déformation traduisant la fatigue des sols.

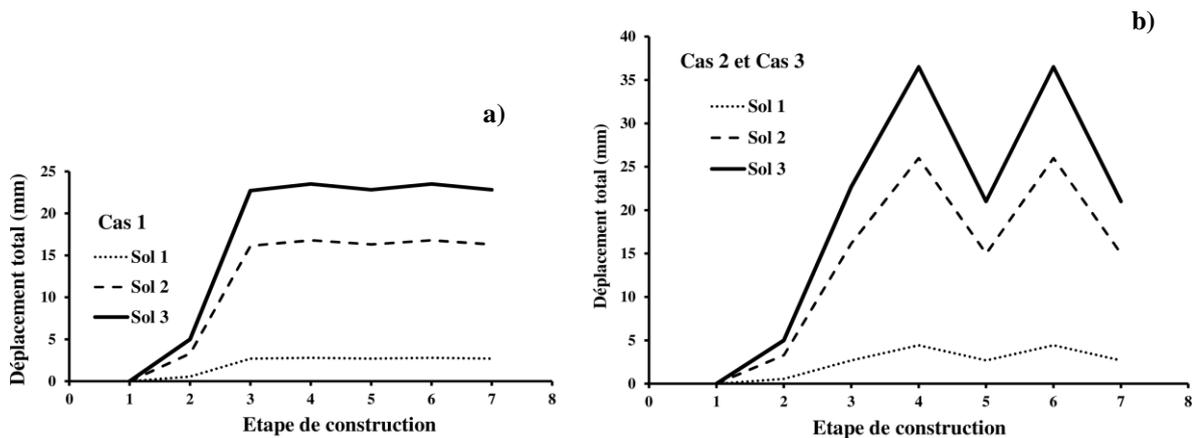


Figure 5. Déplacement total en fonction d'étape de construction en point A

#### 4. Conclusion

Le comportement du sol sous la fondation d'une éolienne de grande hauteur a été examiné en déterminant les déplacements par la méthode aux éléments finis avec PLAXIS 3D. Les paramètres du sol et de la fondation ont été déterminés suite à une étude bibliographique, en considérant des matériaux similaires à ceux du projet de TRAIRI. Le moment dû au vent et la force verticale de gravité jouent un rôle essentiel dans le développement des déplacements dans le massif. Le moment provoque une rotation de la fondation, mais le sol reste toujours comprimé. Les modèles de Mohr-Coulomb et « Hardening soil » testés dans cette application ne sont pas opérants pour juger des effets de fatigue, car le phénomène de dégradation du module de déformation n'est pas intégré. Nous nous intéressons désormais au développement des déplacements dans le massif de sol complet, en fonction de la zone d'influence du vent et non plus sur une zone privilégiée par le plan de symétrie. La structure doit être dans ce cas modélisée en 3D. Une meilleure définition de la distribution des charges sur la fondation permet également de mieux définir les mouvements du sol sous la fondation.

#### 5. Bibliographie

- [BOW 96] Bowles JE., *Foundation Analysis and design*, 5th ed. International Edition: McGraw-Hill, 1996.
- [COL 96] COLLECTIF, Eurocode 7, Norme XP 1997-1: Calcul géotechnique. Déc. 1996, AFNOR.
- [AFN 06] AFNOR, Boutique. NF EN 61400-1. s.1 : AFNOR Association Française de Normalisation, 2006.
- [NOR 13] Normes d'application nationale de l'Eurocode. Justification des ouvrages géotechniques - Fondations superficielles, NF P 94-261. 2013.
- [CFM 11] CFMS, Comité Français de Mécanique des sols des Fondations d'éoliennes. 2011.
- [KAC 16] Kachkouch FZ., Bai H., Pantet A., Imazadeh S., Melen B. « Comportement des sols sous les fondations d'éolienne de grande hauteur », *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*-Nancy, France, 2016, p. 8.
- [IMA 16] Imazadeh S., Cuffel S., Pantet A., « Soil behavior under foundations of very tall wind turbine » EMI International Conference – France, 2016.