

Le projet FUI FEDRE : réutilisation des fondations des éoliennes

The FUI FEDRE project: wind turbine foundation repowering

Laurent Briançon¹, Eric Antoinet²

¹ INSA-Lyon, GEOMAS

² Antea Group, Olivet

RÉSUMÉ – Le projet FUI FEDRE (Fondation d'Eoliennes Durables et REpowering) a réuni cinq partenaires de 2018 à 2024 autour de la problématique du repowering des fondations d'éolienne. Deux doctorants, Janet Modu (Antea Group) et Adnan Sahyouni (Ménard) ont été intégrés au projet pour réaliser leur thèse sur le sujet et ont participé à chercher des solutions permettant de réutiliser la fondation existante lors des phases de remplacement de l'éolienne.

ABSTRACT – The FUI FEDRE project (Fondation d'Eoliennes Durables et REpowering) brought together five partners from 2018 to 2024 around the problem of repowering wind turbine foundations. Two PhD students, Janet Modu (Antea Group) and Adnan Sahyouni (Ménard) were integrated into the project to realize their thesis on the subject and helped to find solutions to reuse the existing foundation during the replacement phases of the wind turbine.

1. Introduction

En Europe, le marché de l'énergie éolienne va fortement évoluer entre 2020 et 2030 puisque 50 % du parc existant va être renouvelé. Ce renouvellement, appelé « repowering » est la conséquence du remplacement des turbines après 20 ans de service par des machines plus puissantes. La pratique actuelle est la déconstruction des fondations existante et la reconstruction de nouvelles fondations accueillant la nouvelle éolienne à proximité de l'ancienne sur une zone vierge. Le projet FUI25 FEDRE (Fondations d'Eoliennes Durables et REpowering) est conduit par un consortium d'entreprises et laboratoires de recherche et vise à proposer une conception évolutive par la réutilisation des fondations existantes.

Deux études parallèles ont été menées dans le projet FEDRE :

- Analyse du transfert de charge dans le sol renforcé par inclusions rigides et proposition de méthodes de dimensionnement
- Analyse du transfert de charge dans la fondation et proposition de solution de réutilisation de la fondation existante lors de la phase de repowering.

La première étude a été menée dans la thèse d'Adnan Sahyouni (2023) par l'instrumentation du renforcement de sol sous une éolienne et le développement de modèles numériques capables de simuler le transfert de charge dans le sol renforcé.

La seconde étude a été menée dans la thèse de Janet Modu (2022) et a consisté à instrumenter deux fondations d'éoliennes réelles, de construire et tester des maquettes de fondations d'éolienne pour maîtriser les sollicitations appliquées et tester les solutions de repowering et développer des simulations numériques pour passer du modèle réduit à l'échelle réelle. La méthodologie adoptée a permis de comparer les niveaux de déformation des fondations à échelle réelle et celles des maquettes et le dialogue entre modèles numériques et physiques a permis d'analyser le transfert de charge et de proposer les solutions testées dans les modèles réduits pour des cas à échelle 1.

La réussite de ce projet est en grande partie due à la complémentarité du consortium composé d'une entreprise en renforcement de sol Ménard, du laboratoire de recherche GEOMAS de l'INSA de Lyon, d'un constructeur d'éolienne et gestionnaire de parcs éoliens Nordex-Acciona, d'un bureau d'études géotechniques Antea Group, d'une société d'ingénierie spécialisée dans la conception de fondations d'éoliennes CTE Wind et une entreprise spécialisée dans les mortiers et coulis spéciaux Parex Lanko.

2. Moyens mis en œuvre

2.1. Renforcement par inclusions rigides

2.1.1. Démonstrateur

La fondation d'une éolienne sur un sol renforcé par inclusions rigides a été instrumentée. Cette éolienne, de type N117/3600 TS91, avec une semelle de 19 m de diamètre, a été construite dans le parc d'Ecoust-St-Mein dans le Pas-de-Calais (62), par NORDEX. Le renforcement de sol par inclusions rigides a été réalisé par Ménard et consiste en des inclusions rigides de type CMC de 360 mm de diamètre réparties sur quatre cercles concentriques (Figure 1). Une plateforme granulaire de 80 cm d'épaisseur a été disposée entre les inclusions et la semelle de l'éolienne.

L'instrumentation consiste principalement à mesurer le transfert de charge dans les inclusions par l'intermédiaire de capteurs de pression totale (CPT) positionnés sur les têtes de certaines inclusions et de fibres optiques (FO) insérées dans cinq inclusions. Il était aussi prévu de mesurer le tassement (T) différentiel sol / inclusion mais le dispositif de mesures a été défaillant. Enfin, un tube inclinométrique a été mis en place en bordure de la semelle pour permettre de mesurer les accélérations dans le sol pendant la rotation de l'éolienne (Figure 1). Les mesures sont enregistrées depuis 2019 et continueront à être suivies pendant plusieurs années pour évaluer le comportement à long terme.

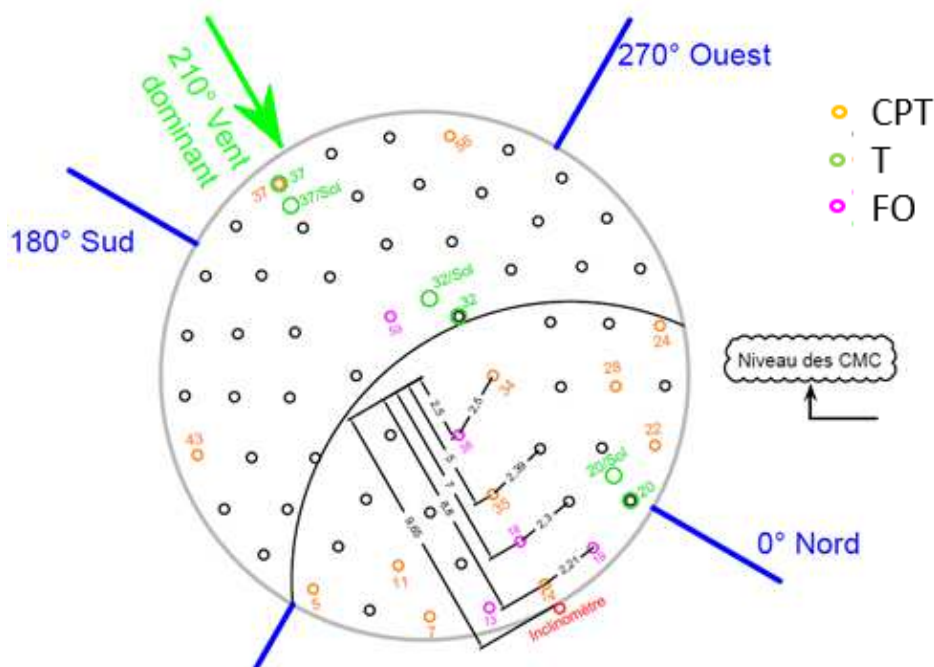


Figure 1. Renforcement de sol sous la semelle et plan de l'instrumentation

Un essai de chargement statique, réalisé sur le site sur une inclusion rigide, et une caractérisation géotechnique du site ont permis de calibrer les modèles numériques (Sahyouni et al., 2020).

2.1.2. Modélisation numérique

Une modélisation numérique par éléments finis avec le logiciel Plaxis a été développée pas à pas pour trouver les meilleurs modèles permettant une approche rigoureuse du problème :

- Une modélisation des essais de laboratoire (oedométriques et triaxiaux) pour choisir les modèles de sols les plus appropriés,
- Une modélisation axisymétrique d'un essai de chargement statique pour reproduire au mieux le comportement d'une inclusion rigide chargée en frottement et en pointe (Sahyouni et al, 2020) ; la Figure 2 met en évidence l'importance d'un essai de chargement statique pour calibrer correctement le modèle numérique,
- Une modélisation d'une cellule élémentaire par un modèle axisymétrique pour reproduire le comportement d'une maille sous la fondation, les mesures de la déformation des inclusions enregistrées à partir des fibres optiques ont permis de choisir le modèle le plus à même de reproduire le frottement négatif le long de l'inclusion (Figure 3),
- Une modélisation 3D du renforcement de sol sous la fondation d'éolienne en considérant les moments dus à la direction et à la vitesse du vent.

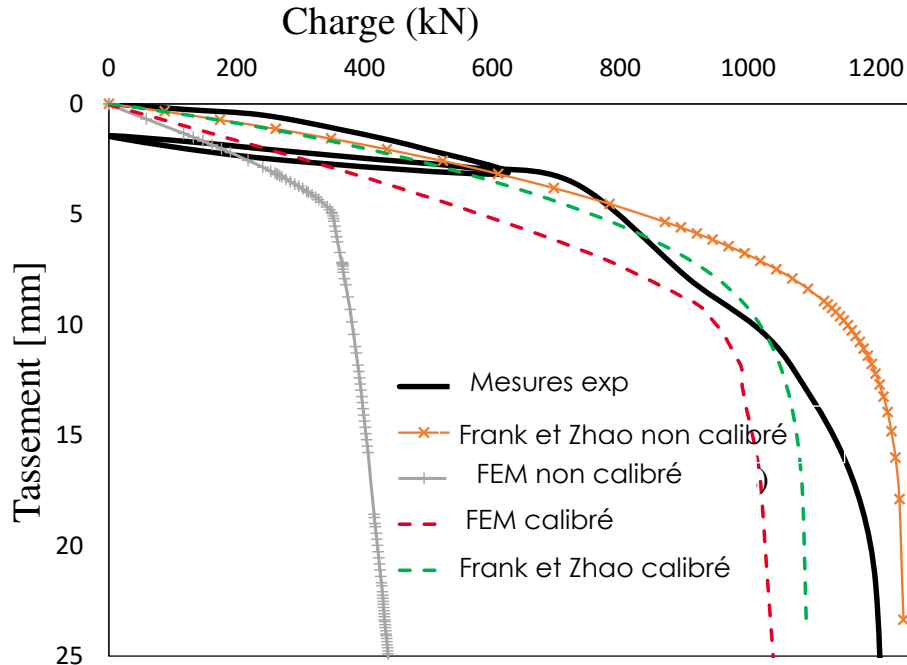


Figure 2. Calibration du modèle numérique sur les résultats d'un essai de chargement statique d'une inclusion

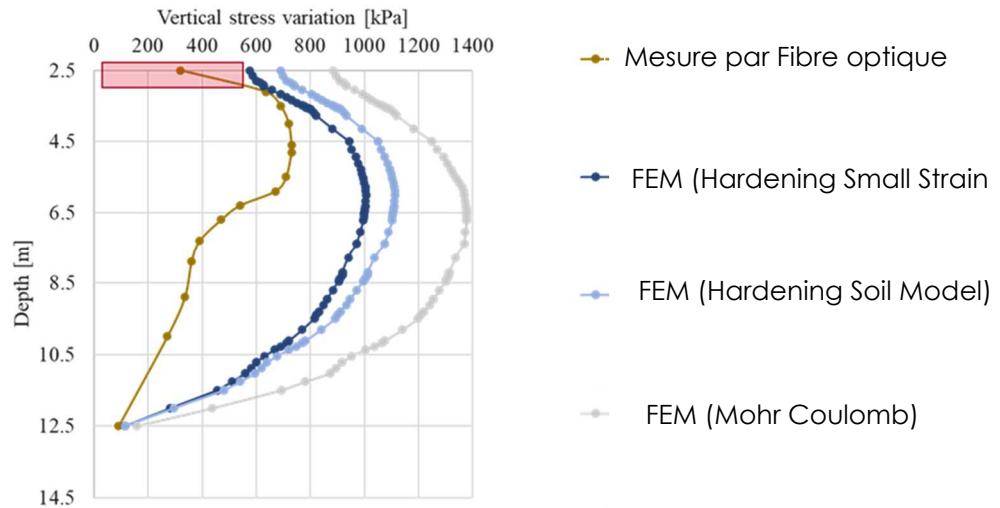


Figure 3. Calibration du modèle numérique sur les mesures des fibres optiques pour reproduire le frottement négatif

2.1.3. Développement d'un macro-élément

Un macro-élément multi-échelle 1D modélise le renforcement du sol par des inclusions rigides dans une implémentation géométrique 3D basée sur la méthode des éléments finis (Figure 4). Un macroélément est un modèle qui permet de reproduire le comportement de l'ensemble du système sol et fondation à l'échelle macroscopique. Il a été développé sur la plateforme ATLAS (Grange, 2018) pour caractériser l'interaction entre l'inclusion rigide et le sol.

Le comportement de chaque inclusion rigide est modélisé dans un macroélément local reproduit dans un environnement FEM. Les interactions en frottement (3) et en pointe (4) sont pris en compte avec les lois d'interaction de type Frank et Zhao. L'interaction entre une maille élémentaire et son environnement est décrite par les lois de cisaillement du sol (5) et tient aussi compte des actions appliquées sur chaque maille en fonction de leur position (2) et des conditions d'entrées (1). Les effets 3D sont respectés en diffusant la charge du sol renforcé à la masse de sol externe non renforcée au-delà du périmètre de la fondation en raison du frottement entre ces deux milieux (6).

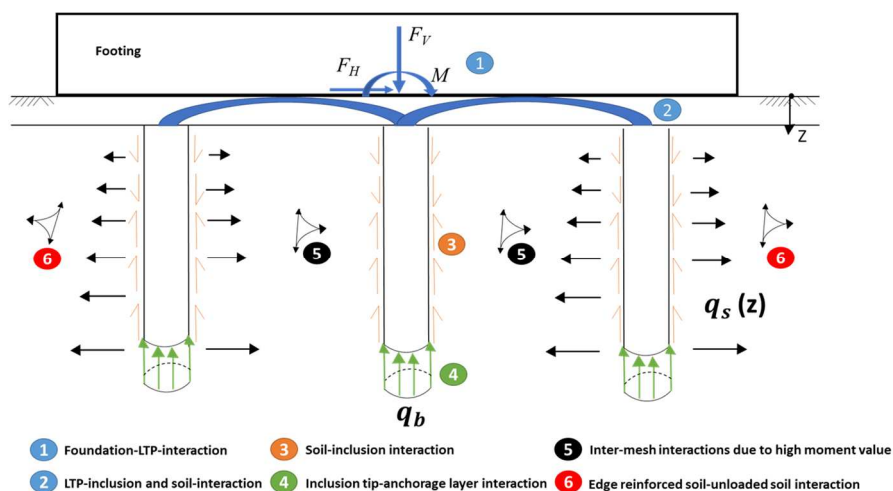


Figure 4. Mécanismes pris en compte dans le macro-élément

La charge est appliquée au moyen d'une relation cinématique qui relie tous les nœuds parents du sol renforcé à un nœud maître qui contrôle le déplacement vertical et la rotation

de la fondation au moyen d'une équation contrôlée par le degré de liberté du système et l'hypothèse de rigidité infinie de la fondation.

2.2. Réutilisation de la fondation lors de la phase de repowering

Les solutions de repowering ne pouvant pas être directement testées sur une fondation d'éolienne réelle, il a été décidé d'instrumenter deux fondations d'éolienne pour calibrer des modèles numériques capables de simuler correctement les mécanismes de transfert de charge dans la semelle et de réaliser deux maquettes à l'échelle 1/10^e pour les tester en maîtrisant les conditions de chargement et pour évaluer une solution de repowering sur une des deux maquettes. Le passage en vraie grandeur se faisant à l'aide des modèles numériques calibrés aux deux échelles (Figure 5).

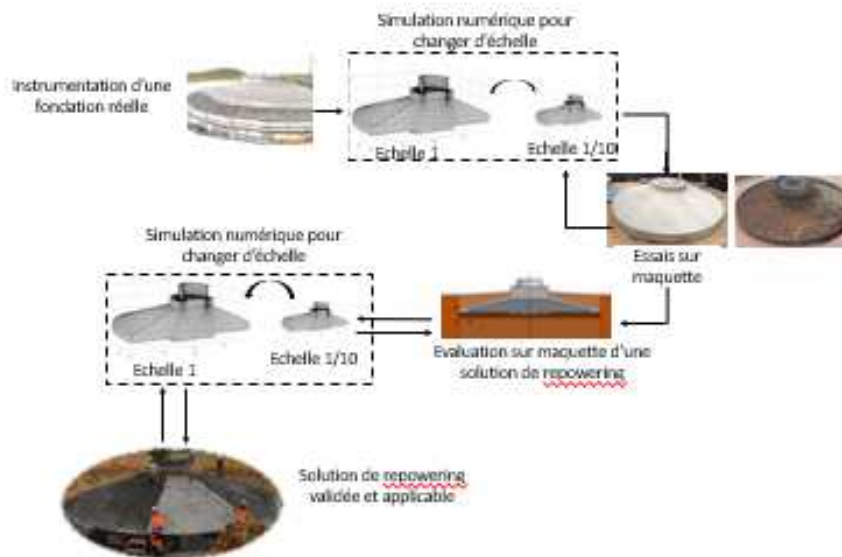


Figure 5. Stratégie d'étude pour proposer une solution de repowering d'une fondation d'éolienne

2.2.1. Démonstrateurs

La semelle de la fondation d'Ecoust Saint-Mein a été instrumentée pour évaluer le transfert de charge au sein de la semelle et calibrer les modèles numériques simulant le comportement propre de la semelle.

Une seconde éolienne a aussi été instrumentée pour mesurer par fibres optiques sa déformation et les variations de température pendant la prise du béton afin de pouvoir calibrer le modèle simulant le comportement du béton à jeune âge.

2.2.2. Modélisation numérique

La modélisation numérique a été faite à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics afin de : caractériser le comportement de la fondation d'éolienne en service en comparaison avec les mesures de l'instrumentation, passer à l'échelle 1/10^e en vérifiant l'influence des paramètres ne pouvant pas respecter les lois de similitude, simuler le comportement des fondations aux deux échelles à jeune âge, simuler le comportement de la fondation de la maquette, tester les solutions de repowering. Ce volet numérique était donc fondamental pour mener à bien la stratégie d'étude adoptée.

La modélisation du comportement d'une fondation d'éolienne étant très complexe due notamment aux charges appliquées et aux éléments constituant la machine, quelques simplifications ont été adoptées (Figure 6). Cependant, les zones importantes du transfert

de charge, notamment la liaison entre le mât et la cage d'armature ou les zones instrumentées, ont été finement modélisées.

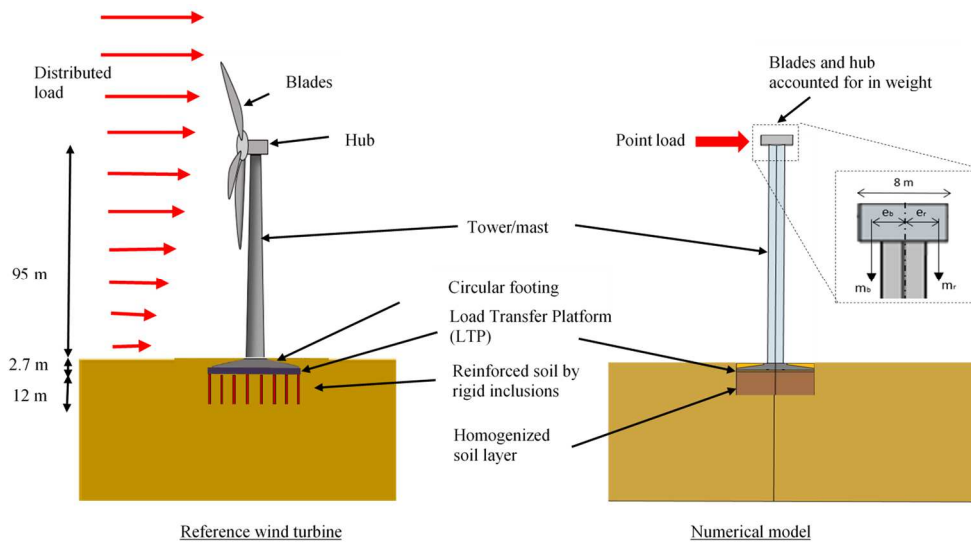


Figure 6. Simplifications adoptées pour simuler le comportement de l'éolienne

2.2.3. Modélisation physique

La modélisation physique d'un ouvrage géotechnique est délicate si on veut respecter les règles de similitudes (Tableau 1). Cependant quelques transgressions ont été faites pour réaliser les maquettes tout en contrôlant que ces non respects des règles de similitudes permettaient quand même que le comportement des maquettes soit représentatif de la réalité. Il a notamment été choisi de ne pas utiliser des armatures de 2 mm de diamètre qui ne permettaient pas une bonne réalisation de la maquette. Des armatures de 6 mm de diamètre ont été choisies tout en diminuant leur nombre pour respecter la densité acier-béton. Le béton a aussi été confectionné spécialement pour respecter les résistances à la compression des trois bétons utilisés dans une fondations réelles.

Il n'a pas été possible de respecter les règles de similitudes pour le module d'Young. La modélisation numérique a donc été utilisée pour vérifier l'influence de ce non-respect sur les résultats (Modu et al., 2022).

Tableau 1. Facteur d'échelle

	Facteur d'échelle λ	Cas 1 (Echelle réelle)	Cas 2 (Modèle physique parfait)	Cas 3 (Modèle physique réalisé)
Contrainte σ (MPa)	(1/10)	σ	$\sigma / 10$	-
Module de Young (MPa)	(1/10)	20 000	2 000	20 000
Poids volumique (kN/m ³)	(1)	24	24	24
Longueur (m)	(1/10)	20	2	2
Charge verticale V (kN)	(1/1000)	4 095	4,095	1,63
Charge horizontale H (kN)	(1/1000)	513	0,513	2
Moment M (kN.m)	(1/10000)	46 420	4,6	6

3. Résultats et proposition d'une solution de repowering

3.1. Renforcement du sol par inclusions rigides

Le travail mené dans la thèse d'Adnan Sahyouni (2023) a permis de proposer une modélisation numérique par éléments finis 3D du renforcement de sol en mettant en

évidence quels étaient les modèles de sols à utiliser, quelle calibration était essentielle pour disposer d'un outil performant malgré toute la complexité de l'ouvrage modélisé et notamment le chargement différent sur chaque maille nécessitant une modélisation 3D.

L'instrumentation a permis, et c'est une première, de mettre en relation la charge reprise par les inclusions en fonction de leur position par rapport à la direction du vent et selon sa vitesse.

Enfin un macro-éléments a été développé permettant une vitesse de calcul importante et apportant des résultats proches de la modélisation numérique (Figure 7).

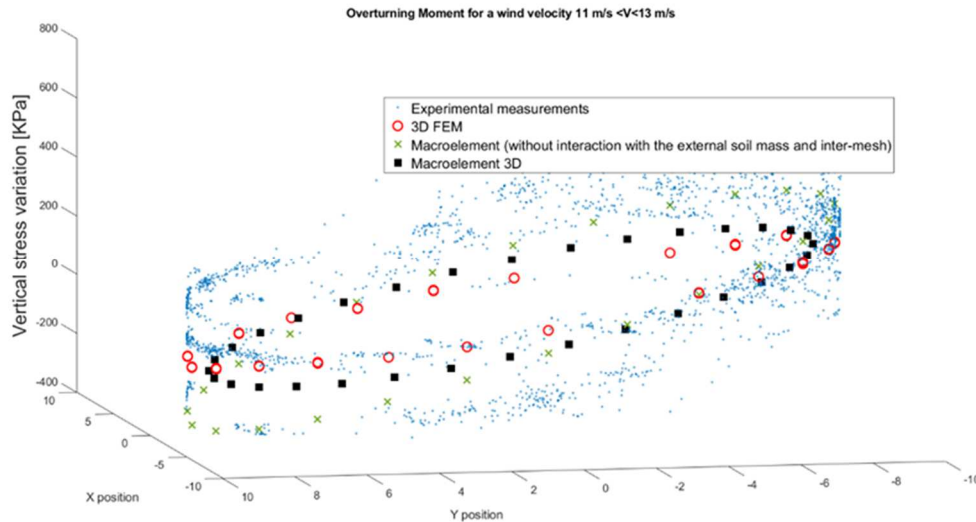


Figure 7. Mesure de l'augmentation de contrainte due au vent sur les inclusions périphériques sous la fondation – Comparaison des mesures et des modèles numériques

3.2. Réutilisation de la fondation lors de la phase de repowering

Le travail mené dans la thèse de Janet Modu (2022) a permis d'identifier les capteurs à installer dans une fondation pour suivre son comportement. Les fibres optiques coulées dans le béton et les anneaux de force disposés dans la cage d'armature ont montré tout leur intérêt et pourront être proposés dans des études de SHM pour optimiser les actions de maintenance des éoliennes pendant leur durée de service.

La modélisation physique à l'échelle 1/10^e a été difficile à réaliser pour respecter les règles de similitude ou mettre en place des stratégies pour s'en affranchir sans nuire à la bonne représentativité de la maquette. La modélisation numérique a été primordiale pour le changement d'échelle et les résultats permettent d'envisager le passage des solutions de repowering validées sur la maquette à l'échelle 1 (Figure 8).

Une solution technique pour la réutilisation des fondations existantes a été ébauchée. Elle ne s'applique que pour des accroissements de moments de renversement de l'ordre de +50 à +80 % entre l'ancien et le nouvel aérogénérateur. Techniquement, la solution étudiée consiste à découper la partie haute de la semelle (partie supérieure de la cage d'ancrage) et de reconstruire une nouvelle semelle au-dessus, avec une nouvelle cage d'ancrage. Les deux semelles doivent être liées rigidement à la fois par des barres d'ancrage et par un coulis de scellement spécial. Cette solution innovante a été testée sur des modèles numériques et sera testée sur une maquette. Néanmoins de nombreux verrous techniques sont apparus et devront faire l'objet de compléments d'étude avant d'arriver à une solution qui pourra être testée sur une fondation réelle. L'évaluation de l'empreinte carbone (GES) montre un gain de l'ordre de 25 à 30 % par rapport à une solution classique de déconstruction et reconstruction d'une semelle neuve.

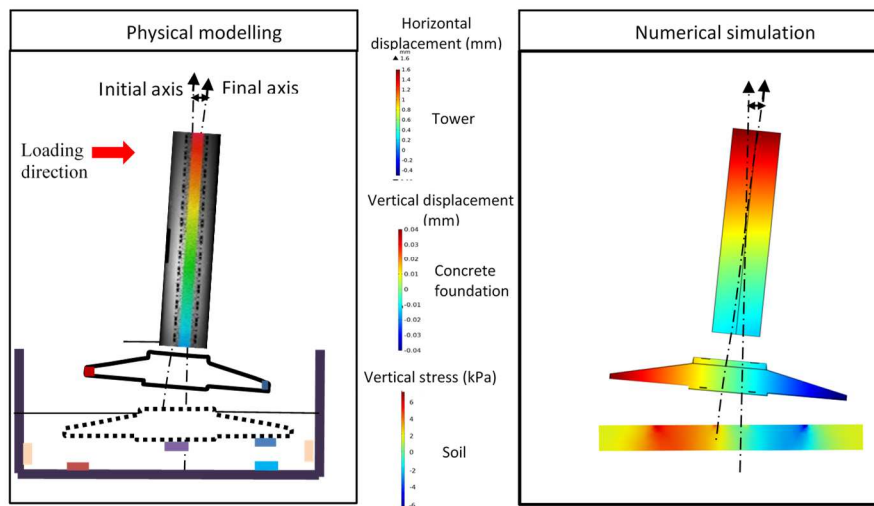


Figure 8. Distribution de charge du mât à la fondation mesurée dans la maquette et simulée numériquement

4. Conclusions

Les travaux réalisés dans le cadre du projet FEDRE ont permis d'avancer sur une solution technique de réutilisation des fondations existantes dans le cadre du rééquipement des parcs éoliens. Les travaux réalisés ont permis de disposer d'une meilleure compréhension des phénomènes physiques et mécaniques.

Une solution de rééquipement basée sur une solution dite « champignon » a été ébauchée. Sa conception a été validée par des modèles numériques et une maquette à l'échelle 1/10 permettra de vérifier son bon comportement. Néanmoins les verrous techniques restent nombreux, en particulier vis-à-vis de la durabilité sous sollicitations répétées et des études complémentaires sont nécessaires avant que cette solution ne puisse être mise en œuvre de manière courante.

5. Remerciements

Ce travail a été mené dans le cadre du projet FUI25 FEDRE. Les auteurs tiennent à remercier tous les partenaires du projet, la Région Auvergne Rhône Alpes, Bpifrance et la CAPI pour leur soutien financier et le pôle de compétitivité Tenerrdis pour son accompagnement.

6. Références bibliographiques

- Grange, S. (2018). ATL4S: A Tool and Language for Simplified Structural Solution Strategy. Technical report, GEOMAS, INSA-Lyon, France
- Modu, J. (2022). Physical and numerical modeling of transfer mechanisms of onshore wind turbine foundations. Thèse de l'INSA de Lyon – Université Lyon 1.
- Modu, J., Georgin, J.F., Briançon, L. et Antoinet, E. (2022). Modélisation physique et numérique des fondations gravitaires d'éolienne. Proceedings of JNGG 2022, 28-30 juin 2022, Lyon, France
- Sahyouni, A. (2023). Rigid inclusions under wind turbine foundation: experimental behaviour and numerical studies. Thèse de l'INSA de Lyon – Université Lyon 1
- Sahyouni, A., Briançon, L., Burtin, P., Quandalle B., Racinais J., Antoinet, E. et Porquet C. (2020). Instrumentation et modélisation numérique d'un essai de chargement statique réalisé sur inclusions rigides renforçant une fondation d'éolienne. Proceedings of JNGG 2020, 02-03 nov. 2020, Lyon, France