

MODÉLISATION PHYSIQUE ET NUMÉRIQUE DES MÉCANISMES DE TRANSFERT DE CHARGE DANS UNE FONDATION D'ÉOLIENNE.

PHYSICAL AND NUMERICAL MODELING OF LOAD TRANSFER MECHANISMS IN A WIND TURBINE FOUNDATION.

Janet MODU^{1,2}, Jean-François GEORGIN¹, Laurent BRIANÇON¹, Eric ANTOINET²

¹ Univ. Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Villeurbanne, France

janetoswald.modu@insa-lyon.fr, jean-francois.georgin@insa-lyon.fr,
laurent.briancon@insa-lyon.fr,

² ANTEA Group, 45166 OLIVET, France

janet.modu@anteagroup.com, eric.antoinet@anteagroup.com

RÉSUMÉ – Le présent article se concentre sur la prédiction de la fissuration au jeune âge d'une fondation d'éolienne d'un projet en cours, FUI25 FEDRE. Cette étude a été réalisée à l'aide de COMSOL[®], dont les résultats ont montré une influence significative des propriétés à jeune âge sur les dommages initiaux des structures en béton. Les considérations de réduction d'échelle (à l'échelle 1/10) sont également abordées.

ABSTRACT – The present paper focuses on the prediction of the early age cracking of a wind turbine foundation of an ongoing project, FUI25 FEDRE. This was performed using COMSOL, the results of which showed a significant influence of early age properties on initial damage of concrete structures. Downscaling considerations for the foundation at 1/10 scale is also discussed.

1. Introduction

La pratique actuelle pendant la phase de repowering des éoliennes est la déconstruction des fondations existantes et la construction de nouvelles fondations pour accepter des charges de vent plus importantes ou lorsque les fondations ont atteint la fin de leur durée de vie. Le projet de recherche, FUI25 FEDRE (Fondations d'Eoliennes Durables et REpowering) vise à proposer des fondations optimisées et évolutives par la réutilisation des fondations existantes qui permettront par la suite de réduire l'empreinte carbone et le coût du repowering. Pour ce faire, une fondation d'éolienne particulière (Fondation E6) située à Écoust-Saint-Mein dans les Hauts-de-France a été choisie comme turbine de référence pour le projet en question. La construction de la fondation s'est déroulée de septembre à octobre 2019 et a été conçue pour accueillir une tour d'éolienne de 3,6 MW d'une hauteur de 91 m. Elle a été largement instrumentée au cours de cette période et servira de base à la validation numérique et expérimentale. La réplique de cette fondation sera à l'échelle 1/10 et mise en œuvre dans le laboratoire GEOMAS à l'INSA Lyon.

Il est recherché dans le projet FEDRE une meilleure compréhension des mécanismes au niveau du sol et de la fondation sous des charges statiques et dynamiques. Le présent article se concentre sur le comportement de la fondation et en particulier : 1) l'effet des mécanismes couplés (thermo-hydro-mécanique-chimique) qui induisent des contraintes au cours du jeune âge dans la fondation en béton armé et 2) les considérations de facteur d'échelle dans la reproduction d'une fondation réelle en laboratoire. À l'aide des modèles 3D THMC implémenté dans le logiciel *COMSOL Multi-physics*[®], l'analyse numérique a été réalisée pour simuler les transferts thermiques, l'hydratation du béton et le retrait (dessiccation et autogène) au cours du jeune âge du béton.

Les modèles THMC ont été appliqués numériquement à l'échelle du laboratoire et à celle de la fondation réelle pour déterminer les dommages initiaux dans ces deux cas pour

ensuite concevoir une maquette qui reproduira au mieux le comportement de l'ouvrage réel. Cela permettra de l'utiliser comme un outil pour déterminer la solution de repowering.

2. Modélisation numérique

La fondation a été définie géométriquement sur COMSOL[®] et les paramètres nécessaires pour satisfaire les équations différentielles partielles intégrées ont été introduits pour la simulation du jeune âge. Pour concevoir le modèle à l'échelle du laboratoire, des facteurs d'échelle ont été définis pour les différentes étapes de la réduction d'échelle, de la géométrie à la charge appliquée.

2.1. Modèle de mise en place

Les figures 1a et 1c détaillent la structure composite mise en œuvre dans le logiciel, dans laquelle sont intégrés le renforcement et les ancres. Une seule moitié de la fondation a été modélisée en raison de la symétrie de la géométrie et de la charge. Une représentation plus détaillée du ferrailage et des barres de précontrainte est fournie aux figures 1b et 1d.

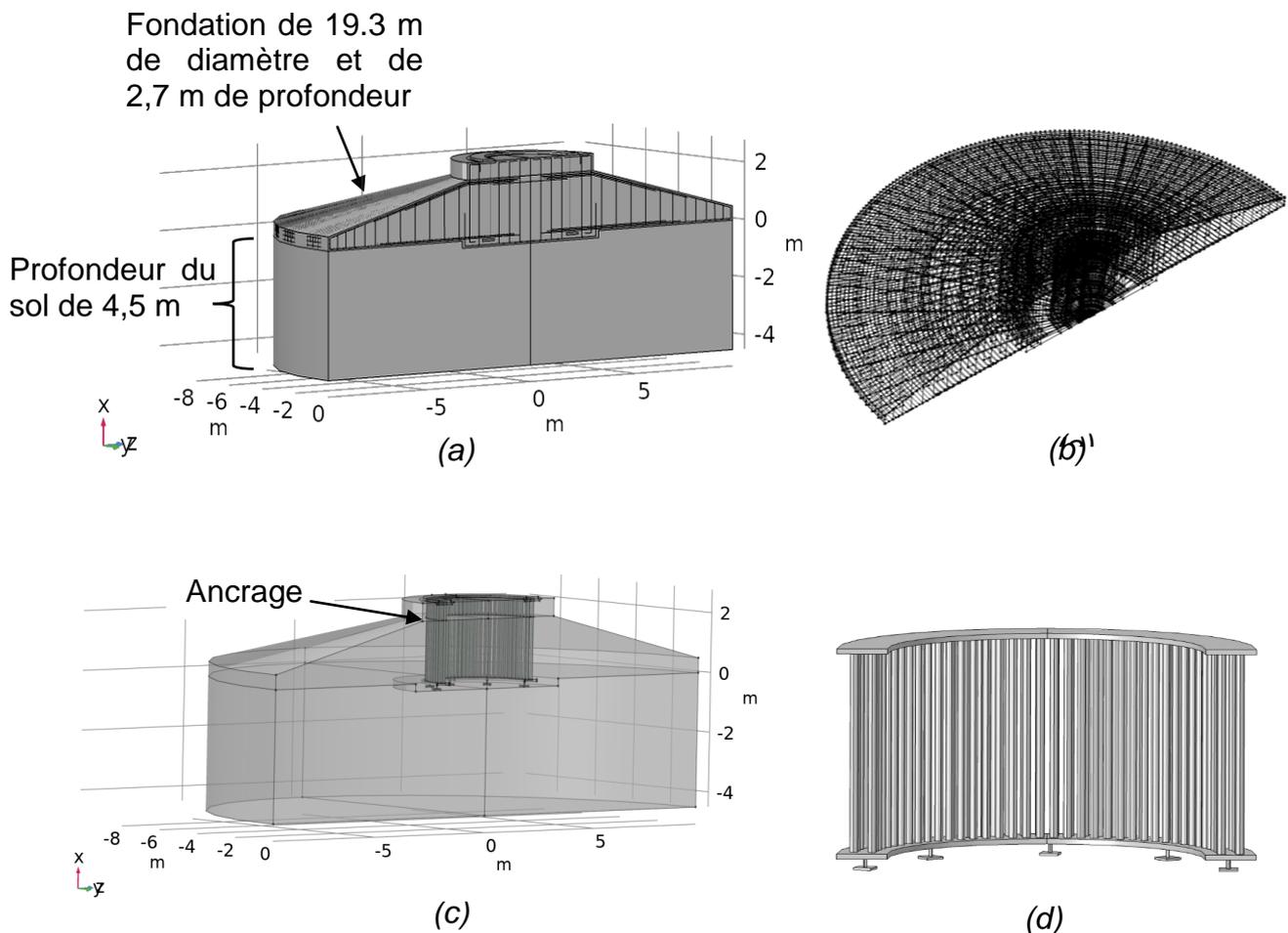


Figure 1. Représentation numérique de la Fondation E6 a) Géométrie générale b) Disposition des renforts c) Disposition des ancres d) Ancrages

2.2. Considérations relatives aux facteurs d'échelle

Le tableau 1 présente les facteurs d'échelle calculés pour différents paramètres structurels qui ont été pris en compte dans l'analyse vis à vis des charges statiques.

Tableau 1. Lois de similitude dérivées

Paramètres	Facteur d'échelle
Longueur	λ
Force	λ^2
Moment	λ^3
Raideur du sol	$1/\lambda$
Contrainte	1

2.3. Construction par étapes

Pour simuler les différentes phases de construction entreprises sur le site, des étapes de chargement ont été introduites dans le modèle numérique. Le diagramme (Figure 2) indique donc les étapes de la simulation, du coulage du béton à la mise en place du mât.

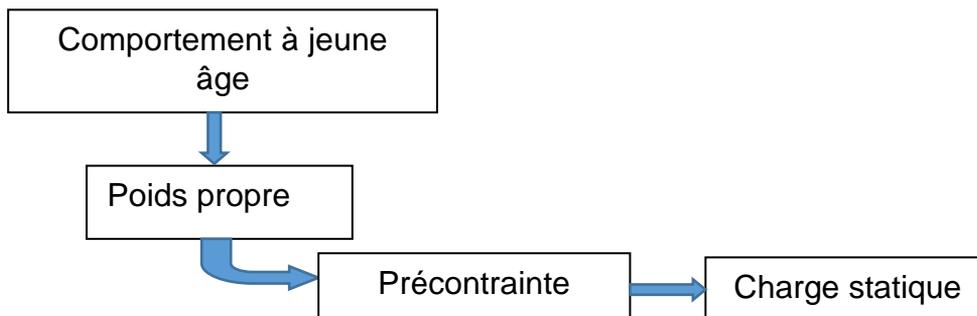


Figure 2. Chargement numérique par étapes

2.3.1. Comportement à jeune âge

Le modèle utilisé pour décrire le comportement des matériaux cimentaires à jeune âge est basé sur l'approche des milieux poreux [Coussy, 2004]. Différentes physiques associées à chacune des phases présentes dans les milieux poreux ont été couplées sur COMSOL[®] en utilisant le modèle THMC (Thermo-Hydro-Mécanique-Chimique). Dans la simulation, le fluage a été pris en compte, ce qui est un facteur de relaxation des contraintes induites normalement par le retrait, mais la dilatation thermique n'a pas encore été prise en compte.

En particulier pour la fondation E6, il y avait 62 % de laitier de haut fourneau, 35 % de clinker et les 3 % restants de matière secondaire. Cependant, la quantité de laitier de haut fourneau introduite dans la simulation était de 60 %, les 40 % restants étant du clinker, car

l'étalonnage de l'hydratation régissant le matériau secondaire n'avait pas encore été entrepris. En outre, l'activation de la teneur en laitier de haut fourneau anhydres par une partie du clinker hydraté n'a pas été prise en compte en raison de l'interaction complexe qui se produit et qui nécessiterait une étude plus approfondie. Par conséquent, dans la simulation actuelle, les deux phases de ciment présentes ; le clinker et le laitier de haut fourneau, ont été modélisées pour suivre indépendamment la loi d'hydratation (équation 1). La loi a été calibrée numériquement sur des tests de calorimétrie semi-adiabatique de Langavant avec des valeurs expérimentales données par Kolani et al. (2012) et les valeurs numériques par Buffo-Lacarrière et al. (2007).

$$\dot{\alpha} = k \Pi A e^{-\frac{Ea}{T}} \quad (1)$$

Avec $\dot{\alpha}$ [s^{-1}] le taux d'hydratation ; Π le coefficient d'accessibilité à l'eau ; A le coefficient d'activation chimique ; Ea [J/mol] l'énergie d'activation, T [°C] la température et k une constante de cinétique chimique.

Les conditions de maturation du béton ont été introduites dans le modèle numérique par la mise en place de coffrages comme indiqué dans la figure 3, avec les valeurs 1 et 2. Une température initiale de 15°C a été supposée et fixée à l'intérieur et à l'extérieur de la fondation et les propriétés physiques du coffrage circulaire en bois de 2 cm d'épaisseur étant définies dans le modèle pour le transfert thermique. Le décoffrage a été réalisé numériquement le cinquième jour après le début du coulage, les conditions hydriques et thermiques après cette période étant celles de l'air environnantes. Des points géométriques d'intérêt ont été choisis pour montrer les propriétés dépendantes du temps au jeune âge et pour montrer les différences qui surviennent en raison de l'échelle. Ces points sont représentés dans la figure 4 indiqué comme FP₁ et FP₂ représentant respectivement un point au cœur et à la surface de la fondation.

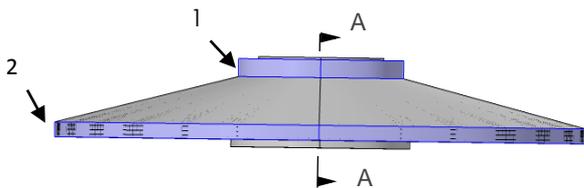


Figure 3. Placement de coffrages dans la fondation à échelle réelle

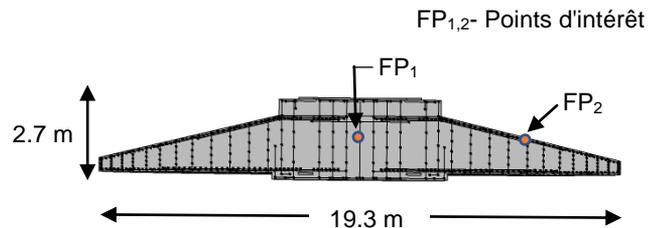


Figure 4. Section A-A.

Le sol a été défini avec un modèle élastique linéaire comme première approximation sur une profondeur de 4,5 m pour éviter les effets de bords. Pour les propriétés thermiques du sol, les valeurs par défaut de COMSOL[®] ont été utilisées.

2.3.2 Charge de précontrainte

Pour faciliter les calculs, un modèle élastique linéaire a été utilisé sur la fondation en béton et a été jugé approprié pour comparer les niveaux de contraintes dans la limite élastique pour les deux échelles de la fondation. Par la suite, la manière la plus appropriée pour introduire un modèle d'endommagement sera étudiée et des interprétations seront faites lors d'une révision ultérieure.

Les ancrages de la fondation E6 ont été soumis à une charge de précontrainte de 580 kN par boulon. Pour simuler numériquement cette précontrainte, une déformation externe égale à 2250 $\mu\epsilon$ a été imposée, en rapport avec les sections des barres de précontrainte. Pour un modèle à l'échelle 1/10, une charge de 5,8 kN a été imposée (Tableau 1).

2.3.3. Charge statique

Les charges statiques imposées sont celles sur la fondation de l'éolienne E6. En considérant la moitié de la fondation, les charges statiques de dimensionnement sont : pour la charge verticale, $V=1\ 843\ \text{kN}$, pour la charge horizontale, $H=383\ \text{kN}$ et pour le moment, $M=35\ 100\ \text{kN.m}$. Les charges appliquées sur le modèle de laboratoire sont déterminées en utilisant les facteurs d'échelle affectés à chaque paramètre (Tableau 1). Par exemple, la charge verticale à l'échelle du laboratoire = λ^2 x la charge verticale à l'échelle réelle et le moment à l'échelle du laboratoire = λ^3 x le moment à l'échelle réelle. Avec ici, un facteur d'échelle λ est égal à 1/10.

3. Résultats

Pour prévoir les contraintes que subira la fondation à l'échelle du laboratoire, les mêmes conditions que celles de la fondation à échelle réelle ont été appliquées sur un modèle numérique réduit à 1/10.

3.1. Comportement des jeunes âges

Les cinétiques de deux des composantes du comportement au jeune âge (le niveau d'hydratation et la température), sont présentées sur les Figures 5. On constate que la fondation à l'échelle réelle atteint des niveaux d'hydratation plus élevés et des températures correspondantes plus élevées qu'à l'échelle du laboratoire. La dissipation rapide de la chaleur dans l'environnement est observée à l'échelle réduite (Figure 6). Cela est dû à l'effet de masse bien connu dans les ouvrages d'arts, c'est pourquoi un ciment au laitier a été utilisé de manière à limiter les températures du béton en dessous de 70°C .

Ces résultats sont obtenus avec les paramètres d'entrée actuels. Cela peut ne pas refléter exactement le comportement réel de la fondation, car certaines valeurs ont été supposées telle que fournie dans la littérature, mais cela donne un aperçu qualitatif de l'impact de l'échelle sur deux structures géométriquement similaires. Une prochaine fondation d'éolienne sera instrumentée spécifiquement pour suivre l'évolution de la température à jeune âge.

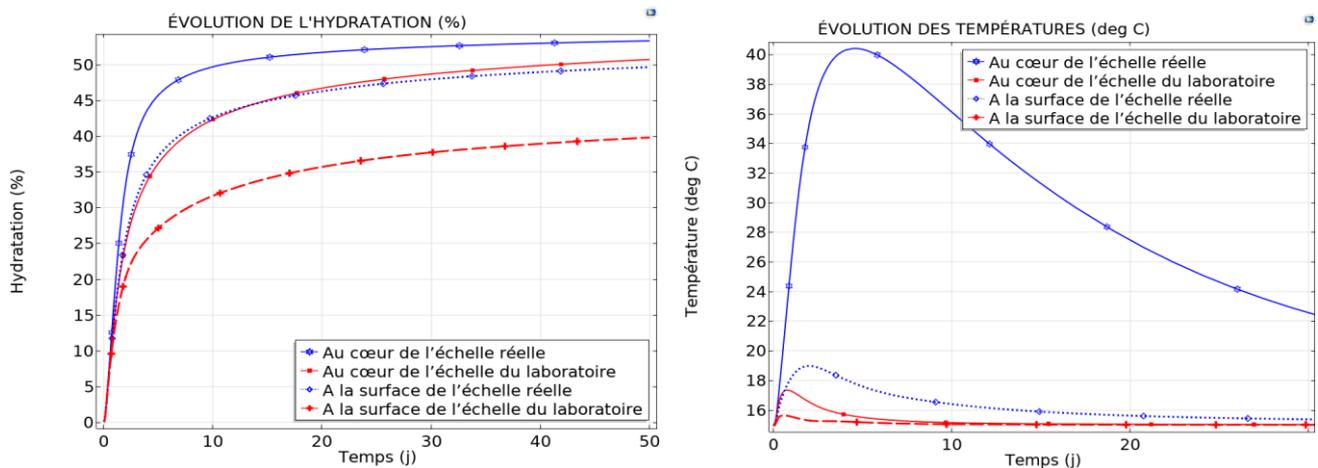


Figure 5. Évolution des propriétés du jeune âge a) hydratation b) température

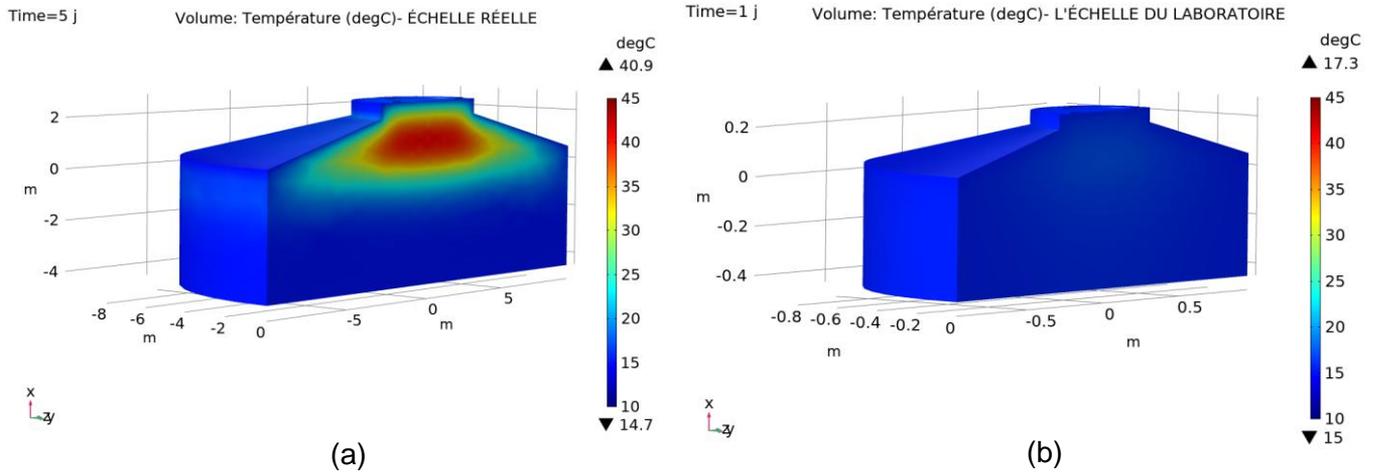


Figure 6. Profil de température (°C) au moment de la température maximale subie a) à t = 5 jour pour la fondation à échelle réelle b) à t = 1 jour pour la fondation à échelle du laboratoire

La figure 7 montre un potentiel élevé de fissuration à la surface des deux échelles de la fondation de l'éolienne en raison du retrait. Cependant, le potentiel de fissuration par retrait à l'échelle du laboratoire est plus élevé qu'à l'échelle réelle, ce qui peut être dû à un rapport surface/volume plus élevé, l'exposant à un retrait de surface plus important. D'autre part, au cœur de la fondation (point FP_1), la contrainte est nettement plus faible qu'à la surface et présente également des différences insignifiantes entre les deux échelles de la fondation. À un moment où les fondations subissent un retrait maximal au point FP_2 , les contours de la contrainte de retrait sont comme indiqués sur la figure 8.

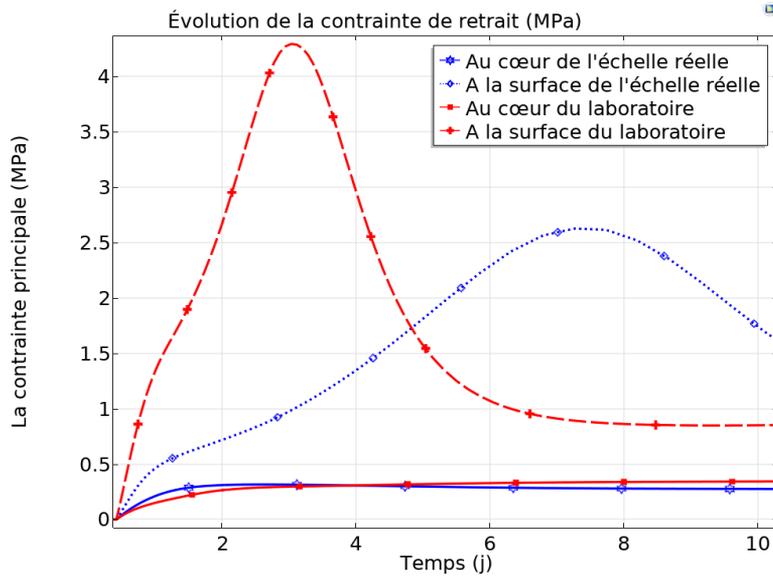


Figure 7. Évolution de la contrainte de retrait au point FP_1 et FP_2

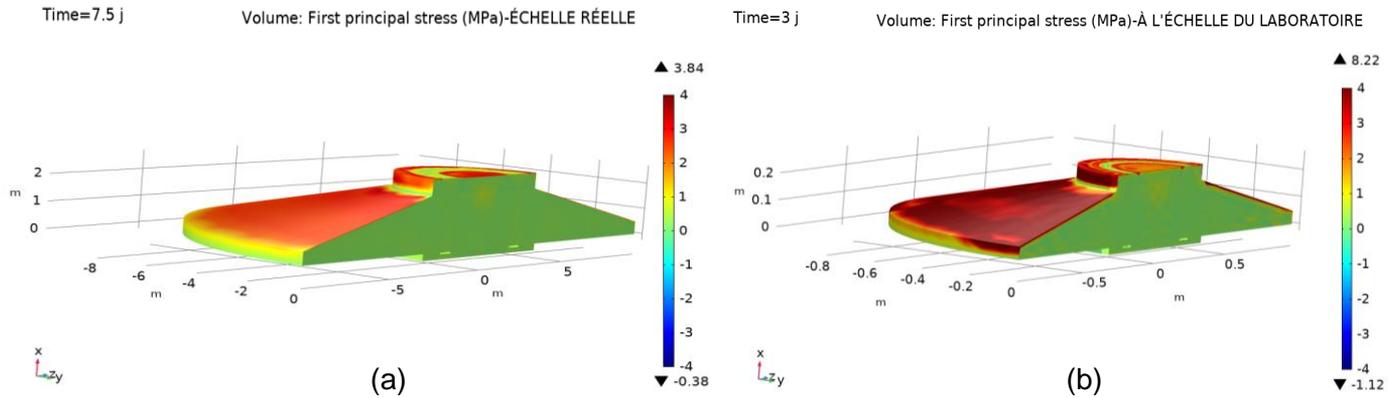


Figure 8. Contrainte dans le béton (MPa) au moment de la contrainte de retrait maximal de la surface au point FP_2 a) échelle réelle (b) échelle du laboratoire

En raison des niveaux de retrait plus élevés près de la surface des fondations du laboratoire, les barres de renforcement sont relativement plus comprimées que dans les fondations réelles (Figure 9). On suppose que l'adhérence est parfaite à la surface des barres en contact avec le béton.

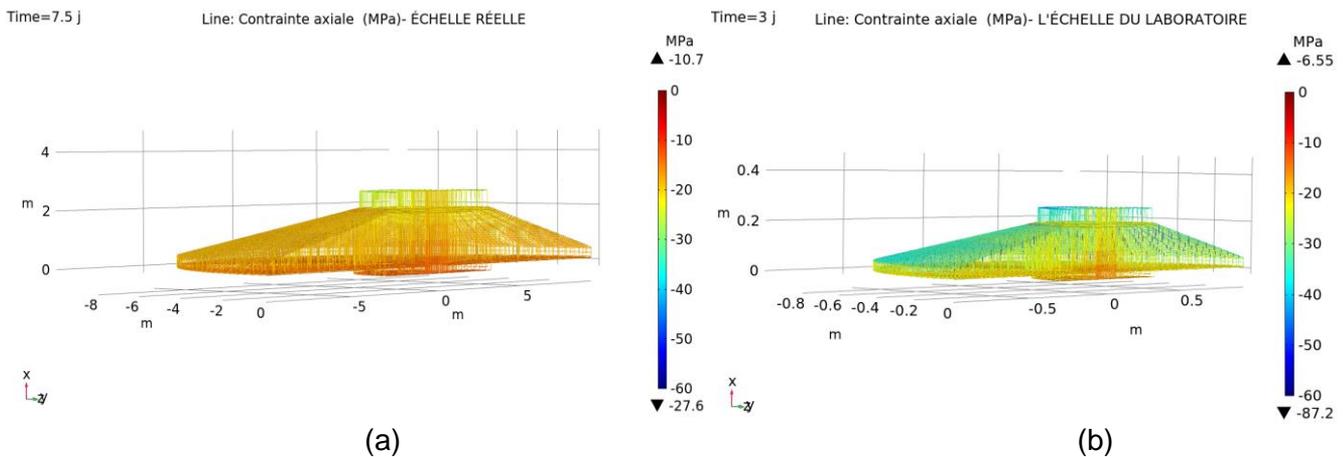


Figure 9. Contrainte axiale de renforcement (MPa) au moment de la contrainte de retrait maximal de la surface au point FP_2 (a) échelle réelle (b) échelle du laboratoire

3.2 Charge statique et précontrainte

La figure 10 ne montre aucun effet d'échelle dû à la charge statique. Ceci est attendu car la simulation est effectuée en supposant le comportement élastique. L'objectif de cette simulation est de montrer les respects des facteurs d'échelle en termes de géométrie, charge, moment et raideur qui, en supposant l'absence d'effet d'échelle matériau, doivent donner les mêmes valeurs de contrainte.

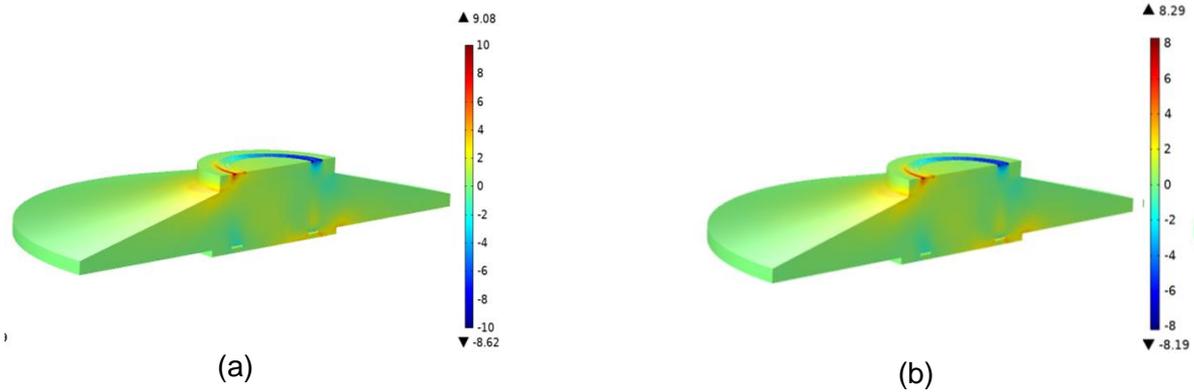


Figure 10. Contrainte principale majeure dans le béton dû à la charge statique (MPa) (a) échelle réelle (b) échelle du laboratoire

4. Conclusion

L'étude montre que les propriétés à jeune âge ont un effet important sur le potentiel de dommages dans les fondations des éoliennes. Cependant, une prédiction du potentiel de dommages à l'échelle du laboratoire donne des différences significatives dans les contraintes au jeune âge par rapport à l'échelle réelle, en fonction de l'emplacement spatial dans la fondation et l'évolution des contraintes. De plus, comme le modèle élastique a été utilisé dans la simulation présentée, le phénomène bien connu de l'effet de d'échelle matériau n'a pas été capturé, cependant, il a été démontré que les niveaux de contraintes sont conservés dans les deux échelles de fondation vis-à-vis d'une sollicitation purement mécanique. Ceci est le résultat d'une prise en compte appropriée des échelles dans les conditions de charge et les effets de bords. Outre l'effet de d'échelle matériau, les différences dans les propriétés du jeune âge à l'échelle du laboratoire par rapport à l'échelle réelle peuvent contribuer à rencontrer des différences lors de la prévision de la déformation ultime des fondations de l'éolienne sur le site à l'aide de modèles de laboratoire. Après les simulations numériques, l'expérimentation est nécessaire pour vérifier les conclusions numériques énoncées dans le présent document.

5. Références

- Buffo-Lacarrière L., Sellier A., Escadeillas G., Turatsinze A. (2007). Multiphase finite element modeling of concrete hydration. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, pp. 131–138.
- Coussy O., Dangla P., Lassabatère T., Baroghel-Bouny V. (2004). The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials. *Materials and structures*, Vol. 37.
- Kolani B., Buffo-Lacarrière L., Sellier A., Escadeillas G., Boutillon L., Linger L. (2012). Hydration of slag-blended cements. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 34, pp. 1009–1018.