

Méta-modèle de couplage Fondations/Pylônes pour prédire les risques d'arrachement

J.A. Redford¹, D. Mesbah¹, D. Collot¹, D. Chauveheid¹, J. Said²

¹Mews Labs, 191 avenue Aristide Briand, Cachan, {john.redford, daria.mesbah, dorian.collot, daniel.chauveheid}@mewslabs.com

²RTE, Réseau de Transport et d'Electricité, 7C Place du Dôme, Paris La Défense

Résumé — Dans cet article, nous développons une approche de simulation afin de modéliser les interactions entre les vents violents et les pylônes électriques. Le modèle prend en compte à la fois la structure métallique du pylône, la fondation en béton ainsi que le sol autour de la fondation. Ce travail se focalise sur les adaptations réalisées dans la structure du modèle afin de garantir sa rapidité et sa flexibilité. La version actuelle comporte deux modèles couplés de manière faible via un *surrogate model*. Les performances des différents modèles sont correctes et ils permettent bien de déterminer le moment où la structure du pylône risque de subir un déplacement non-admissible du point de vue de l'intégrité de la structure.

Mots-clefs — Simulation, *surrogate model*, fondations, pylônes, Mohr-Coulomb, Code Aster, FEniCSx.

1. Introduction

Le transport d'électricité des centrales aux usagers se fait principalement par des lignes aériennes. Ces lignes permettent de faire passer le courant de manière efficace, mais nécessitent de rester éloigné de l'environnement. Les câbles sont supportés par des pylônes, dont la conception doit répondre à plusieurs contraintes. La structure doit à la fois préserver une esthétique adaptée et limiter la quantité de matériau utilisée, tout en garantissant une résistance suffisante face aux sollicitations extrêmes auxquelles elle peut être exposée. Les vents forts, causés par les tempêtes sont particulièrement redoutés. Les contraintes peuvent en effet faire tomber un pylône et déclencher une chute en cascade du fait des conducteurs qui les relient entre eux, comme observé lors de la tempête de 1999 en France. Ainsi, quantifier la vitesse de vent critique est une étape importante [1], mais qui requiert de prendre en compte de nombreux facteurs, à la fois météorologiques (force et orientation du vent), structurels (forme du pylône et des conducteurs), et environnementaux (type de sol et topographie).

La taille de la structure, sa criticité ainsi que la multitude de conditions rencontrées sur un réseau rendent impossible une approche purement empirique, et imposent le recours à la modélisation physique et la simulation numérique. Les différents composants du système ont déjà été modélisés séparément, que ce soit le sol [2,3], la fondation [4,5], ou les pylônes [6,7]. Cependant, à notre connaissance, peu de modèles prennent en compte la structure en intégrant l'ensemble des éléments mentionnés, et aucun ne présente à ce jour un niveau de maturité permettant une utilisation simple dans un contexte industriel.

Le but de cette étude est de modéliser la résistance d'un pylône en considérant un système à trois composants : le sol, la fondation en béton et la structure métallique du pylône. Chaque composant nécessitant des approches différentes, nous avons construits plusieurs modèles éléments finis qui seront ensuite couplés. Le modèle d'interaction sol/fondation a été développé sous Code Aster [8,9], tandis que le modèle de structures a été développé sous FEniCSx [10], afin d'obtenir un code rapide, modulaire, performant et open-source. Dans un premier temps, un couplage faible a permis d'obtenir des premières

estimations des déplacements induits par des vents violents. Enfin, afin de permettre une industrialisation du code et une utilisation sur l'ensemble des actifs du réseau, des *surrogate models* ont été développés en utilisant la librairie Optibrain [11].

2. Modélisation des composants

2.1 Composant « Fondation/Sol »

La principale contrainte subie par les fondations est une contrainte en compression causée par le poids du pylône et des câbles. Cependant lors de forts épisodes de vents, des forces de traction peuvent apparaître, pouvant déformer, endommager, et éventuellement conduire à une rupture de la fondation. Le modèle se focalise donc principalement sur ces forces de traction.

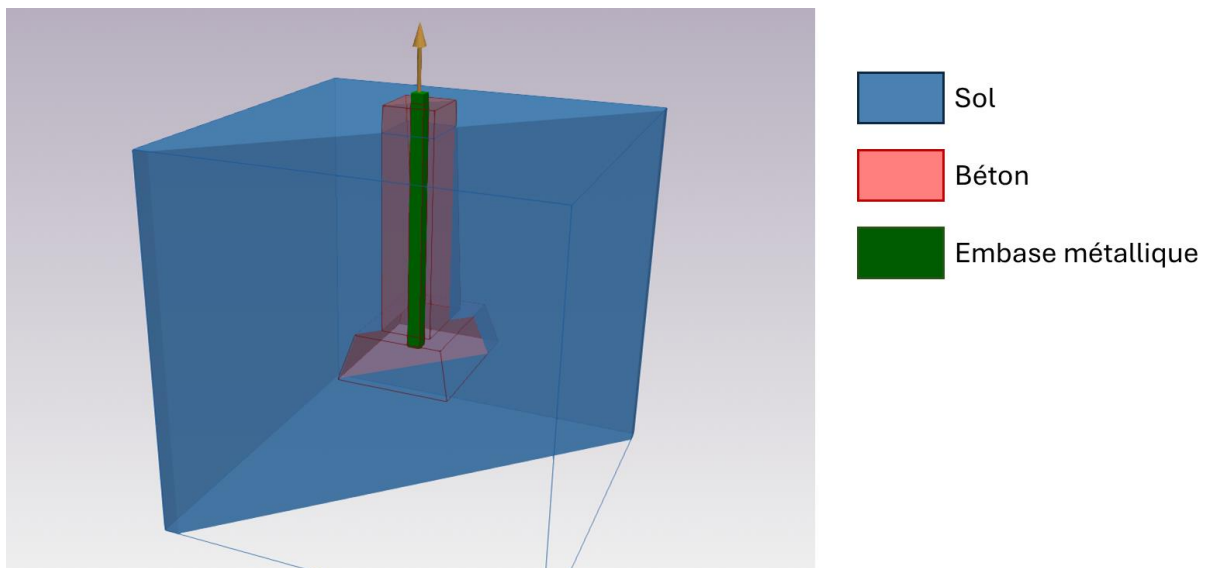


Figure 1 - Modèle de la fondation utilisée dans les simulations. La fondation (en rouge) est une fondation simple, avec une cheminée et une semelle sous le sol (en bleu). L'embase métallique (en vert) est coulée dans le béton, elle est ici représentée par une barre lisse.

La simulation comporte trois parties. La première consiste en un bloc en béton, modélisé comme un matériau élastique fragile [12]. La forme de bloc correspond à la forme standard des fondations, comme décrit sur la figure 1. La seconde partie correspond à l'embase métallique, décrites comme un matériau élastique. La force est appliquée sur cette embase, avec un certain angle qui dépend de la direction du vent. Les ruptures à l'interface « béton-acier » ne sont pas prises en compte dans la version du modèle décrite ici. Enfin la troisième partie représente le sol, décrit par une loi de Mohr-Coulomb [13]. Les simulations ont été réalisées en utilisant Code Aster. Pour quantifier la force d'arrachage de la fondation par rapport à un rupture du sol ou du béton, des critères basés sur les variants ont été utilisé. Ces variants indiquent une rupture locale dans la structure.

2.2 Composant Pylône

La résolution du problème mécanique sur les pylônes repose sur la bibliothèque FEniCSx [10], une framework open-source dédié à la résolution d'équations aux dérivées partielles (EDP) par la

méthode des éléments finis. Son efficacité repose sur une formulation variationnelle symbolique et une intégration native avec PETSc, permettant la résolution parallèle de systèmes linéaires et non linéaires de grande taille. Sur cette base, le code femOHL (Finite Element Method for Overhead Lines) a été développé pour évaluer l'intégrité mécanique des infrastructures de transport d'électricité soumises à des conditions climatiques sévères. Il permet notamment de simuler le comportement géométriquement non linéaire des pylônes soumis à de fortes sollicitations de vent.

Le pylône est modélisé comme une structure treillis tridimensionnelle composée de membrures en acier ($E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$, $\rho = 7890 \text{ kg/m}^3$) de comportement élastique linéaire. Chaque membrure est représentée par un élément poutre de Timoshenko à six degrés de liberté par nœud (trois translations et trois rotations). Bien que les membrures réelles soient réalisées en cornières, à profil en L, des sections circulaires équivalentes sont adoptées, définies à partir des dimensions géométriques des cornières, dont sont déduits les moments d'inertie en flexion et en torsion. Cette modélisation permet de reproduire de manière cohérente les effets de flexion, de torsion et les couplages entre modes de déformation.

Les conditions aux limites sont modélisées par des encastremets aux pieds du pylône, bloquant les six degrés de liberté et permettant d'extraire directement les réactions d'appui (forces et moments) transmises aux fondations décrites en section 2.1. Les chargements considérés sont le poids propre, modélisé comme une force répartie, et la pression dynamique du vent, traduite en forces nodales équivalentes calculées à partir de la vitesse du vent $v = [v_x \ v_y \ v_z]$, de la surface exposée au vent S_p , de la densité de l'air ρ_{air} et d'un coefficient de traînée typique pour les membrures d'un pylône ($C_d \approx 2.1$).

$$\vec{F}_w = \frac{1}{2} \rho_{air} C_d S_p \|v\|^2 \vec{n}$$

La résolution du problème non linéaire est assurée par un algorithme incrémental de Newton–Raphson implémenté dans femOHL. Les chargements sont appliqués progressivement afin de garantir la stabilité et la convergence du processus itératif, tout en capturant l'évolution de la rigidité effective sous grandes déformations.

2.3 Couplage faible

Une première version du couplage a été testée. Un *surrogate model* permet de mesurer la force minimale nécessaire au déplacement du sol selon les caractéristiques du sol, de la fondation et la direction de traction. Cette force est ensuite utilisée dans les simulations de pylône. A chaque pas de temps, la force subie par la fondation est comparée à cette valeur limite. Si elle est supérieure, la simulation s'arrête, ce qui permet de déterminer la vitesse de vent maximale supportée par la fondation du pylône.

2.4 Méta-modélisation

Le couplage faible ne nécessite pas toutes les données de simulations des fondations mais uniquement un nombre limité de sorties. Il est donc possible de créer un *surrogate model*, afin de prévoir ces valeurs à partir des paramètres sans avoir besoin de passer par une simulation complète. Ce modèle prend en entrée les caractéristiques du béton (résistance en traction, rapport résistance en traction/compression et module d'Young) et les caractéristiques du sol (angle de dilatation, angle de friction cohésion et module d'Young), et donne en sortie la force minimale nécessaire pour conduire à la rupture de la fondation (soit un déplacement du sol, soit une rupture du béton).

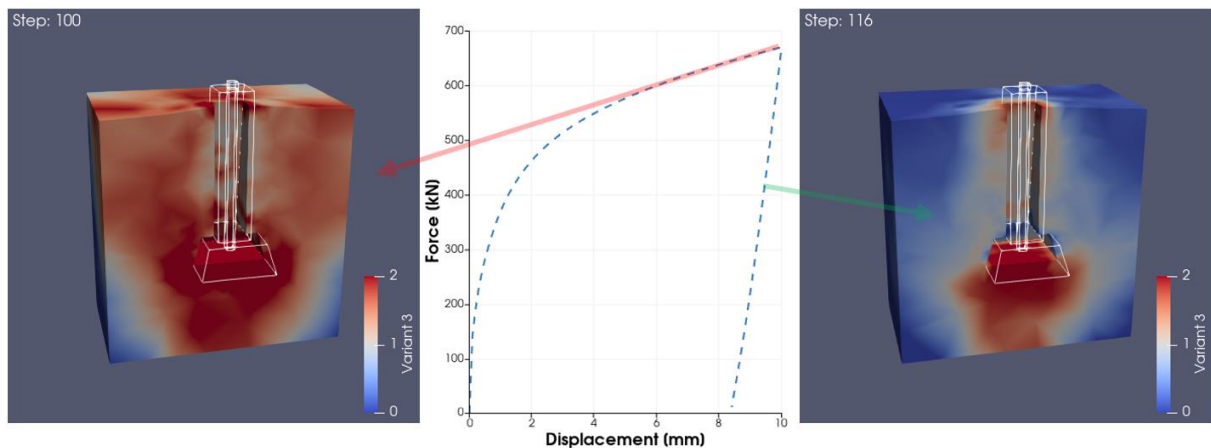
La création de ces modèles a été réalisé avec la librairie python OptiBrain [11]. Cette librairie permet d'entraîner plusieurs modèles en parallèle sur le même jeu de donnée et de

choisir le plus performant. Plusieurs modèles d'arbres de décisions ont été testé (catboost, xgboost, et lgbm) ainsi que des modèles de krigeage. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour les modèles à base d'arbre de décision [14]. Une fois le modèle entraîné, OptiBrain permet également de sauvegarder et charger rapidement les *surrogates models* ce qui facilite leur intégration dans des chaînes de calculs plus larges.

3. Résultats

3.1 Déplacement du sol

Un cas intéressant pour valider le comportement du modèle est celui d'un cycle de chargement. En effet, le vent souffle par rafale, ce qui conduit à des variations cycliques de la contrainte. Le déplacement vertical est appliqué au bout de l'embase métallique avant de revenir à zéro. La Figure 2 montre la force subie lors de ce cycle. Dans cet exemple, à la fin du cycle, la fondation a subi un déplacement de 8 mm.



Le modèle est donc capable de reproduire des déplacements successifs lors de cycle de chargement. Ce comportement sera étudié dans de futures implémentations du modèle. Dans ce travail, la fondation est considérée comme « ruinée » dès lors qu'un déplacement résiduel est observé. Il est alors possible de déterminer la force maximale supportées avant la rupture. La figure 3 montre l'effet de la cohésion du sol sur cette force. 472 simulations ont été réalisées avec des paramètres échantillonné selon une distribution uniforme (Tableau 1).

Table 1 - Valeurs minimum et maximum des paramètres de sol utilisés pour les simulations

Intervalles des paramètres de sol		Intervalles des paramètres du béton	
Angle de dilatation [°]	[8, 12]	Résistance en traction [MPa]	[5, 20]
Cohésion [kPa]	[1, 120]	Rapport entre résistance en compression/traction	[8, 20]
Angle de fiction [°]	[4, 24]	Module d'Young [GPa]	[5, 15]

E_{soil} [MPa]	[0.1, 0.17]		
------------------	-------------	--	--

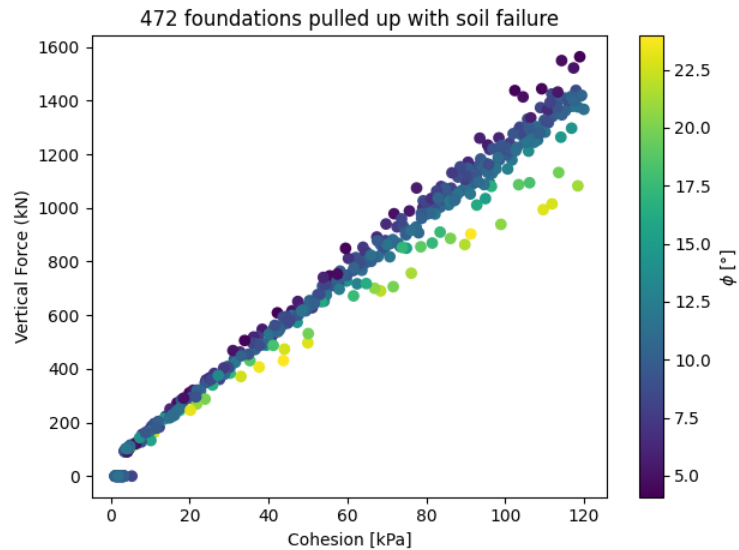


Figure 3 - Force verticale déclenchant une rupture du sol en fonction de la cohésion

3.2 Méta-modélisation de la force maximale supportée

Afin de faciliter le couplage entre les deux modèles, les sorties du modèle fondation/sol ont été incluses dans un *surrogate model*. Le modèle avec la meilleure performance est un modèle Catboost. Ce modèle permet de déterminer la force maximale avant l'arrachage du sol en fonction de la cohésion c , de l'angle de friction interne ϕ et du module d'Young E_{soil} ; ainsi que la force maximale avant la rupture du béton en fonction des résistances en traction σ_{yT} , compression σ_{yC} et du module d'Young $E_{concrete}$. La performance du modèle est très bonne, comme montré sur la Figure 4 ($R^2 > 0.9$), ce qui est rassurant sur un modèle simple. De futurs développements permettront de prendre en compte des lois de comportements plus complexes, ce qui pourra rendre les estimations plus difficiles.

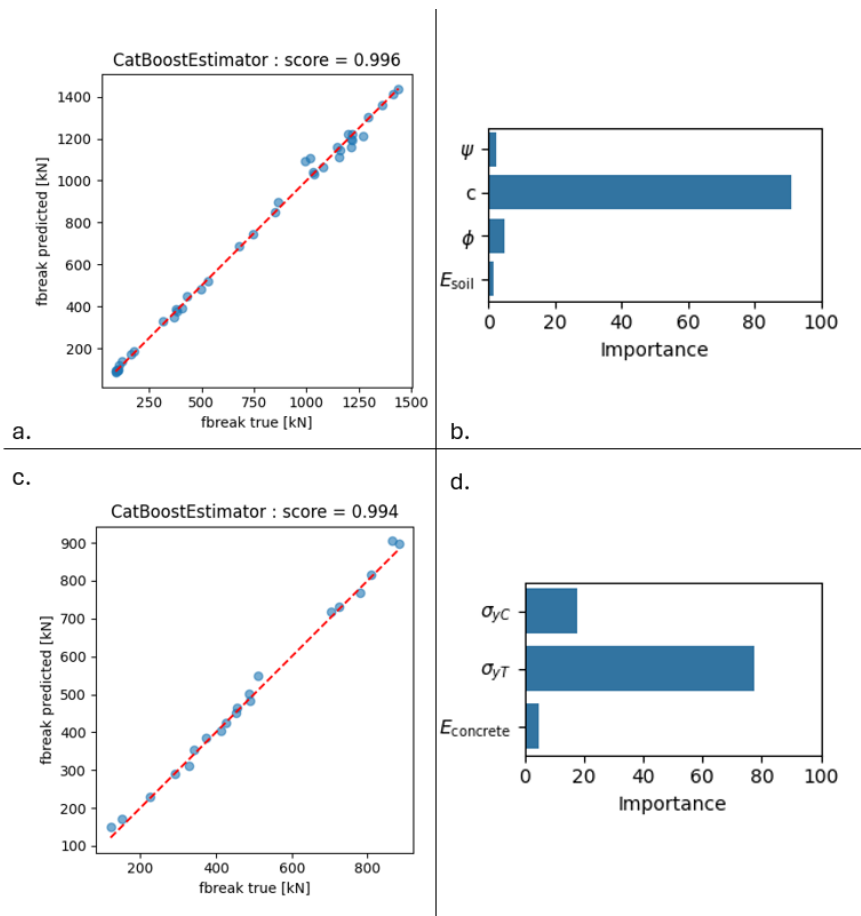


Figure 4 - Performance du métamodèle : les figures a. et b. concernent la rupture du sol. Elles représentent respectivement la corrélation entre les forces à rupture prédites par le métamodèle et les valeurs exactes ; et l'importance des différents paramètres pour le modèle. Les figures c. et d. représentent les mêmes données mais dans le cas de la rupture du béton.

3.3 Vitesse de vent supportée par le pylône

La prédiction, à partir du *surrogate model*, des forces maximales supportées par les fondations est ensuite introduit dans le code femOHL afin d'étudier l'intégrité des infrastructures de transport d'électricité sous l'effet du vent. En effet, cette valeur représente la charge critique à partir de laquelle les appuis des pylônes cessent de se comporter comme des encastremements parfaits, pouvant mener à la chute du pylône. Pour cela, la force critique issue du métamodèle est comparée aux réactions d'appui obtenues au niveau des 4 fondations de chaque pylône, comme illustré sur la Figure 5 (gauche).

L'évaluation précise de la résistance des fondations constitue un élément déterminant pour la prédiction de la résistance globale des pylônes au vent. La Figure 5 (droite) présente les profils de résistance au vent obtenus pour différentes valeurs estimées de résistance des fondations, mettant en évidence la sensibilité du comportement global de la structure à la robustesse des fondations. L'orientation du vent est également un facteur qui influence la chute : plus la surface exposée au vent est importante, moins la vitesse du vent supportées est élevé. Les simulations ont été stoppée lorsque le vent dépasse 45m/s.

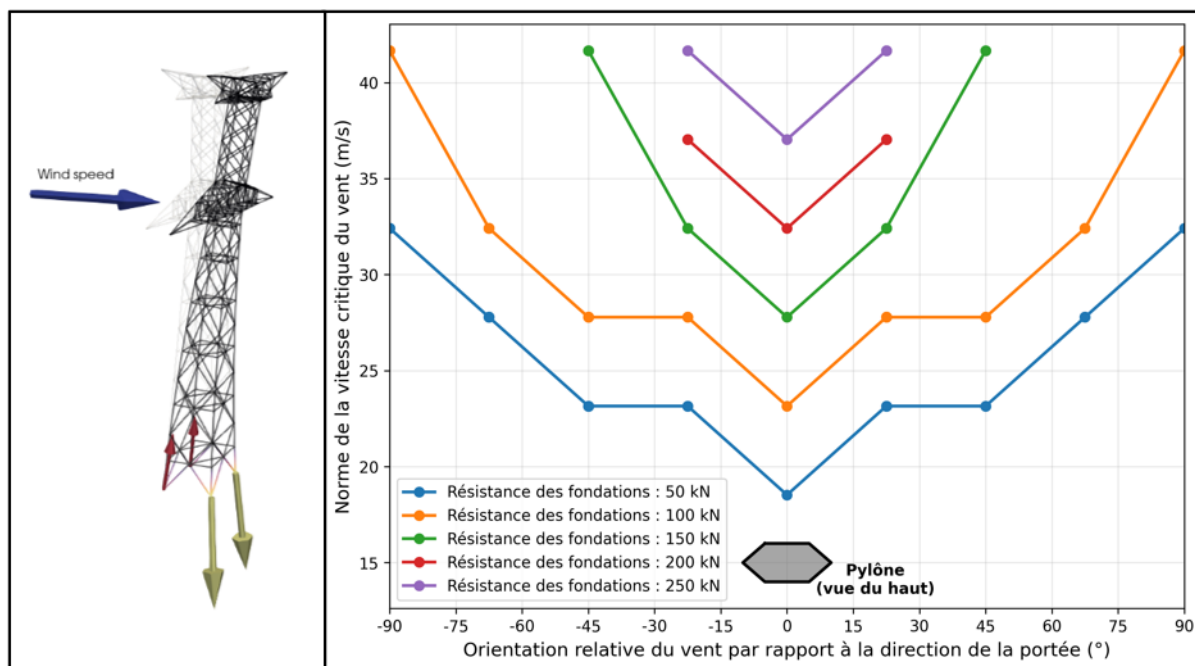


Figure 5 - Modélisation d'un pylône isolé. A Gauche : déplacements amplifiés du pylône soumis au chargement de vent et réactions d'appui correspondantes. A Droite : profil de résistance du pylône au vent.

4. Conclusions

L'approche développée dans cette étude permet de modéliser l'effet des vents violents sur les pylônes à partir d'un couplage entre deux niveaux de modélisation. Cette stratégie offre des simulations à la fois rapides et suffisamment détaillées pour intégrer un grand nombre de paramètres physiques. Le modèle présenté tient compte de la géométrie du pylône, de celle de la fondation, ainsi que des propriétés mécaniques du sol. Il devient ainsi possible de représenter l'ensemble du réseau électrique en considérant les spécificités locales de chaque site, et de formuler des décisions de gestion adaptées à chaque configuration. La rapidité d'évaluation du modèle constitue enfin un atout essentiel pour l'analyse d'un réseau de grande échelle.

Le modèle actuel repose sur un couplage faible entre la structure du pylône et le système fondation/sol, ne permettant de représenter que les ruptures complètes du pylône. Le modèle fondation/sol, plus détaillé, offre toutefois la possibilité de quantifier les déplacements lors des cycles de chargement. Une évolution vers un couplage fort, dans lequel les déformations du sol influenceraient directement la réponse mécanique du pylône, permettrait de prédire de manière continue l'inclinaison progressive de la structure avant la rupture. Ce développement, en cours, vise à améliorer la fidélité physique et la capacité prédictive du modèle global.

Le nombre de paramètres est également important afin de pouvoir rendre compte du vieillissement du réseau. En effet, les paramètres qui apparaissent dans cette étude sont ceux qui sont susceptibles de varier au cours de la vie de pylône. Le risque de chute peut donc être évalué plusieurs fois au cours de la vie de l'actif afin de définir le moment optimal pour intervenir sur celui-ci et éviter une chute. Ces différentes évaluations renforcent le besoin d'avoir un simulateur rapide pour pouvoir prendre les décisions en temps réel sur le réseau entier. Les modèles physiques permettent également de faire des extrapolations robustes, ce qui permet de tester des scénarios, mais demande, encore une fois de pouvoir faire des simulations rapidement tout en gardant un nombre de paramètres suffisamment élevé pour avoir des scénarios intéressants.

Cette méthode permettra également d'éprouver les logiques actuelles de dimensionnement des pylônes et fondations, en prenant en compte le sol et les fondations de manière différentes.

References

- [1] A. Hadane, J.A. Redford, M. Gueguin, F. Hafid, J.M. Ghidaglia. CFD wind tunnel investigation for wind loading on angle members in lattice tower structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 236, 105397, 2023.
- [2] M.J. Brown, C. Davidson, C.J. Shepherd, S.M. Flint, S. Mbisike. Improved uplift capacity design for overhead line equipment in granular soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2025.
- [3] S. Glowienka, A. Fischer. Analysis for foundations of electricity pylons. 12th International Probabilistic Workshop, p. 97-103, 2014
- [4] G. Philipponnat. Constructions métalliques : Fondations pour pylônes et mâts. *Techniques de l'ingénieur. Construction*, 4(C2682), C2682-1. 1992.
- [5] A. Jendoubi, F. Legeron. Soil-Structure Interaction Effects on Dynamic Behaviour of Transmission Line Towers. *Computers, Materials & Continua*, 70(1), 1461-1477, 2022.
- [6] Bouchard, P.-L. (2013). *Calcul de la capacité de pylônes à treillis avec une approche stabilité*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- [7] Hadi, S. (2016). *Analyse de la stabilité des pylônes à treillis*. Mémoire de Master en Génie Civil, spécialité Structures, Faculté des Sciences de l'Ingénierat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.
- [8] Électricité de France. (1989–2023). Open source finite element code_aster[i], [i]Analysis of Structures and Thermomechanics for Studies and Research (Version 16). www.code-aster.org
- [9] ABBAS, M. Introduction à code_aster, clé U1.02.00, 2018.
- [10] I. A. Baratta, J. P. Dean, J. S. Dokken, M. Habera, J. S. Hale, C. N. Richardson, M. E. Rognes, M. W. Scroggs, N. Sime, and G. N. Wells. DOLFINx: The next generation FEniCS problem solving environment, preprint (2023). [doi.org/10.5281/zenodo.10447666]
- [11] [GitHub - mews-labs/optibrain](https://github.com/mews-labs/optibrain)
- [12] F. Hamon, Loi de comportement ENDO_ISOT_BETON, R7.01.04, 2018.
- [13] M. Kham, Loi de Mohr-Coulomb, R7.01.28, 2013.
- [14] Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., & Gulin, A. (2018). CatBoost: unbiased boosting with categorical features. *Advances in neural information processing systems*, 31.