

Utilisation de modèles simplifiés et de données de vent pour la prédiction de la fatigue des câbles de lignes aériennes

E. Cieren¹, M. Gueguin¹, S. El Idrissi Raghni¹, F. Hafid^{2,3,4}, J. Saïd², J.-M. Ghidaglia^{3,4}

¹ Eurobios, 61 avenue du président Wilson, 94230 Cachan, {emmanuel.cieren, maxime.gueguin, sami.elidrissi}@eurobios.com

² RTE-R&D, Immeuble Window, 7 place du dôme, 92073 La Défense, {fikri.hafid, julien.saïd}@rte-france.com

³ Centre Borelli, ENS Paris-Saclay, CNRS, Univ. Paris-Saclay, 91190 Gif-sur-Yvette

⁴ MSDA, Université Mohamed VI, Benguerir, Maroc

Résumé — Plusieurs facteurs sont considérés comme influents dans la durée de vie des câbles de lignes aériennes. D'un point de vue mécanique, les vibrations des câbles représentent une contribution importante à l'apparition de fissures, et sont le point central du présent article. En utilisant les distributions de vent issues d'un modèle météorologique, une modélisation d'un vent stochastique incluant des variations locales, un modèle vibratoire de câble et un modèle d'endurance du conducteur, on peut estimer l'endommagement mécanique d'une portée. Cet endommagement peut ainsi être comparé à celui d'autres portées pour aider et améliorer le ciblage des opérations de maintenance à l'échelle du réseau.

Mots clés — Lignes aériennes haute-tension, vibration, vent, fretting-fatigue, endommagement.

1 Introduction

La gestion des actifs est un défi majeur pour RTE (*Réseau de Transport d'Électricité*) puisque la maintenance et le renouvellement des composants du réseau haute et très haute tension représentent des postes de dépense importants. Ainsi, améliorer l'estimation de la durée de vie de ces actifs permet à RTE des gains substantiels, tout en assurant une haute qualité de service. Les câbles électriques des lignes aériennes sont parmi les actifs principaux de RTE. Ces câbles aériens utilisés comme conducteurs sont le plus majoritairement des assemblages de brin toronnés. De plus, les experts des lignes aériennes attribuent une partie des endommagements aux vibrations éoliennes induisant du fretting-fatigue dans ou proche des systèmes de suspension [3].

Dans nos travaux, les vibrations d'un câble sont quantifiées en résolvant les équations de mouvement du conducteur exposé au vent, grâce à l'implémentation d'un modèle validé de la littérature. Des données réalistes de vent d'entrée sont générées en utilisant un spectre de Von Karman, et l'endurance des conducteurs est estimée via une modélisation statistique d'une courbe de Wöhler. Cette chaîne de calculs nous permet d'estimer un endommagement sur plusieurs portées du réseau, afin de déterminer des besoins de maintenance en les interclassant.

La section 2 introduit l'ensemble des modèles inclus dans la chaîne de calculs (vibrations du câble, vent et modèle d'interaction, modèle d'endurance); dans la section 3 nous illustrons sur un exemple les études qui peuvent être effectuées avec cette chaîne; les résultats sont ensuite présentés dans la section 4. Enfin, plusieurs améliorations sont soulignées en guise de discussion.

2 Chaîne de calculs

2.1 Modèle de vibration des câbles

Afin d'étudier les interactions entre un câble aérien suspendu et un vent faible ($\leq 15 \text{ ms}^{-1}$), nous avons implémenté un modèle simplifié incluant la majorité des considérations physiques associées, mais moins coûteux numériquement qu'une simulation tri-dimensionnelle complète de structure. Les résultats de ce modèle ont été comparés avec satisfaction avec ceux donnés par Code_Aster [4] tout en étant jusqu'à 100 fois plus rapide sur un ordinateur de bureau standard [2]. Ces performances nous permettent ainsi d'effectuer de larges études paramétriques à un coût raisonnable.

Le modèle implémenté repose sur le travail de Lee et Perkins [9]. Connaissant le conducteur (masse linéique, diamètre externe, rigidité axiale), la portée (longueur et tension mécanique) et les sollicitations externes (voir section suivante), ce modèle détermine les déplacements du câble relativement à sa position d'équilibre au repos (équation de chaînette) dans les trois directions de l'espace.

2.2 Modèle de vent et interactions

L'action du vent sur le câble est ici considérée comme une force de traînée. Le coefficient de traînée est constant avec $C_D = 1.3$ [13]; cette valeur est acceptable pour les vitesses de vent considérée (entre 0 et 15 m s^{-1}), ce qui revient à un nombre de Reynolds inférieur à 2.6×10^4 pour un conducteur ASTER570¹. Cette valeur de C_D est également consistante avec des expérimentations en soufflerie sur un conducteur réel ASTER570. Étant donné que le conducteur ne voit pas la vitesse de vent mais la vitesse relative entre celle-ci est sa propre vitesse, les forces d'interaction sont modifiées comme-suit

$$\begin{cases} f_z = \frac{\rho_{\text{air}} d C_D}{2} \sqrt{(U_z - v_z)^2 + (U_x - v_x)^2} (U_z - v_z) \\ f_x = \frac{\rho_{\text{air}} d C_D}{2} \sqrt{(U_z - v_z)^2 + (U_x - v_x)^2} (U_x - v_x) \end{cases},$$

où ρ_{air} est la masse volumique de l'air (fixée à 1.2 kg m^{-3}), et U_s, v_s , sont respectivement les vitesses du vent et du câble dans la direction s (voir figure 1). Il est à noter que le modèle ne permet pas d'imposer des forces dans la direction y .

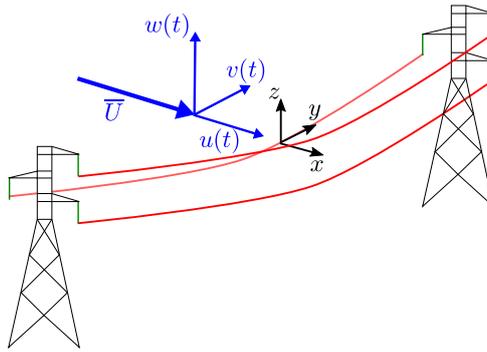


FIGURE 1 – Direction du vent sur une portée

Pour le modèle de vent, il est nécessaire de fournir un champ variant en temps et en espace, l'hypothèse d'un vent constant étant peu réaliste. Nous avons adapté certains codes issus des sources de TurbSim : TurbSim est un outil de flux en champ complet qui intègre des structures de turbulence cohérentes spatialement et temporellement [7]. Notre version adaptée prend comme entrée la vitesse moyenne dans la direction x (\bar{U}), trois écart-types, trois longueurs de cohérence (σ_s et l_s^x dans chaque direction), une discrétisation temporelle et donne en sortie trois champs de vent bi-dimensionnels (un champ par direction de l'espace, une dimension le long de la portée, l'autre pour le temps). En comparaison à la version initiale de TurbSim, nous employons les simplifications suivantes : une sortie spatiale suivant une direction de l'espace au lieu de trois pour accélérer la génération, l'utilisation d'un spectre de Von Karman et l'application de plusieurs valeurs par défaut pour les coefficients de co-cohérence. Un exemple de sorties de vent est donnée en figure 2

2.3 Modélisation de l'endurance sous flexion

Comme décrit dans la littérature, les conducteurs de lignes aériennes sont sujets au phénomène de fatigue mécanique sous des sollicitations de vibration [11, 12]. Cette fatigue apparaît particulièrement à proximité des systèmes d'accroche à chaque extrémité d'une portée [8]. Ce phénomène a été étudié depuis plusieurs décennies sur des bancs par résonance dédiée à la fatigue. Basée sur la concaténation de l'ensemble de ces résultats, issus de [3] et d'autres travaux plus récents, une modélisation statistique

1. L'ASTER570 est un conducteur en aluminium composé de 61 brins (de diamètre 3.45 mm) disposés en cinq couches.

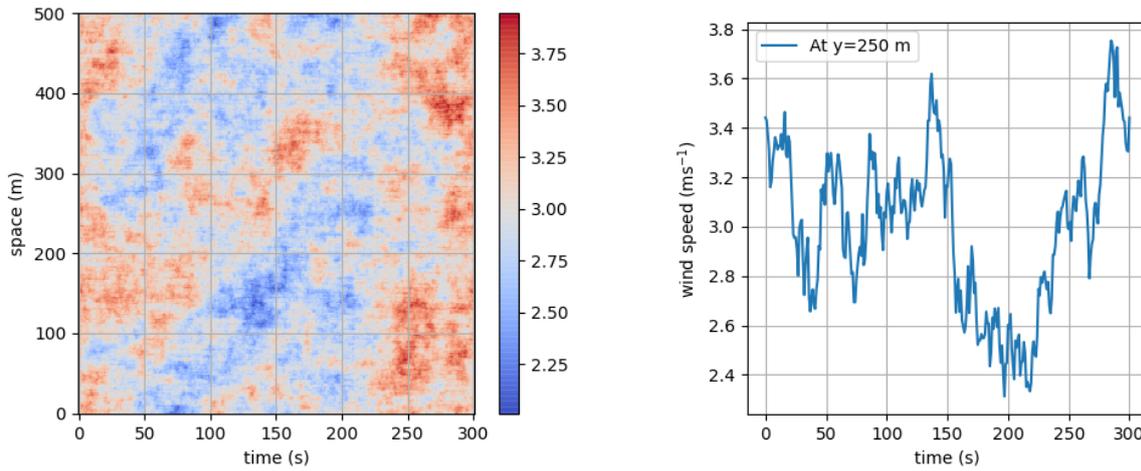


FIGURE 2 – Exemple de sortie du modèle de vent. Gauche : champ des vitesses sur la composante x (échelle en ms^{-1}); droite : extraction à $y = 250$ m. Pour cette simulation, nous avons pris $\bar{U} = 3 \text{ ms}^{-1}$, $\sigma_{x,y,z} = (0.27, 0.22, 0.15) \text{ ms}^{-1}$ et des longueurs cohérentes de turbulence $l_{x,y,z}^x = (200, 70, 30) \text{ m}$. La discrétisation s'étale de 0 à 500 m dans l'espace et entre 0 et 300 s dans le temps.

de la courbe de Wöhler a été développée, utilisant plusieurs variables explicatives, tels que la tension mécanique, le déplacement moyen et une contrainte fictive analytique issue de la littérature. Une fois cette endurance évaluée pour chaque sollicitation cyclique de vibration, en se basant sur une loi de Miner, la somme des contributions élémentaires est employée pour évaluer l'endommagement correspondant [10].

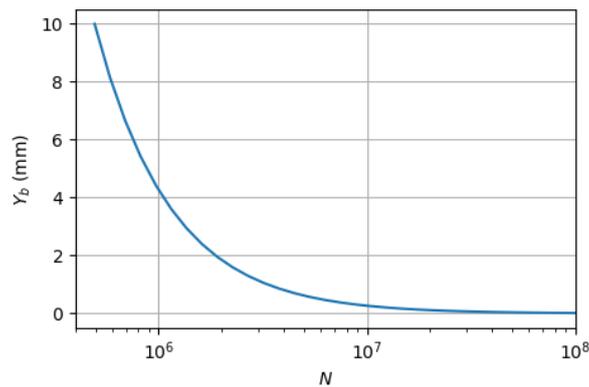


FIGURE 3 – Exemple de courbe de fatigue.

3 Un exemple de cas d'étude

Dans cette section, le but est de comparer l'estimation de l'endommagement pour une configuration de portée réaliste se situant fictivement dans des localisations géographiques : l'une proche des côtes maritimes et l'autre dans une région montagneuse. Connaissant les caractéristiques du vent pour ces deux localisations, une série de simulations a été effectuée pour différentes vitesses de vent et l'endommagement cumulé associé a été estimé. Les endommagements associés à chaque vitesse sont ensuite croisés avec la distribution de vitesses de vent dans la zone géographique concernée, distribution obtenue sur une longue période de temps (10 ans). Cette méthodologie permet ainsi de comparer l'influence de la localisation (du vent) sur l'estimation de l'endommagement. Les zones sélectionnées sont associées à des terrains ouverts relativement plats avec peu de végétation, l'une à Brest (côte maritime) et l'autre à Grenoble (région montagneuse). Les paramètres utilisés pour simuler les vitesses de vent (section 2.2) sont tirés du livre de Hémon [5] et reproduits dans le tableau 1. Les distributions des vitesses, obtenues par des données collectées à partir des modèles ERA5 [6] sont présentées en figure 4.

Composante (direction)	Mer		Montagne	
	σ/\bar{v}	l^x (m)	σ/\bar{v}	l^x (m)
U (x)	0.090	200	0.160	250
V (y)	0.075	65	0.160	70
W (z)	0.050	35	0.120	30

TABLE 1 – Valeurs typiques des paramètres de vent. D’après [5].

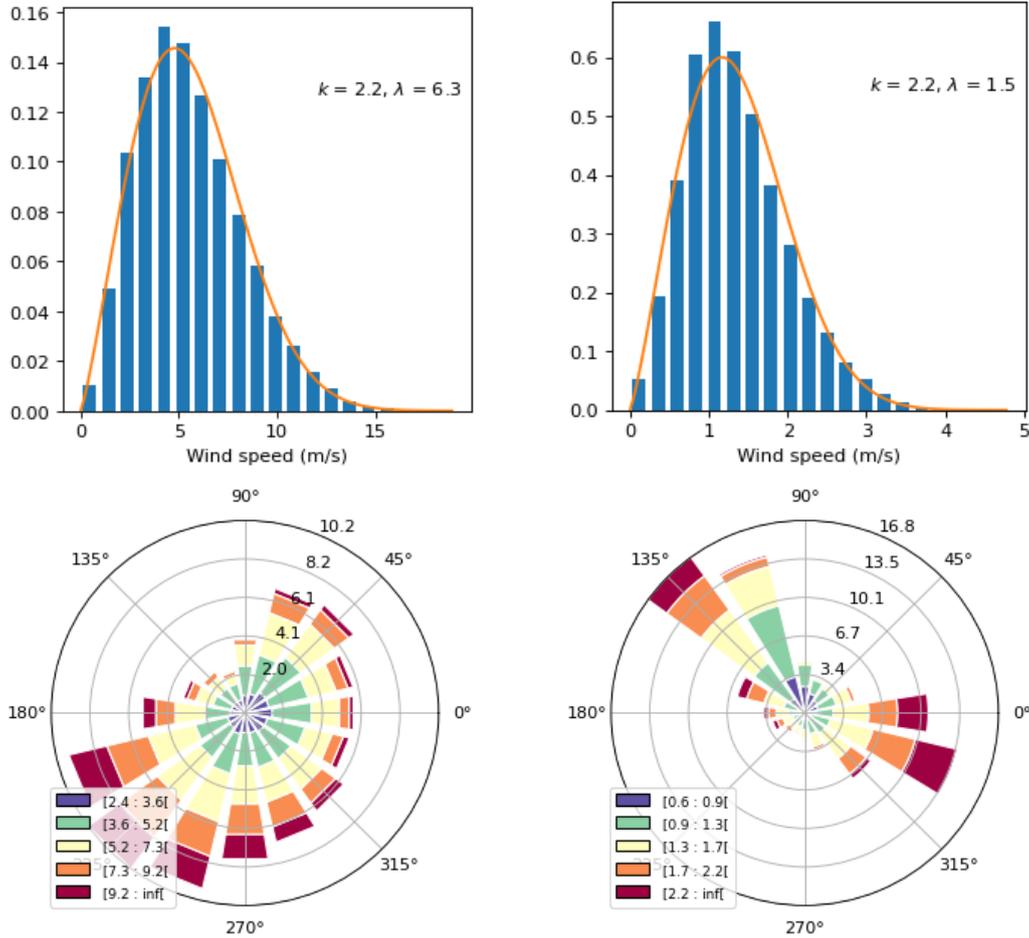


FIGURE 4 – Distributions de vent (vitesse et direction) pour Brest (gauche) et Grenoble (droite) sur la période 2000–2010.

Concernant la portée, celle retenue à une longueur de 440 m, tendue mécaniquement à 28 kN et le câble est un ASTER570 ($m = 1.57 \text{ kg m}^{-1}$, $d = 31.1 \text{ mm}$, $EA = 37.6 \text{ MN}$), afin de correspondre à une configuration de portée médiane pour ce câble le plus commun du réseau RTE. Ici, l’angle que forme la portée avec la direction du vent n’est pas prise en compte, impliquant que les vitesses de vent imposées correspondent aux distributions du vent moyen, sans aucune projection géométrique². Chaque distribution est discrétisée en 15 vitesses, et pour chacune de celles-ci la portée est sollicitée numériquement par un vent artificiel pendant 135 minutes.

Afin de se prémunir des éventuelles influences des conditions initiales (câble au repos), les 15 premières minutes du signal de sortie sont enlevées avant de compter les cycles de vibration. Ceci se justifie par le fait que, sur les simulations menées dans une même configuration (portée, câble, vent) mais avec des conditions initiales différentes, les réponses en déplacements du câble se superposent en général après une dizaine de minutes. Comme effectué classiquement dans le domaine de la fatigue des conducteurs, le signal de vibration verticale à 89 mm du système d’accroche, notée Y_b , est extrait et l’endommagement par unité de temps est évalué. Il est à noter que le temps de simulation retenu (135 minutes) donne un

2. Cette projection est en revanche appliquée lorsqu’on étudie des portées réellement sur le réseau.

signal de vibration de deux heures, suffisamment long pour obtenir une estimation stable de l'endommagement par unité de temps considérant l'aspect probabiliste du signal de vent imposé. Pour chaque localisation, chaque vitesse de vent est ainsi associée à un endommagement par unité de temps. En se basant sur les distributions de vent, l'endommagement est ensuite extrapolé pour n'importe quelle période de temps.

4 Résultats

Les résultats sont présentés figure 5 ; sur la partie gauche, on a représenté l'endommagement subit par la portée pour une année de vent (de mer ou de montagne). Les deux courbes peuvent être approchées par un polynôme d'ordre deux. On voit ici l'importance des paramètres de vent (σ , l^x), puisqu'à vitesse de vent égale, le vent de montagne est plus endommageant. Sur la partie de droite, on a repris l'endommagement par an et on l'a normalisé par les distributions de vitesses de vent. Le vent de mer est en pointillés à partir de 6 ms^{-1} car on a des réserves sur le modèle de câble pour les vents relativement forts, vu qu'il n'y a pas d'amortissement structural pris en compte dans le modèle. Si on veut une estimation de l'endommagement total par an, il ne reste plus qu'à intégrer ces courbes.

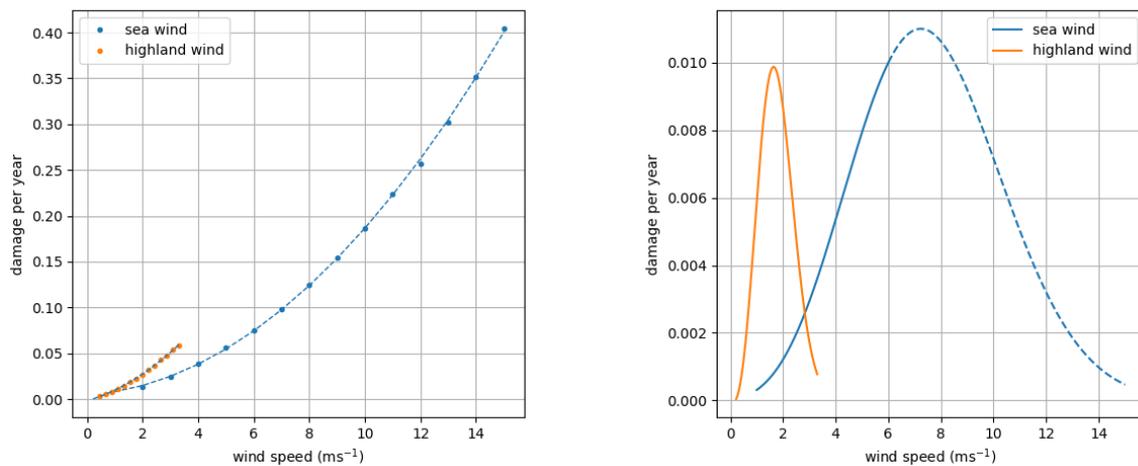


FIGURE 5 – Endommagement par an en fonction de la vitesse de vent, pour un vent de mer et un vent de montagne. Gauche : endommagement constaté si le vent soufflait à une vitesse constante pendant un an. Droite : normalisation en prenant en compte les distributions de vent.

5 Conclusions

Plusieurs aspects de notre travail pourraient être améliorés. Le modèle de câble ne contient aucune forme d'amortissement, ce qui conduit à des surestimations des vibrations, en particulier pour des vitesses de vent élevées. Un modèle a été développé pour répondre à ce point et sera prochainement intégré au calcul des vibrations. Sur le modèle d'endurance, une approche raffinée, qui s'appuiera à la fois sur des données expérimentales et de la simulation numérique [1, 11, 12] sera bientôt utilisée. Lorsque l'on considère les distributions de vent, il faudrait projeter la direction du vent sur l'azimut de la portée pour obtenir une distribution de la normale vent. En omettant cette étape, on a surestimé le vent normal et l'endommagement correspondant. Quant aux paramètres du vent (l^x and σ), si l'on sait qu'ils dépendent de l'environnement géographique et de la vitesse moyenne du vent, on suspecte également une dépendance temporelle, avec des composantes quotidiennes et saisonnières. Afin d'effectuer le même type d'études sur tout le réseau de RTE, il faudrait rassembler des mesures expérimentales du vent pour avoir une meilleure estimation de ces paramètres.

Dans le cadre de la gestion des actifs des lignes aériennes, nous avons présenté une méthode d'estimation de l'endommagement dû au vent vécu par une portée. La méthode repose sur deux systèmes indépendants (un modèle de vibrations et un calcul de fatigue) et une approche axée sur les données.

L'objectif est d'avoir des outils plus précis que les approches empiriques actuelles du domaine, mais suffisamment simples pour être appliqués sur un réseau complet. Les résultats préliminaires montrent que les paramètres de vent auront un impact conséquent sur les résultats, il sera donc important d'en avoir une bonne estimation. Étant donné que nous nous sommes concentrés uniquement sur l'endommagement mécanique et que nous avons dû émettre plusieurs hypothèses, nous sommes conscients que cet endommagement ne saurait être simplement traduit en une estimation de la durée de vie. Cela nous permet toutefois de procéder à des classement de portée ce qui facilitera grandement les opérations de maintenance et de remplacement du réseau.

Références

- [1] A. Belkhabbaz, M. Gueguin, F. Hafid, C. Yang, O. Allix, J.-M. Ghidaglia. *Surrogate model based approach to predict fatigue stress field in multi-stranded cables*, International Journal of Solids and Structures, 230 : 111168, 2021.
- [2] E. Cieren, J. Redford, M. Gueguin, O. Allix, C. Yang, F. Hafid, J.-M. Ghidaglia. *On the validation and use of a simplified model of aeolian vibration of overhead lines for parametric studies*, Proceedings of the XI International Conference on Structural Dynamic (EURODYN), Athènes, 2011-2021, 2020.
- [3] L. Cloutier, S. Goudreau, A. Cardou. *Fatigue of overhead conductors*, EPRI Transmission Line Reference Book : Wind-Induced Conductor Motion, chapitre 3, 2006.
- [4] EDF. *Finite element Code_Aster, analysis of structures and thermomechanics for studies and research*, Open source at www.code-aster.org.
- [5] P. Hémon. *Vibrations des structures couplées avec le vent*, Éditions École Polytechnique, 2006.
- [6] H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. De Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, P. de Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, J.-N. Thépaut. *The ERA5 global reanalysis*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999-2049, 2020.
- [7] B. J. Jonkman. *TurbSim user's guide : Version 1.50*, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2009.
- [8] R. Kalombo, J. Araujo, J. Ferreira, C. Da Silva, R. Alencar, A. Capra. *Assessment of the fatigue failure of an All Aluminium Alloy Cable (AAAC) for a 230 kV transmission line in the Center-West of Brazil*, Engineering Failure Analysis, 61 : 77-87, 2016.
- [9] C. L. Lee, N. C. Perkins. *Nonlinear oscillations of suspended cables containing a two-to-one internal resonance*, Nonlinear Dynamics, 3(6) : 465-490, 1992.
- [10] F. Lévesque. *Etude de l'applicabilité de la règle de Palmgren-Miner aux conducteurs électriques sous chargements de flexion cyclique par blocs*, Thèse de Master, Université Laval, 2005.
- [11] J. Redford, M. Gueguin, M.-C. Nguyen, H.-P. Lieurade, F. Hafid, C. Yang, J.-M. Ghidaglia. *Calibration of a numerical prediction methodology for fretting-fatigue crack initiation in overhead power lines*, International Journal of Fatigue, 124 : 400-410, 2019.
- [12] J. Said, S. Garcin, S. Fouvry, G. Cailletaud, C. Yang, F. Hafid. *A multi-scale strategy to predict fretting-fatigue endurance of overhead conductors*, Tribology International, 143 : 106053, 2020.
- [13] L. Zhang, J. Redford, F. Hafid, J.-M. Ghidaglia, M. Gueguin. *VIV modelled using simplified cable dynamics coupled to sub-critical cylinder flow simulations in a moving reference frame*, European Journal of Mechanics-B/Fluids, 85 : 214-231, 2021.