

Dimensionnement Magneto-Mécanique des Plots Feuilletés d'un Multiplicateur Magnétique pour l'Éolien de Forte Puissance

M. DESVAUX^a, B. MULTON^a, H. BEN AHMED^a, S.SIRE^b

a. SATIE Laboratory, ENS Rennes, Université Bretagne Loire, CNRS, France, e-mail :
melaine.desvaux@ens-rennes.fr

b. Université de Bretagne Occidentale, FRE CNRS 3744, IRDL, France, e-mail :
stephane-sire@univ-brest.fr

Résumé :

Cet article traite du dimensionnement de la couronne de plots magnétiques feuilletés d'un multiplicateur magnétique. Cette couronne subit un champ magnétique qui génère des chargements radiaux et orthoradiaux sur chacun des plots. Pour assurer la résistance mécanique de ces éléments, nous proposons de concevoir une cage constituée de flasques et de barres supports amagnétiques qui maintiennent mécaniquement les plots feuilletés et qui préservent les propriétés magnétiques du multiplicateur. A partir d'un modèle multi-corps dont les rigidités sont déterminées via un modèle de type poutre pour les barres supports, il est possible d'obtenir une première approximation des déplacements et des contraintes subis par ces barres dans le cas d'un chargement magnétique statique. Un exemple d'un multiplicateur magnétique composé de 151 plots magnétiques feuilletés dimensionné pour une éolienne de 3.9 MW est proposé.

Abstract :

This article deals with the magneto-mechanical sizing of laminated ferromagnetic pole pieces of a magnetic gear. This ring is subjected to a magnetic field, which generates radial and tangential loads on the pole pieces. To ensure the mechanical strength, we propose a support bar geometry which does not lessen magnetic properties and which correctly maintains the laminated pole pieces. From a multibody model where the stiffnesses are determined from a 1-D model for the support bars, it is possible to determine a first approximation of the stress and the displacement of the different support bars due to a static magneto-mechanical load. An example of magnetic gear with 151 laminated pole pieces (3,9 MW wind turbine) is proposed.

Mots clefs : Barres supports, Chargement magnétique, Engrenage magnétique, Modèle multi-corps, Plots feuilletés.

1 Introduction

Les multiplicateurs mécaniques (à engrenages), utilisés couramment dans les chaînes indirectes de conversion d'énergie électromécanique (Fig.1a), permettent d'obtenir un plus faible coût d'investissement et une plus faible masse que les chaînes directes [1] (Fig.1b). En contrepartie, le multiplicateur mécanique augmente les risques de défaillance et les coûts de fonctionnement associés [2][3]. Le contexte de ces travaux est celui des chaînes à génératrice semi-rapide et à multiplicateur magnétique ayant une transmission sans contact [4] (Fig.1c). La topologie, a priori la plus attractive des multiplicateurs magnétiques a été proposée par Martin [5] et a fait l'objet d'analyses approfondies proposées par Atallah [6][7] (Fig. 2).

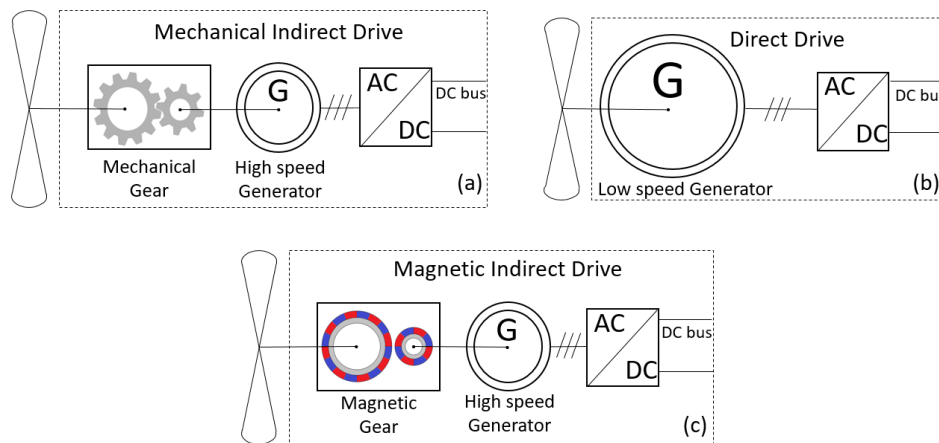


Fig. 1. Chaînes de conversion d'énergie (a) indirecte à multiplicateur mécanique, (b) directe, et (c) indirecte à multiplicateur magnétique

Cette topologie possède une potentielle capacité d'amélioration de compétitivité par rapport aux solutions mécaniques [8] même pour des applications à fort couple comme l'éolien de forte puissance (quelques MN.m) [9][10]. Cependant, peu de travaux de dimensionnement magnétique ont été réalisés sur cet engrenage magnétique (avec une approche similaire à celle de [11] mise en œuvre pour des génératrices directes –sans multiplicateur de vitesse- d'éoliennes) qui semble avoir une faiblesse en terme de tenue mécanique. En effet, dans le contexte d'une éolienne de forte puissance (structures fort couple de grand diamètre), les plots ferromagnétiques feuilletés (voir Fig.3) ont une géométrie très allongée (2 m de long pour une hauteur d'environ 60 mm) et sont feuilletés perpendiculairement à l'axe de rotation. Ce feuilletage est nécessaire pour minimiser les pertes magnétiques par courant de Foucault dans cette région et ainsi conserver un haut rendement de conversion et s'affranchir de systèmes de refroidissement. Or, ces plots sont soumis à un chargement magnétique variable de forte amplitude généré par les deux couronnes d'aimants de part et d'autre de cette pièce.

Cette faiblesse des engrenages magnétiques amène alors à se demander s'il est vraiment possible de maintenir correctement (d'un point de vue mécanique) ces plots feuilletés sans perturber la répartition du champ magnétique (et donc sans augmenter les épaisseurs des entrefers qui jouent un rôle majeur sur la quantité d'aimants requise) dans un contexte de conversion éolienne de forte puissance qui implique d'avoir de grandes dimension du système ainsi qu'un nombre élevé de plots feuilletés. Il est donc nécessaire d'évaluer la rigidité de la couronne de plots feuilletés et son comportement mécanique face aux différents chargements qu'elle subit en commençant par traiter uniquement les aspects statiques.

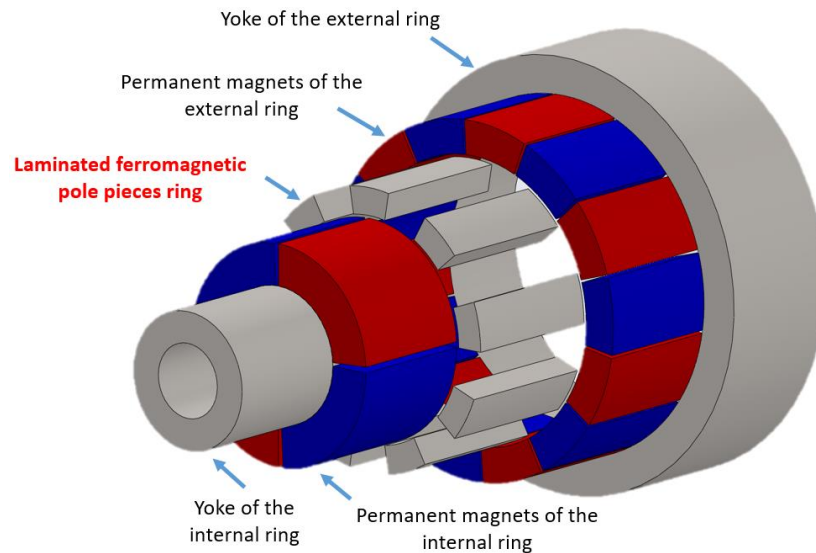


Fig. 2. Architecture étudiée de multiplicateur magnétique en vue éclatée avec un faible nombre de pôles (ici : $p_{int} = 2$, $p_{ext} = 7$ et $Q = 9$). Seules les parties magnétiques sont représentées (aimants en bleu et rouge, zones ferromagnétiques en gris).

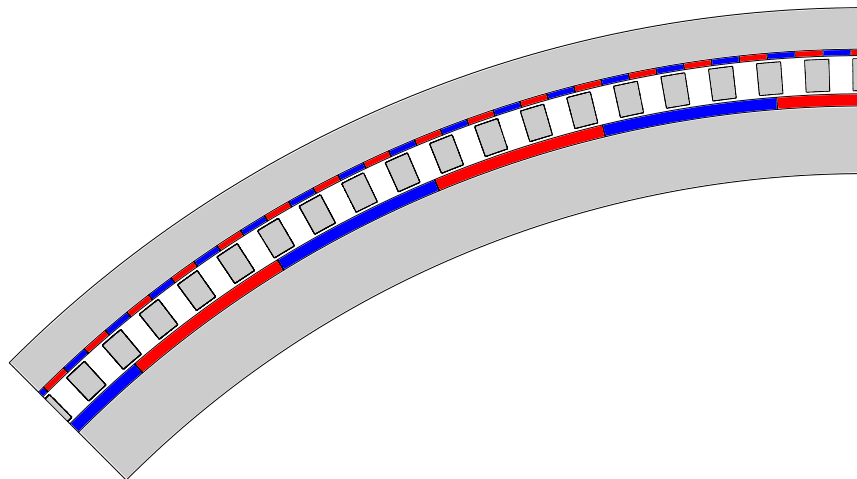


Fig. 3. Représentation en coupe des parties magnétiques de la structure étudiée (3.9 MW 15 tr/min [4]) : $p_{int} = 20$, $p_{ext} = 131$ et $Q = 151$, diamètre extérieur = 3.8 m et longueur = 2 m (perpendiculairement à la coupe).

La majeure contribution de ce travail concerne l'étude du chargement subi par les plots feuilletés, la définition d'une géométrie de structure porteuse des plots ainsi que la modélisation mécanique multi-corps de cette structure. Ce modèle multi-corps permet alors d'évaluer différents critères de tenue mécanique qui seront insérés dans une étude d'optimisation multicritère d'un engrenage magnétique pour une application éolienne.

2 Barres porteuse des plots feuilletés

2.1 Principe de l'engrenage magnétique

La structure d'engrenage magnétique étudiée [5] est composée de trois couronnes :

- Un rotor rapide avec p_{int} paires de pôles et une culasse ferromagnétique,
- Un rotor lent avec p_{ext} paires de pôles et une culasse ferromagnétique,
- Une couronne fixe avec Q plots ferromagnétiques intercalés entre ces deux rotors (voir exemple Fig.2 avec $p_{int} = 2$, $p_{ext} = 7$ et $Q = 9$).

Les deux rotors à aimants génèrent alors chacune, dans leurs entrefers respectifs, une onde de force magnétomotrice. La couronne de plots a pour objectif de moduler les inductions des deux couronnes d'aimants afin de les faire interagir sur un rang harmonique commun permettant ainsi un couplage magnétique, entre les deux rotors et cette couronne intermédiaire, et donc une transmission de puissance. Pour ce faire, les trois couronnes doivent obéir à la relation (1). En fonction de la couronne qui est fixée, le rapport de multiplication G_m est alors donné par (2) avec $\omega_{int/0}$, $\omega_{ext/0}$ et $\omega_{Q/0}$ les vitesses de rotation respectives des couronnes intérieure, extérieure et de plots. Dans la suite de cette article, la configuration qui sera étudiée correspond à celle où la couronne de plots est fixe (la couronne extérieure à vitesse lente est associée à la turbine et celle intérieure est la rapide associée à la génératrice).

$$p_{int} + p_{ext} = Q \quad (1)$$

$$\begin{cases} \omega_{int/0} = 0 \rightarrow G_m = \frac{\omega_{ext/0}}{\omega_{Q/0}} = \frac{Q}{p_{ext}} \\ \omega_{Q/0} = 0 \rightarrow G_m = \frac{\omega_{int/0}}{\omega_{ext/0}} = -\frac{p_{ext}}{p_{int}} \\ \omega_{ext/0} = 0 \rightarrow G_m = \frac{\omega_{int/0}}{\omega_{Q/0}} = \frac{Q}{p_{int}} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 Géométrie des barres porteuses

Afin de supporter les plots feuilletés de la couronne intermédiaire, nous proposons la géométrie de barres porteuses visible en Fig. 4, mais sans représentation des flasques latéraux d'assemblage. Ces barres porteuses sont composées d'un matériau amagnétique (par exemple un acier inoxydable) couvert d'un revêtement électriquement isolant. Une telle solution ne modifie pas les entrefers ce qui aurait pu conduire à la nécessité de recourir à un plus grand volume d'aimants ou à des aimants plus performants. Les barres porteuses transmettent alors aux flasques, situés aux deux extrémités, le chargement (poids et forces magnétiques) des plots feuilletés. Les barres porteuses (tout comme les plots) sont alors soumises, outre leur propre poids, à un chargement magnétique radial et tangentiel variable qui provoquera des déplacements ainsi que des contraintes qu'il faut impérativement prendre en compte dès la phase de conception de la partie magnétique du système (voir [4]).

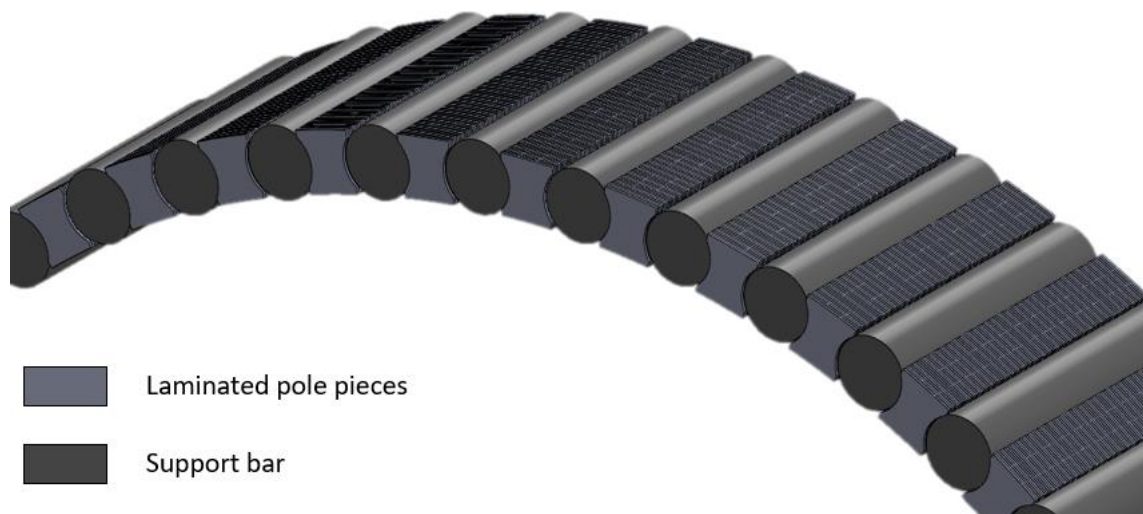


Fig. 4 Cage constituée de barres supports des plots feuilletés (les flasques en extrémités ne sont pas représentés)

2.3 Influence de la géométrie sur le chargement magnétique

L'intégration des barres porteuses doit avoir un effet aussi négligeable que possible sur la répartition du champ magnétique. Or l'insertion des barres porteuses entre les plots ferromagnétiques feuilletés conduit à une légère modification de la géométrie des plots (Fig. 4 et Fig. 5a) par rapport à la solution initiale (Fig.3 et Fig. 5b). Nous étudions l'effet de cette nouvelle géométrie de plots sur le champ magnétique dans toute la structure et sur le chargement magnétique via des calculs par éléments finis 2-D en magnétostatique (voir Fig. 5a) mais cela augmente considérablement les temps de calculs comparé à un calcul éléments finis du chargement pour la géométrie initiale.

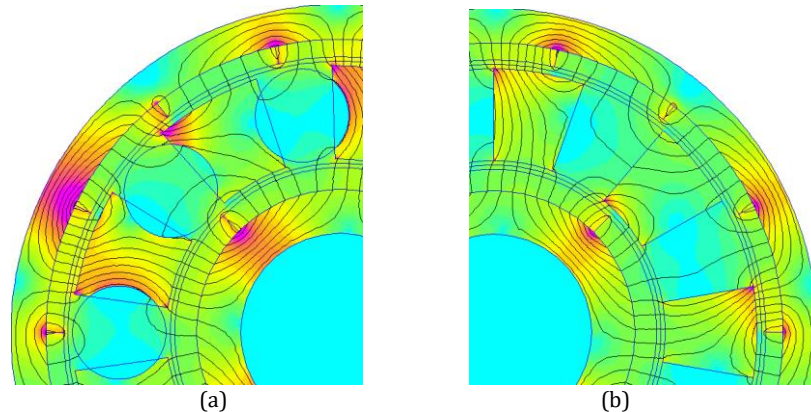


Fig. 5 Répartition du champ magnétique obtenue par calcul éléments finis magnétique 2-D de la géométrie (a) prenant en compte l'adaptation de la géométrie des plots (b) initiale des plots pour un engrenage magnétique avec $p_{int} = 2$, $p_{ext} = 7$ et $Q = 9$.

Il est alors possible de comparer le chargement magnétique radial et tangentiel obtenu à partir de ces deux modèles comme on peut le voir sur la Fig. 6. Cette comparaison montre qu'il est possible de considérer la géométrie initiale pour calculer le chargement magnétique (avec un temps de calcul environ 5 fois plus faible du fait que l'adaptation de la géométrie nécessite un maillage plus complexe).

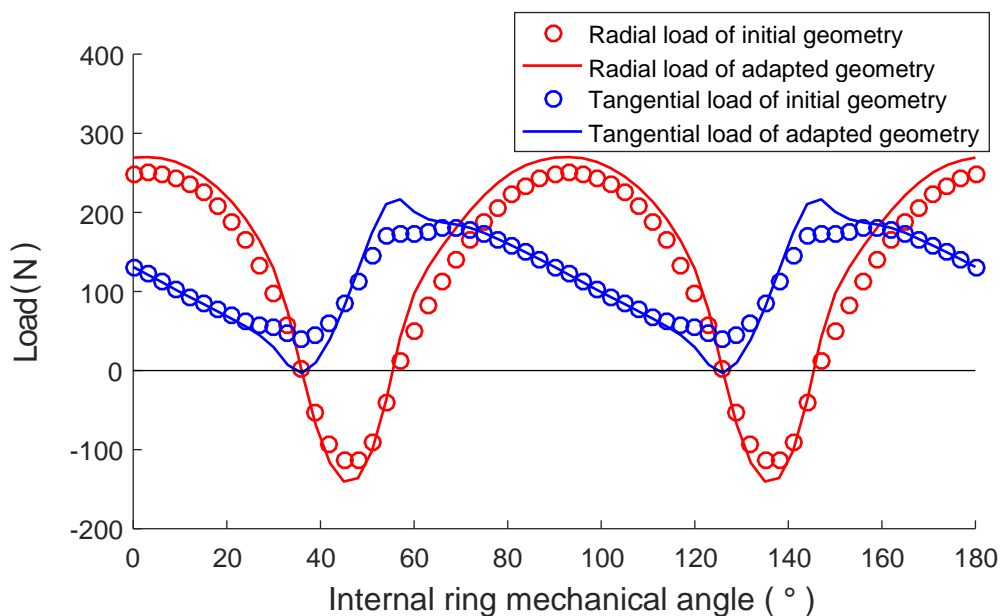


Fig. 6 Comparaison des profils de chargement magnétique, obtenus à partir de calculs éléments finis en magnétostatique 2D, entre la géométrie de la couronne de plots initiale et la géométrie de la couronne de plots adaptée aux barres porteuses de l'engrenage magnétique (avec $p_{int} = 2$, $p_{ext} = 7$ et $Q = 9$).

3 Modélisation multi-corps de la couronne de plots feuilletés

Afin d'obtenir une première approximation du déplacement et des contraintes au niveau des barres porteuses, un modèle multi corps de l'ensemble {plots feuilletés + barres porteuses} visible en Fig. 7 a été défini. Dans ce modèle, les chargements pris en compte sont le chargement magnétique radial $\vec{F}_r^{(q)}$ et tangentiel $\vec{F}_\alpha^{(q)}$ ainsi que le poids de la structure pour les Q plots et barres porteuses (q correspond au

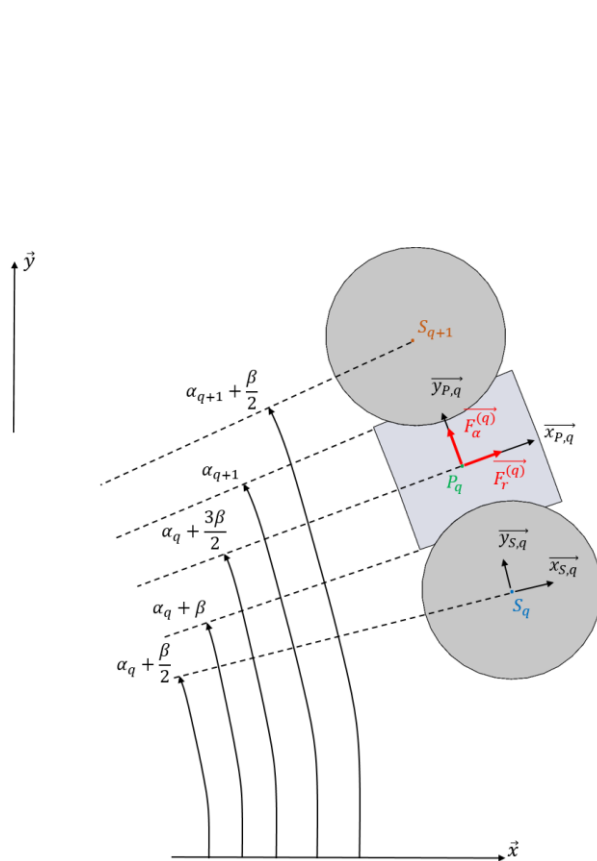


Fig. 7a Modèle multi corps de la couronne de plots avec la définition du paramétrage numéro du plot avec $1 \leq q \leq Q$).

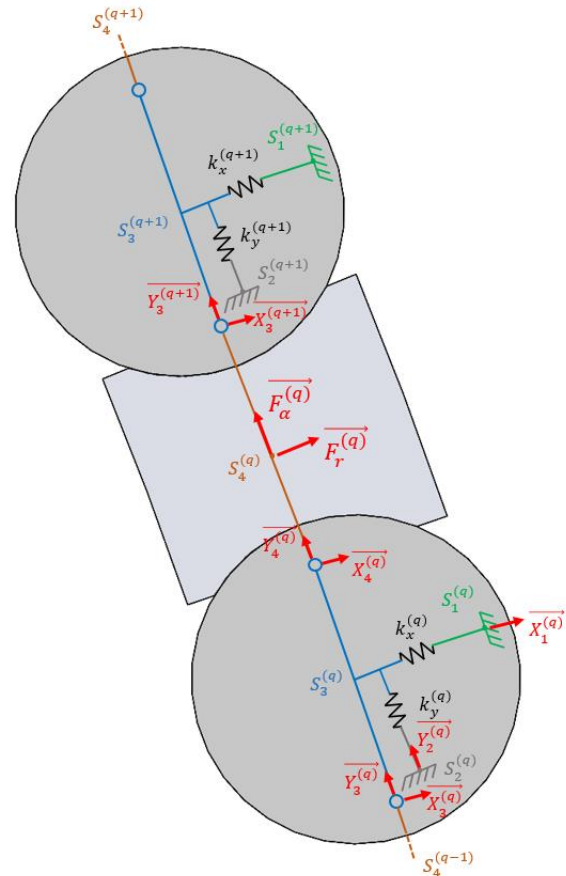


Fig. 7b Modèle multi corps de la couronne de plots avec la définition des différents chargements et corps.

Dans ce modèle, nous considérons que les flasques aux deux extrémités de la couronne de plots sont infiniment rigides par rapport aux plots et aux barres porteuses. Nous considérons aussi que les différents chargements peuvent être considérés comme des chargements appliqués dans le plan milieu de la partie magnétique. Toujours en accord avec la Fig. 7, le modèle multi corps est composé de $4Q$ corps $S_i^{(q)}$ (avec $i = 1..4$) et de $4Q$ degrés de liberté ($2Q$ translation et $2Q$ rotation). Les $2Q$ translations correspondent aux raideurs des barres porteuses et les $2Q$ rotations correspondent aux contacts entre les plots feuilletés et les barres porteuses. Les raideurs des barres porteuses sont alors déterminées avec partir d'un modèle de poutre bi-encasté 1-D. La raideur des plots feuilletés est négligée devant celles des barres supports.

Ce modèle multi-corps est alors composé de 8Q inconnues pour l'ensemble de la structure. Elles correspondent aux 2Q raideurs de chaque barres porteuses (3), aux 2Q réactions au niveau de l'encastrement des barres porteuses avec les flasques (4) ainsi qu'au 4Q réactions au niveau des contacts entre les plots feuilletés et les barres porteuses (5) comme on peut le voir sur la Fig. 7b.

$$\begin{cases} \overrightarrow{T_x^{(q)}} = k_x^{(q)} \cdot x^{(q)} \cdot \overrightarrow{x_{S,q}} \\ \overrightarrow{T_y^{(q)}} = k_y^{(q)} \cdot y^{(q)} \cdot \overrightarrow{y_{S,q}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\{ \overrightarrow{X_1^{(q)}}, \overrightarrow{Y_2^{(q)}} \} \quad (4)$$

$$\{ \overrightarrow{X_3^{(q)}}, \overrightarrow{Y_3^{(q)}}, \overrightarrow{X_4^{(q)}}, \overrightarrow{Y_4^{(q)}} \} \quad (5)$$

Afin de déterminer les 8Q inconnues du problème, il est possible de créer un système de 8Q équations couplées à l'aide du principe fondamentale de la statique en effort et en couple en réalisant différents isolement des corps de notre modèle. Le système d'équations peut être mis sous la forme matricielle (6) où $[A]_{8Q,8Q}$ contient les différentes projections, $[B]_{8Q,1}$ contient les chargements magnétiques ainsi que les différents poids et $[X]_{8Q,1}$ contient les 8Q inconnues du problème. Les 8Q inconnues sont déterminées en inversant la matrice $[A]_{8Q,8Q}$. La Fig. 8 montre le déplacement des barres supports généré par le chargement magnétique (Fig. 8a) et le poids (Fig. 8b) (le déplacement est ici amplifié (multiplié par 100) pour faciliter sa visualisation) pour le multiplicateur magnétique étudié en [4].

$$[A]_{8Q,8Q} * [X]_{8Q,1} = [B]_{8Q,1} \quad (6)$$

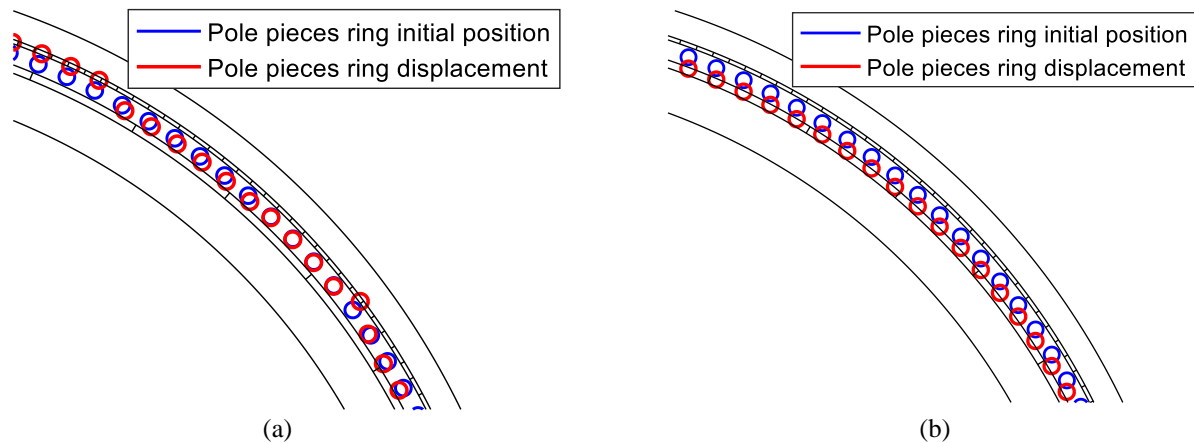


Fig. 8 Déplacement des barres porteuses obtenue à partir du modèle multi corps (avec une amplification visuelle du déplacement (multiplication par 100)) généré par (a) le chargement magnétique et (b) le poids, pour l'engrenage magnétique étudié en [4].

Dans un contexte d'optimisation à la fois magnétique et mécanique d'un multiplicateur magnétique pour l'éolien de forte puissance, il est important de définir des critères de tenue mécanique des barres porteuses. Pour les génératrices d'éoliennes de forte puissance, la littérature utilise comme premier dimensionnement facilement intégrable dans une démarche d'optimisation une limite de déplacement définie en fonction de la dimension de l'entrefer (exemple : déplacement inférieur à 10% de l'entrefer) et une limite de contrainte, pour chaque élément sollicité, définie par rapport à la limite élastique du matériau (exemple : la contrainte normale ne doit pas dépasser 2/3 de la limite élastique du matériau) [11].

La Fig. 9 montre pour le multiplicateur étudié en [4] l'évolution du déplacement d'une barre porteuse en fonction du temps. La Fig. 10 montre l'évolution de la contrainte normale au niveau de l'encastrement de la barre porteuse pour différents points sur son rayon extérieur (les points représentés correspondent aux endroits où la contrainte normale est la plus forte au niveau des barres porteuses).

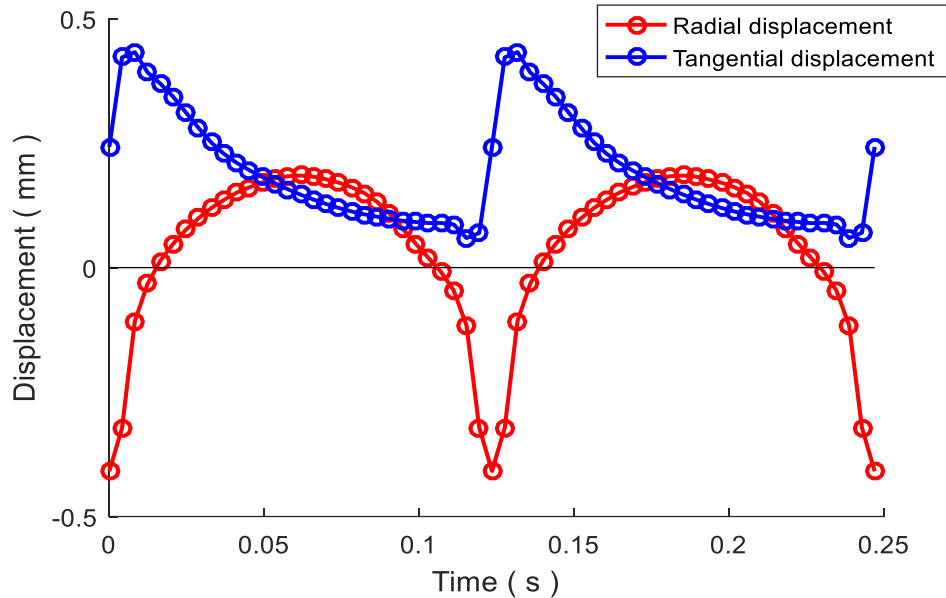


Fig. 9. Évolution du déplacement d'une barre porteuse en fonction du temps pour le multiplicateur [4].

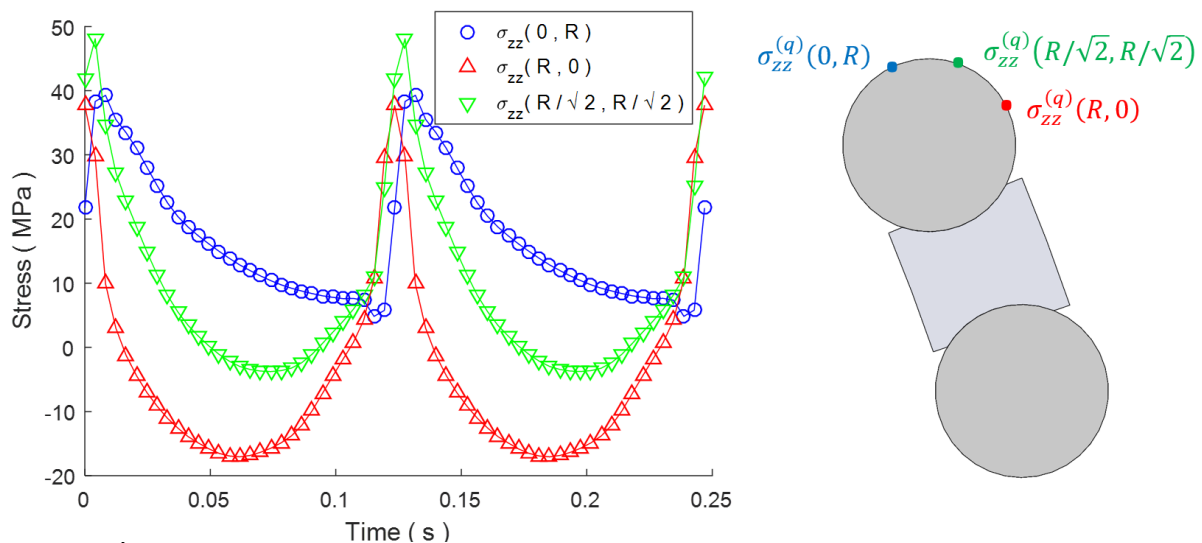


Fig. 10. Évolution de la contrainte normale au niveau de l'encastrement de la barre porteuse pour différents points sur son rayon extérieur (les points représentés correspondent aux endroits où la contrainte normale est la plus forte au niveau des barres porteuses) pour le multiplicateur [4].

Ces deux figures illustrent alors que le déplacement et la contrainte normale évoluent fortement avec la fréquence magnétique du système (7). Il est alors nécessaire de dimensionner les plots pour différentes positions du multiplicateur et de vérifier le comportement du matériau constituant les plots sous sollicitations cycliques.

$$F = \frac{p_{int} \cdot \omega_{int/0}}{2\pi} = \frac{p_{ext} \cdot \omega_{ext/0}}{2\pi} \quad (7)$$

4 Conclusion

Les travaux présentés dans cet article portent sur le chargement magnétique d'un multiplicateur magnétique pour l'éolien au niveau des plots feuilletés. L'analyse de ce chargement a conduit à la définition d'une géométrie de barres porteuses afin de rigidifier la couronne de plots sans perturber le comportement magnétique du système. Un modèle multi-corps de la couronne de plots feuilletés prenant en compte la présence des barres porteuses a été proposé. Ce modèle a permis une estimation rapide du comportement mécanique (champs de déplacements et de contraintes) de cette structure. Il pourra être inséré dans une étude d'optimisation multicritère d'un engrenage magnétique pour une application éolienne dans laquelle des critères mécaniques (limite de la variation d'entrefer, contrainte admissible du matériau constituant les plots) seront définis pour la couronne de plots feuilletés. Afin d'évaluer la pertinence de ce premier modèle, les résultats obtenus seront à comparer avec ceux issus d'un calcul éléments finis magnéto-mécanique couplé ou avec un dispositif expérimental.

En perspectives, plusieurs approfondissements sont nécessaires. D'abord, le déplacement statique, même faible, des plots ferromagnétiques, modifie lui-même le profil des chargements et il serait intéressant d'effectuer un nouveau calcul en situation déformée, notamment pour s'assurer qu'il n'y a pas de phénomène d'instabilité statique (divergence des déformations), sachant que le temps de calcul par éléments finis magnéto-mécanique traité en couplage fort n'est pas compatible avec nos exigences en vue d'une optimisation mécatronique globale de tout le système. Cela permettrait de mieux définir les contraintes de déplacement statique maximal (actuellement 10% de l'épaisseur d'entrefer). Ensuite, il sera indispensable d'étudier la structure en régime dynamique afin de vérifier que des fréquences propres ne sont pas excitées et d'éliminer ce risque en traduisant ce problème sous forme de contraintes supplémentaires dans la procédure d'optimisation globale mentionnée.

Références

- [1] R. Lacal Arántegui and J. Serrano Gonzáles, *2014 JRC wind status report: Technology, market and economic aspects of wind energy in Europe*. 2015.
- [2] J. Keller, Y. Guo, and L. Sethuraman, "Gearbox Reliability Collaborative Investigation of Gearbox Motion and High-Speed-Shaft Loads," *NREL, Tech. Rep. TP-5000-65321*, 2016.
- [3] W. Teng, X. Ding, X. Zhang, Y. Liu, and Z. Ma, "Multi-fault detection and failure analysis of wind turbine gearbox using complex wavelet transform," *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 591–598, 2016.
- [4] M. Desvaux, R. L. G. Latimier, B. Multon, H. Ben Ahmed, and S. Sire, "Design and optimization of magnetic gears with arrangement and mechanical constraints for wind turbine applications," in *2016 11th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2016*, 2016.
- [5] T. B. Martin, "Magnetic transmission," *Pat. US3378710*, 1968.
- [6] K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 2844–2846, 2001.
- [7] K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, "Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear," *IEE Proc - Electr. Power Appl.*, vol. 151, no. 2, pp. 135–143, 2004.
- [8] E. Gouda, S. Mezani, L. Baghli, and A. Rezzoug, "Comparative study between mechanical and magnetic planetary gears," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 2, pp. 439–450, 2011.
- [9] D. Matt, J. Jac, and N. Ziegler, "Design of a Mean Power Wind Conversion Chain with a Magnetic Speed Multiplier," in *Chap. 10 of InTech book "Advances in Wind Power*, 2012, pp. 247–266.

- [10] A. Penzkofer and K. Atallah, "Magnetic Gears for High Torque Applications," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 11, 2014.
- [11] A. Zavvos, A. S. Mcdonald, and M. Mueller, "Structural optimisation tools for iron cored permanent magnet generators for large direct drive wind turbines," in *IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011)*, 2011.