

# Couplage magnéto-mécanique pour le dimensionnement de machines électriques

Abla Dahia<sup>1</sup>, Frédéric Dubas<sup>2</sup>, M'Hamed Belhadi<sup>1</sup>, Guillaume Krebs<sup>1</sup>, Laurent Daniel<sup>1</sup> et Claude Marchand<sup>1</sup>

<sup>1</sup>: GeePs, Laboratoire Génie électrique et électronique de Paris

UMR CNRS 8507, CentraleSupélec, Univ. Paris-Sud, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06

3, 11 rue Joliot Curie, Plateau de Moulon, 91192 Gif-sur-Yvette CEDEX, France.

guillaume.krebs@geeps.centralesupelec.fr

<sup>2</sup>: Département Énergie, Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174, UBFC, Belfort, France

frederic.dubas@univ-fcomte.fr

**RESUME**– Ce papier présente un couplage magnéto-mécanique pouvant être utilisé dans une procédure de dimensionnement d'un convertisseur électromécanique. Le modèle basé sur un circuit équivalent magnétique (CEM) non-linéaire et un modèle mécanique par éléments finis (EF) en deux dimensions (2D) sont détaillés ainsi que la procédure globale. Le dispositif étudié s'apparente à un actionneur à réluctance variable.

**Mots-clés**— *couplage magnéto-mécanique, circuit équivalent magnétique, modèle éléments finis, lois de comportement.*

## 1. INTRODUCTION

Au sein des machines électriques, plusieurs sources de contraintes mécaniques peuvent affecter le comportement magnétiques des matériaux (variations de perméabilité, pertes fer[1],...). On peut citer les efforts dus à l'inertie qui peuvent fragiliser par exemple les ponts magnétiques dans les rotors des machines synchrones [2]. Des efforts résiduels peuvent apparaître suite à certains procédés de fabrication (emboutissage, usinage,...). La température et la découpe mises alors en jeu modifient les propriétés magnétiques jusqu'à plusieurs millimètres du bord de coupe[3]. Enfin les efforts magnétiques participent eux aussi aux modifications de l'état de contrainte et donc influent sur les caractéristiques magnétiques [4].

Du point de vue magnétique, les CEMs non-linéaires offrent un compromis (temps de calcul/précision des résultats) appréciable et sont régulièrement utilisés en optimisation [5]. Nous proposons donc dans ce papier le couplage d'un tel modèle avec un modèle mécanique. L'idée est de tenir compte du comportement magnéto-mécanique lors d'un processus de dimensionnement. Dans cet objectif une structure magnétique simple à modéliser a été retenue. Sa représentation magnétique à l'aide d'un CEM non-linéaire est d'abord présentée puis le modèle mécanique associé est décrit. Le schéma de couplage est donné ainsi que des résultats qui en sont issus.

## 2. DISPOSITIF ETUDIE

La structure à modéliser magnétiquement et mécaniquement est présentée sur la Fig. 1.

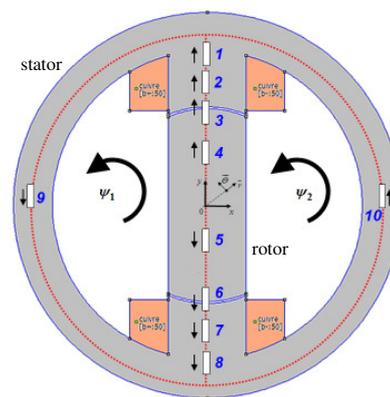


Fig. 1 Système étudié et son CEM non-linéaire en position de conjonction.

Elle peut être considérée comme une structure élémentaire d'actionneur à réluctance variable à double saillance. Les principales caractéristiques géométriques de l'actionneur sont décrites dans le Tableau 1.

Tableau 1. Principales dimensions de l'actionneur

rayon externe	rayon d'alésage	Épaisseur de culasse	Entrefer	Ouverture polaire statorique
50 mm	25,5 mm	10 mm	0,5 mm	46 deg.

Les tôles sont constituées d'un alliage fer-silicium. Le bobinage est constitué de deux bobines en série de 50 spires chacune.

## 3. MODELE MAGNETIQUE

Le modèle magnétique est représenté sur la Fig. 1 pour la position de conjonction. La résolution du CEM non-linéaire étudié se base sur l'introduction de flux  $\psi$  de mailles [6]. Le système matriciel à résoudre (à  $\mu_r$  constant) est donné ci-dessous :

$$[\xi].[\mathcal{R}].[\xi]^T.[\psi]-[\xi].[MMF]=0 \quad (1)$$

avec :  $[\xi]$  pour la matrice d'incidence du CEM,  
 $[\mathcal{R}]$  pour l'ensemble des réluctances,  
 $[\psi]$  pour les flux de mailles,  
 $[MMF]$  pour les forces magnétomotrices.

La caractéristique  $B(H)$  (courbe anhystérétique) est représentée par la fonction de Marrocco. La résolution du système est effectuée à l'aide d'une procédure itérative. Pour la position choisie, le modèle est simple et rapide à résoudre.

#### 4. MODELE MECANIQUE

Le domaine  $\Omega$  étudié (supposé élastique et homogène) de frontière  $d_\Omega$ , soumis à l'effet de forces volumiques  $F_i$  et surfaciques  $f_i$ , est soumis aux conditions d'équilibre définies par (2) et (3).

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0 \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} + f_i = 0 \quad (3)$$

Les conditions aux limites sont définies sur les déplacements. La relation liant les déformations  $\varepsilon$  aux déplacements  $u$  est définie par (4).

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

Les contraintes sont liées aux déformations par la loi d'élasticité linéaire (loi de Hooke):

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (5)$$

Le problème d'élasticité est exprimé sous la forme suivante :

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dx = \int_{\Omega} F \cdot v dx + \int_{d_\Omega} f \cdot v ds \quad (6)$$

Une discrétisation par EF est ensuite employée. S'appuyant sur un maillage triangulaire, et avec comme termes sources les forces discrétisées aux nœuds, les inconnues liées aux déplacements sont déterminées. Les contraintes sont ensuite calculées.

#### 5. COMPORTEMENT MAGNETO-MECANIQUE

Le comportement magnéto-mécanique anhystérétique est ici pris en compte à l'aide d'une version simplifiée d'un modèle de comportement magnéto-élastique multi-échelle [7]. La multi-axialité des contraintes agissant sur les caractéristiques magnétiques est bien considérée. Dans le cas d'un matériau initialement isotrope, le modèle repose sur trois paramètres : l'aimantation à saturation, la constante de déformation de magnétostriction à saturation et un paramètre d'ajustement.

Pour trois niveaux de contraintes uniaxiales en compression au sein du rotor, les courbes  $b=f(H)$  ont été calculées, voir figure 3.

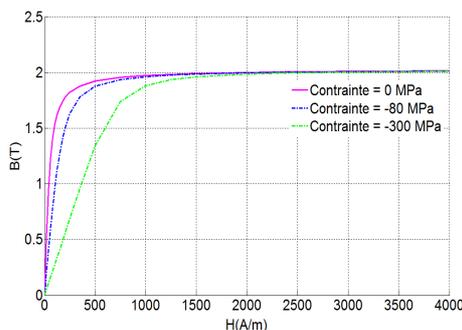


Fig. 2 Caractéristique  $B(H)$  au rotor pour différents niveaux de contraintes.

#### 6. COUPLAGE MAGNETO-MECANIQUE

Le schéma décrivant le couplage magnéto-mécanique est donné sur la Fig. 2. Le premier calcul magnétique est effectué sans tenir compte des contraintes mécaniques. À partir de la direction du champ et des contraintes, le modèle de comportement magnéto-mécanique donne une nouvelle caractéristique  $B(H)$ . Si on ne tient compte que des efforts dus à l'inertie, le calcul mécanique est lancé une seule fois. Le modèle magnétique associé au modèle de comportement est alors exécuté jusqu'à convergence des résultats.

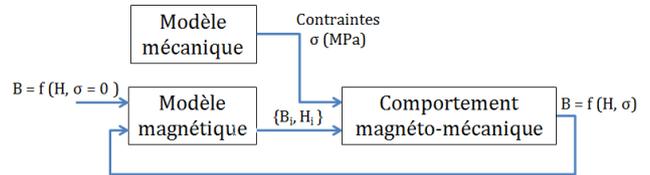


Fig. 2 Schéma du couplage magnéto-mécanique.

#### 7. CONCLUSIONS

Dans ce papier, le couplage entre un CEM non-linéaire et un modèle mécanique est présenté. L'intérêt est d'utiliser un tel couplage dans une procédure de dimensionnement de structure de machine faisant apparaître des zones fortement contraintes mécaniquement (pont magnétique, application haute vitesse...) utilisée. Dans la version étendue du papier, une discrétisation magnétique spécifique du rotor sera utilisée. Les caractéristiques locales et globales de l'actionneur en fonction de diverses contraintes mécaniques seront également discutées.

#### 8. REMERCIEMENTS

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet COCTEL (Conception Optimale des Chaines de Traction Électrique) piloté par RENAULT-SAS, Guyancourt, France et financé par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie).

#### 9. REFERENCES

- [1] R. Akaki, Y. Takahashi, K. Fujiwara, M. Matsushita, N. Takahashi et M. Morita, « Effect of Magnetic Property in Bridge Area of IPM Motors on Torque Characteristics », IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, no. 5, 2013.
- [2] J. Kolehmainen et J. Ikäheimo, « Motors with buried magnets for medium-speed applications », IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 23, no. 1, pp. 86-91, 2008.
- [3] Y. Kai, Y. Tsuchida, T. Todaka et M. Enokizono, « Effect of Local Residual Stress in Rotating Machine Core on Vector Magnetic Property », XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome.
- [4] Z. Han, H. Yang et Y. Chen, « Investigation of the rotor mechanical stresses of various interior permanent magnet motors », International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Tokyo, 2009.
- [5] M. Hage Hassan, G. Remy, G. Krebs et C. Marchand, « Radial output space mapping for electromechanical systems design », COMPEL, vol. 33, no. 3, 2014.
- [6] R. Benlamine, F. Dubas, S-A. Randi, D. Lhotellier et C. Espanet, « Modeling of an Axial-Flux Interior PMs Machine for an Automotive Application Using Magnetic Equivalent Circuits », ICEMS, Pattaya, Thailand, 25-28 octobre, 2015.
- [7] L. Bernard, L. Daniel, « Effect of stress on magnetic hysteresis losses in a switched reluctance motor: application to stator and rotor shrink-fitting », IEEE Transactions on Magnetics, 51(9), 2015.