



**HAL**  
open science

# Conception multi-physique d'une machine synchrone à aimants permanents sous contraintes utilisant des modèles à constantes localisées

N Bracikowski, M. Hecquet, P. Brochet

## ► To cite this version:

N Bracikowski, M. Hecquet, P. Brochet. Conception multi-physique d'une machine synchrone à aimants permanents sous contraintes utilisant des modèles à constantes localisées. EF, Electrotechnique du Futur, Dec 2011, Belfort, France. hal-01731195

**HAL Id: hal-01731195**

**<https://hal.science/hal-01731195>**

Submitted on 13 Mar 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Conception multi-physique d'une machine synchrone à aimants permanents sous contraintes utilisant des modèles à constantes localisées.

N. BRACIKOWSKI, M. HECQUET, P. BROCHET

Université Lille Nord de France - L2EP- Ecole centrale de Lille, Villeneuve d'Ascq, France,  
nicolas.bracikowski@ec-lille.fr; michel.hecquet@ec-lille.fr;

## RESUME –

Afin d'obtenir une conception optimale d'un système électromécanique intégrant des contraintes de plus en plus drastiques, de nombreux phénomènes physiques : électromagnétique – thermique – électronique – mécanique et acoustique doivent être considérés.

Le but de ce papier est de proposer des modèles multi-physiques reposant sur des modèles à constantes localisées : solution intermédiaire entre la modélisation analytique et numérique. Ces différents modèles permettront l'étude et la conception sous contraintes d'une machine synchrone à aimants permanents dédiée pour la 'traction ferroviaire'.

Les résultats de simulations seront comparés à des résultats éléments finis mais aussi à des essais expérimentaux. Ces modèles complètement paramétrés seront ensuite couplés à des outils d'optimisation en vue de déduire un front de Pareto représentant le bon compromis performances – bruit.

**MOTS-CLES** – machine à aimants en surface, modèle à constantes localisées, modèle multi-physique, bruit d'origine électromagnétique, optimisation.

## 1. Introduction

L'utilisation de machines synchrones à aimants permanents (MSAP) pour des applications ferroviaires est en constante augmentation au détriment de la machine asynchrone. En effet, pour un encombrement équivalent, ces machines développent de meilleures performances sur une plage de vitesse plus grande. Dans ce cadre, les MSAP couramment utilisées sont des machines à bobinage distribué (DW : Distributed Windings) et à aimants en surface (SPM : Surface Permanent Magnet).

Les contraintes d'utilisation et de conception sont, elles aussi, en augmentation : augmentation des performances énergétiques, diminution du volume et du niveau acoustique des différents composants d'une chaîne de traction, éco-conception, etc.

Ces contraintes demandent aux concepteurs de disposer de connaissances et de modèles dans les domaines de l'électronique, de l'électromagnétisme, de la mécanique, de la thermique, ainsi que dans le domaine de l'acoustique. Des outils d'étude et d'analyse, comme ceux utilisant les éléments finis, existent et permettent d'appréhender ces différents phénomènes. Par contre, une étude couplée de l'ensemble de ces domaines en dynamique paraît difficile car extrêmement lourd en temps de calcul.

Dans le but de répondre à ce problème, nous proposons une étude multi-physique qui intègre des modèles à constantes localisées. Un réseau de perméances pour le circuit magnétique est couplé à un circuit électrique, lui-même couplé au convertisseur. Un couplage avec un réseau nodal pour une étude thermique et avec un modèle vibro-acoustique est également possible. L'intérêt est de proposer une étude multi-physique complète avec un bon compromis temps de calcul-précision.

La première partie de l'article présentera les différents modèles, la seconde les simulations comparées à des résultats Eléments Finis (E.F.) et à des résultats expérimentaux. Le couplage avec un outil d'optimisation permettra d'observer sur un front de Pareto le bon compromis bruit – couple moyen ainsi que le niveau de pulsation de couple.

## 2. Modèles à constantes localisées

L'originalité de ce travail est de proposer pour chaque domaine de la physique des modèles à constantes localisées couplés comme un réseau de perméances pour le circuit magnétique, un réseau nodal pour la partie thermique, un circuit électrique pour le convertisseur et la partie électrique de la machine. Ainsi les phénomènes multi-physiques seront pris en considération lors du processus de conception [1-2].

La figure 1 illustre une synthèse possible des différents modèles physiques qui peuvent être appliqués à une MSAP avec des aimants en surface [3].

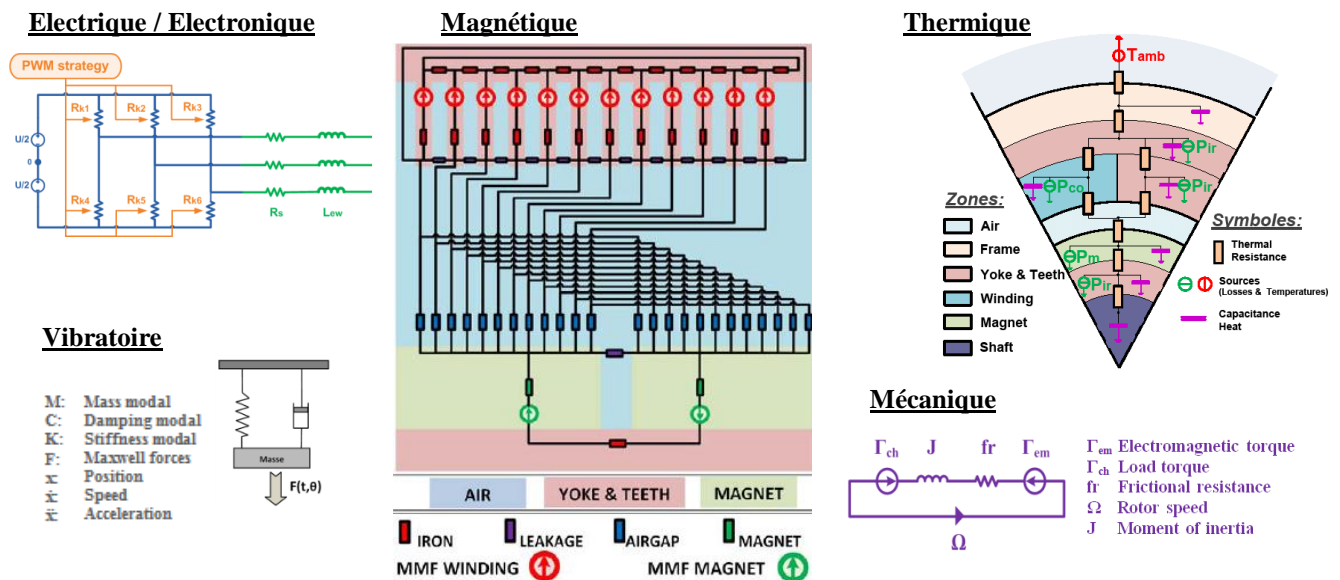


Fig. 1. Modèles à constantes localisées pour différents domaines de la physique.

Ces différents domaines de la physique interagissent les uns par rapport aux autres par l'intermédiaire de couplages 'faible' ou 'fort'. Dans notre cas, le couplage entre le circuit électrique et la partie magnétique sera dit 'fort' : résolution simultanée des équations. Par contre, pour le couplage avec la partie thermique et acoustique, les couplages seront dit 'faibles' : résolution successive des équations. Par exemple, le calcul électromagnétique permet d'estimer les pertes au sein de la machine, source du modèle thermique. Une première estimation de la température permet de faire évoluer les caractéristiques des matériaux : résistivité du cuivre, perméabilité de l'aimant, etc. Cela a pour conséquence de modifier les propriétés électromagnétiques du système.

La machine étudiée est une machine synchrone à aimants en surface utilisée en traction ferroviaire. Elle est associée à son convertisseur et à une charge mécanique. Les paramètres d'entrée des différents modèles sont géométriques, électriques et les caractéristiques des matériaux. Ces modèles sont entièrement paramétrés afin d'être intégrés dans une boucle d'optimisation.

Après avoir fourni ces différents paramètres, la construction des modèles est automatique. Différentes méthodes existent pour le calcul des grandeurs des circuits, notamment, pour l'évaluation de la perméance d'entrefer fonction de l'angle mécanique qui intègre le mouvement du rotor. C'est une grandeur essentielle dans une étude multi-physique, notamment la force électromotrice, le couple oscillant et le rayonnement acoustique qui sont particulièrement « sensibles » à son allure.

Nous avons choisi de placer une perméance entre chaque nœud rotorique et nœud statorique. Le nombre de nœuds dépend de la discrétisation choisie. Automatiquement, la loi d'évolution de cette perméance d'entrefer est déterminée soit analytiquement ou par l'intermédiaire d'un calcul E.F. (FEMM : <http://femm.foster-miller.net>). Ce point sera détaillé dans l'article complet, présentant le bon compromis entre la précision d'évaluation et le temps de calcul.

Sur la figure 2, on peut observer les allures de la perméance d'entrefer en fonction de la position du rotor pour différentes ouvertures de l'aimant et pour différentes longueur d'entrefer. Les allures présentées ci-dessous sont ici déterminées de façon analytique en approximant les trajets dans l'entrefer par des quarts de cylindre, des prismes à base rectangulaire ou encore trapézoïdale.

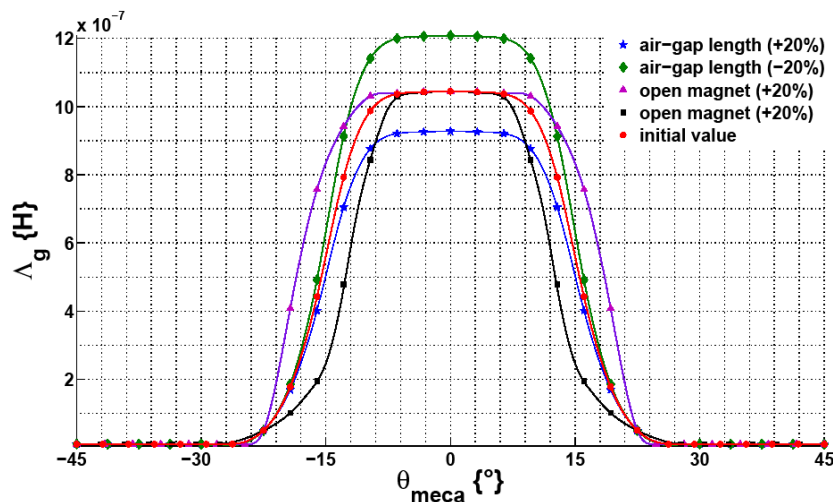


Fig. 2. Evolution de la perméance d'entrefer en fonction de l'ouverture de l'aimant et de la longueur de l'entrefer.

Le couple électromagnétique ( $\Gamma_{em}$ ) de la machine est déterminé par la relation suivante:

$$\Gamma_{em} = \sum_{u,v} \frac{\partial \Lambda_{u,v}}{\partial \theta} \times \frac{\varepsilon_{u,v}^2}{2} \quad \Lambda : \text{Perméance d'entrefer} ; \quad \varepsilon : \text{Force Magnétomotrice} ;$$

Celui-ci dépend de la dérivée de la perméance d'entrefer, la continuité de cette allure étant contrôlée lors du calcul de la loi d'évolution de la perméance d'entrefer, et de la force magnétomotrice aux bornes de chaque perméance d'entrefer [4-6]. Nous présentons un résultat de calcul dans la partie III comparé à un calcul FE.

A ces deux premiers modèles vient se coupler un modèle nodal, les pertes dans le fer, Joule et dans les aimants alimentant ce modèle. Ces différents calculs et l'estimation des coefficients d'échange liés à la vitesse de rotation sont fournis dans les références [3], [7-8].

Le modèle vibratoire repose sur un modèle 'masse-ressort' nous permettant d'estimer les fréquences de résonances ainsi que les modes associés. Enfin, les forces radiales (forces de Maxwell) qui sont à l'origine du bruit d'origine électromagnétique sont déduites de l'induction dans l'entrefer fonction du temps et de l'espace. Chaque harmonique de forces associée à sa déformée modale (ordre de la force) alimente le modèle vibratoire. Les différentes relations analytiques sont détaillées dans [2], [9-12].

Les origines du bruit peuvent être diverses : l'effet de denture si la machine n'est pas vrillée, l'effet de la MLI, ainsi que l'effet de la saturation pour des machines à aimants enterrés par exemple. En ce qui concerne le lien entre les harmoniques de couple et le bruit d'origine électromagnétique, la minimisation de ces harmoniques n'entraîne pas forcément un niveau acoustique réduit [13].

Un résultat présenté dans la partie III permettra de mettre en évidence ce point pour une vitesse donnée.

### 3. Résultats et validations

Les premiers résultats utilisant les modèles à constantes localisées (M.C.L.) sont relativement classiques : l'induction dans l'entrefer, la force électromotrice, le courant statorique, etc... validés par un calcul E.F. utilisant OPERA-2D RM, ces résultats sont détaillés dans [3].

Dans ce papier, seulement le couplage mécanique est détaillé : couple, harmonique de couple, bruit d'origine électromagnétique. Sur la figure 3, l'évolution du couple à vide ainsi que le spectre est comparé à ceux obtenus par E.F. : 1 seconde pour une période par les M.C.L. et 300 secondes par E.F., ceci représente un avantage significatif en vue d'un processus d'optimisation.

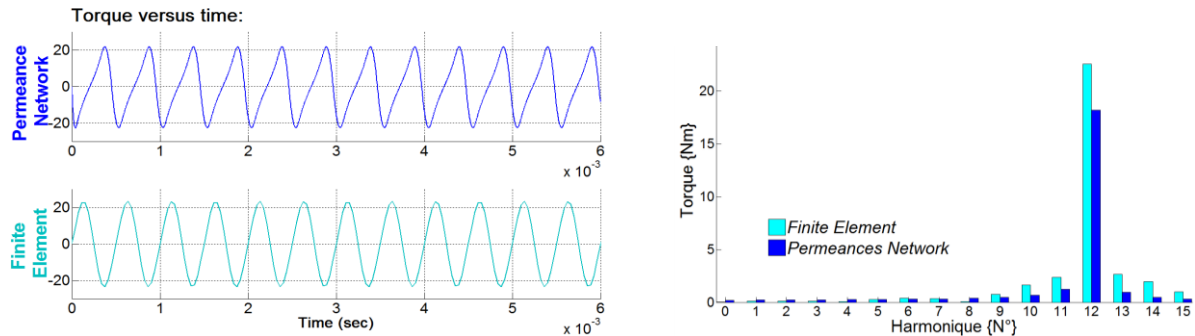


Fig. 3. Couple électromagnétique en fonction du temps *à vide* (cogging torque) avec une alimentation sinusoïdale et son spectre

Sur la figure 4, les harmoniques de l'induction dans l'entrefer fonction du temps et de l'espace sont comparés à une approche éléments finis montrant là aussi de bonnes tendances sur les harmoniques obtenus. Ainsi, les harmoniques d'espace obtenus sont liés à l'effet de denture et les harmoniques de temps à la distribution du bobinage.

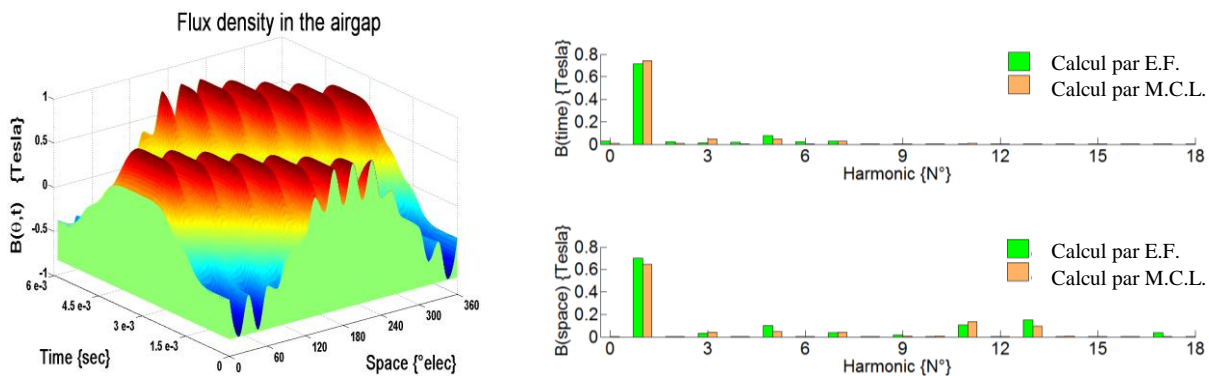
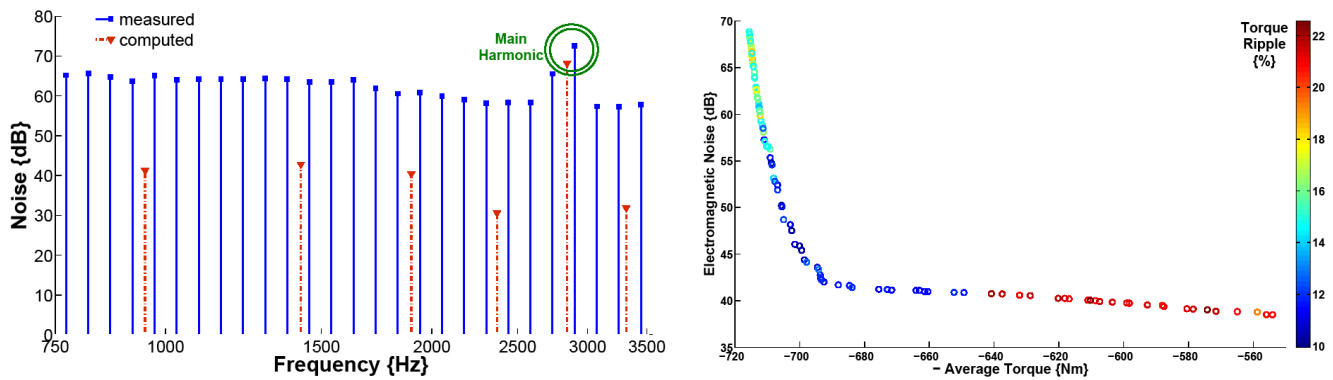


Fig. 4. Induction fonction du temps et de l'espace pour une alimentation sinusoïdale et à vide.

Pour obtenir ce résultat, la discrétisation de l'entrefer doit être suffisante pour intégrer l'effet de denture. La force radiale  $F(t,\theta)$  est ensuite déterminée sur chaque dent statorique, puis la FFT de cette force, les vibrations et le bruit d'origine électromagnétique sont évalués. Ce dernier est comparé à une mesure expérimentale sur la figure 5a. Le maximum de bruit obtenu est retrouvé par la simulation, qui est dans notre cas, lié à l'effet de denture de la machine. Ce point ainsi que toute l'analyse sera détaillé dans le papier complet.

Enfin, nos modèles sont couplés à un outil d'optimisation utilisant la technique 'PSO' (PSO : Particule Swarm Optimization) [14-16]. Cette technique propose un bon compromis entre précision et temps de calcul. Les fonctions 'objectives' retenues sont le couple moyen, le bruit d'origine électromagnétique avec le couple oscillant, la température des aimants, le poids et le coût comme contraintes. Le couple oscillant est exprimé en pourcentage du couple moyen. Les variables choisies sont uniquement géométriques : largeur de dent, ouverture d'aimants, épaisseur de culasse, épaisseur d'entrefer et hauteur d'aimants. Sur le front de Pareto (Fig. 5b), nous pouvons observer qu'il n'y a pas de corrélations entre le couple oscillant et le bruit d'origine électromagnétique pour la vitesse considérée et en charge. En effet, on obtient un minimum de bruit pour un maximum de couple oscillant dans le cas considéré.

Sur le papier complet, d'autres vitesses seront présentées ainsi qu'une étude de sensibilité autour des points 'optimaux' choisis permettant de valider la robustesse du point.



(5a) Bruit d'origine électromagnétique

(5b) Front de Pareto : Bruit / Couple moyen.

Fig. 5. Bruit d'origine électromagnétique et front de Pareto (N=constante et fonctionnement en charge).

## 4. Conclusion

L'objectif de cet article porte sur l'utilisation de modèles à constantes localisées couplées à un outil d'optimisation, ceux-ci permettant une analyse vibro-acoustique sous contraintes d'une machine synchrone à aimants dédiée pour la traction ferroviaire. Ces modèles à constantes localisées apportent un bon compromis temps de calcul – précision et se révèlent particulièrement intéressant dans une phase de conception optimale.

Dans le papier complet, de nombreuses simulations pour différents points de fonctionnement et une étude détaillée seront présentés. De plus, une étude de sensibilité utilisant les plans d'expérience sera détaillée dans le but de renforcer le choix de la meilleure solution.

## Références

- [1] J. Pyrhönen, T. Jokinen, V. Hrabovcova, "Design of Rotating Electrical Machines", John Wiley and Sons, December 2008.
- [2] Gieras, J., Wang, C., Lai, J., "Noise of polyphase electric motors", CRC Press, 2005
- [3] N. Bracikowski, M.Hecquet, P.Brochet, "Multi-physics modeling of permanent magnet synchronous machine by lumped models", ICEM 2010 - International Conference on Electrical Machines, Rome, Italy, 9-2010.
- [4] V. Ostovic, "Dynamics of saturated machines", Springer-Verlag, 1989.
- [5] M. Hecquet, P. Brochet, "Modeling of a claw-pole alternator using permeance network coupled with electric circuit", IEEE Transaction on Magnetic, May 1995, Vol.31, N°3, pp. 2131-2134.
- [6] D.Petrichenko, M.Hecquet, P.Brochet, V.Kutznetsov, D. Laloy, "Design and simulation of turboalternators using coupled permeance network model", IEEE Trans on Magnetics, Vol. 42, pp 1259-1262, 4-2006.
- [7] Alberti, L.; Bianchi, N.; "A Coupled Thermal-Electromagnetic Analysis for a Rapid and Accurate Prediction of IM Performance," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.55, no.10, pp.3575-3582, Oct. 2008
- [8] A. Fasquelle, « Contribution à la modélisation multi-physique : électro-vibro-acoustique et aérothermique de machines de traction », PhD Thesis, Ecole Centrale de Lille, November 2007.
- [9] Jordan, H. Electric, "motor silencer - formation and elimination of the noises in the electric motors", W. Giradet-Essen editor, 1950.
- [10] Timar, P. L., "Noise and vibration of electrical machines", Elsevier, 1989.
- [11] Le Besnerais, J.; Fasquelle, A.; Hecquet, M.; Pelle, J.; Lanfranchi, V.; Harmand, S.; Brochet, P.; Randria, A.; "Multiphysics Modeling: Electro-Vibro-Acoustics and Heat Transfer of PWM-Fed Induction Machines", IEEE Trans On Industrial Electronics, April 2010, Vol.57, Issue:4, pp 1279 - 1287
- [12] Huang, S.; Aydin, M.; Lipo, T.A.; "Electromagnetic vibration and noise assessment for surface mounted PM machines", IEEE PES, Power Engineering Society, 2001, pp.1417 – 1426, vol.3, 2001
- [13] Islam, R.; Husain, I.; "Analytical Model for Predicting Noise and Vibration in Permanent-Magnet Synchronous Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.46, no.6, pp.2346-2354, Nov.-Dec. 2010.
- [14] Leandro dos Santos Coelho, Leandro Zavarez Barbosa, and Luiz Lebensztajn, "Multiobjective Particle Swarm Approach for the Design of a Brushless DC Wheel Motor, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 8, pp. 2994-2997, august 2010.
- [15] M.A. Panduro, C.A. Brizuela, "A comparative analysis of the performance of GA, PSO and DE for circular antenna arrays", in Antennas and Propagation Society International Symposium APSURSI, Charleston, SC, 2009, pp.1-4.
- [16] D. Ilea; M. Radulescu, F. Gillon, P. Brochet, "Particle-Swarm-Optimized Design of a Three-Phase Full-Bridge Inverter-Fed Switched Reluctance Motor", Electromotion Journal, Vol.17 no. 3 pp.23-29 ISSN1223-057, Jul.-Sep., 2010