



**HAL**  
open science

## Dimensionnement optimal de griffes d'alternodémarreurs grâce à un modèle hybride couplant fortement EF 3D et schéma de perméances

Geoffrey Devornique, Julien Fontchastagner, Denis Netter, Nouredine Takorabet

### ► To cite this version:

Geoffrey Devornique, Julien Fontchastagner, Denis Netter, Nouredine Takorabet. Dimensionnement optimal de griffes d'alternodémarreurs grâce à un modèle hybride couplant fortement EF 3D et schéma de perméances. Symposium de Génie Électrique - SGE'2018, Jul 2018, Nancy, France. hal-02945390

**HAL Id: hal-02945390**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02945390v1>**

Submitted on 22 Sep 2020

**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.

# Dimensionnement optimal de griffes d'alternodémarrateurs grâce à un modèle hybride couplant fortement EF 3D et schéma de perméances

Geoffrey DEVORNIQUE, Julien FONTCHASTAGNER, Denis NETTER et Noureddine TAKORABET  
Université de Lorraine, GREEN, Vandœuvre-lès-Nancy, F-54500, France.

**RESUME** – Dans cet article, une approche originale basée sur un modèle hybride couplant fortement éléments finis 3D et schéma de perméances est présentée. Ce modèle hybride est ensuite associé à une recherche directe par treillis adaptatif pour définir une méthodologie permettant de résoudre des problèmes de dimensionnement optimal compliqués tels que celui des griffes d'un alternodémarrateur.

**Mots-clés** – Alternodémarrateur, Modèle hybride, Élément finis 3D, Schéma de perméances, Optimisation.

## 1. INTRODUCTION

Les travaux détaillés dans ce papier présentent une nouvelle méthodologie pour résoudre des problèmes de conception optimale de machines électriques à caractère fortement 3D telles que les alternodémarrateurs synchrones à griffes. On utilise généralement des modèles par réseau de réluctances pour traiter ce type de problèmes, comme par exemple dans [1]. Bien qu'intéressants en terme de temps de calcul, ces derniers sont soumis à des hypothèses restrictives fortes sur les trajets de flux et le calcul des réluctances du circuit. C'est pourquoi, compte-tenu de la complexité des géométries étudiées, un calcul du champ par éléments finis 3D permettant d'extraire les grandeurs globales dimensionnantes (couple, flux, fém...) est préférable. Cependant ces derniers sont gourmands en ressources informatiques et impliquent des temps de calcul relativement importants. Ceci est préjudiciable pour les inclure dans un processus d'optimisation.

L'idée principale de nos travaux est de développer un modèle hybride combinant les avantages des deux modèles précédents (rapidité des réseaux réluctants et précision des éléments finis). Pour ce faire, nous utiliserons un schéma de perméances pour représenter les parties de machine où les trajets de flux sont plutôt bien connus. Ce schéma sera ensuite couplé fortement à un domaine éléments finis restreint permettant de garantir une bonne approximation des valeurs de champ dans les zones d'intérêt (principalement l'entrefer).

Dans un deuxième temps, le modèle hybride sera associé à un algorithme de type recherche directe par treillis adaptatif (MADS) spécialement conçu pour résoudre des problèmes d'optimisation avec boîte noire à fort coût d'évaluation [2, 3]. Nous verrons ainsi que la méthodologie proposée est particulièrement bien adaptée pour résoudre nos problèmes de conception de machine synchrone à griffes.

## 2. MODÈLE HYBRIDE

Notre objectif est de développer un modèle 3D plus rapide qu'un modèle par éléments finis (EF) complet mais conservant une précision acceptable sur les grandeurs globales.

### 2.1. Principe général

L'idée générale du modèle est donc de limiter le domaine EF aux endroits où le champ est difficile à calculer (effets 3D prononcés, saturation des matériaux très localisée, etc), et de traiter

les autres parties en utilisant un modèle par circuit magnétique équivalent. Une représentation schématique est donnée par la figure Fig. 1. Puisque notre but est de réduire les temps de calcul, nous avons choisi une formulation en potentiel scalaire magnétique (noté  $U_m$ ) pour la partie EF. Ainsi, l'inconnue privilégiée côté circuit sera naturellement le vecteur des forces magnéto-motrices (FMM) du circuit, ceci afin d'effectuer une résolution en champ magnétique ( $h$ -conforme) dans les deux sous domaines.

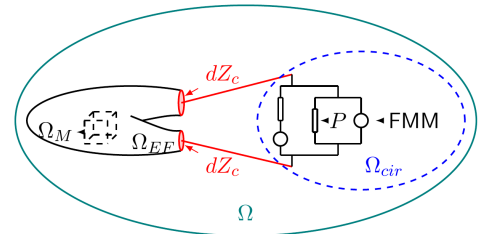


Fig. 1. Principe schématique du couplage pour le modèle hybride.

Aux interfaces  $dZc$  entre les deux domaines, le couplage fort entre les deux parties est réalisé en assurant la conservation du flux magnétique. On obtient ainsi un couplage analogue à celui de type « circuit électrique » à ceci près que les expressions des perméances tiennent compte de la non-linéarité des matériaux ferromagnétiques [4]. Un avantage non négligeable de ce type de modèle est qu'il permet de reporter les sources de champ correspondant aux conducteurs dans la partie circuit. On s'affranchit ainsi du calcul d'un champ source dans la partie EF qui se limite alors à la résolution du système correspondant à  $U_m$ .

### 2.2. Application à une machine synchrone à griffes

Le modèle précédent est facilement applicable à notre problème de machine à griffes. La figure Fig. 2 présente un exemple de géométrie EF initiale (complète), ainsi que le domaine réduit et le circuit magnétique formant le modèle hybride. L'ensemble

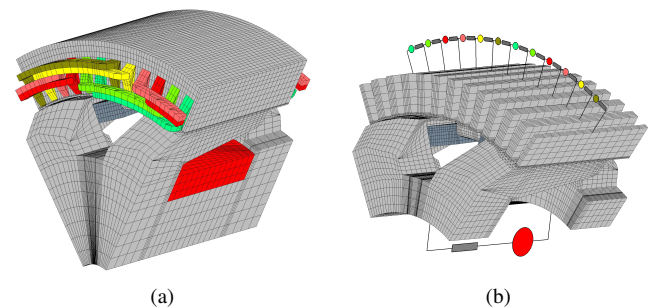


Fig. 2. Modèles de la machine à griffes : (a) EF complet, (b) modèle hybride.

a été implanté en utilisant les logiciels libres Gmsh [5] et GetDP [6].

Un exemple de calcul pour chacun des deux modèles est donné par la figure Fig. 3 montrant l'induction dans la machine pour un point de fonctionnement en charge. On observe une excellente concordance entre les résultats fournis par les deux modèles. Ainsi, le modèle hybride pourra tout à fait être utilisé dans un processus d'optimisation.

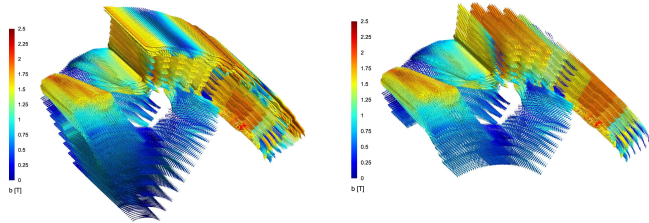


Fig. 3. Induction dans la machine calculée par les deux modèles, fonctionnement en charge (valeur max : 2,5 T).

### 3. CONCEPTION OPTIMALE

#### 3.1. Formulation du problème

Dans cette partie, l'association entre le modèle hybride précédemment développé et un algorithme de type Recherche Directe par Treillis Adaptatif (MADS) [2] est décrite sous la forme d'un premier exemple simple. Nous cherchons une forme de griffes permettant de maximiser le couple moyen  $T_m$  par un alterno-démarreur. Les variables du problème d'optimisation ne sont pas choisies parmi les paramètres géométriques liés à la forme des griffes. En effet, ces dernières sont géométriquement définies à partir de splines et de segments. Et ce sont certaines coordonnées des sommets des segments ou des points de contrôle des splines qui seront nos variables d'optimisation. Un exemple est fourni en figure Fig. 4.

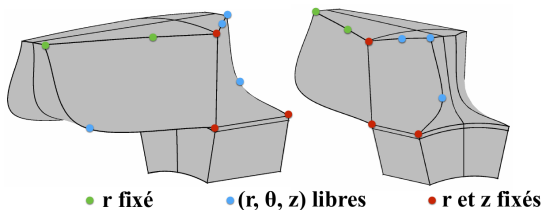


Fig. 4. Exemple de représentation géométrique des griffes (points bleus : coordonnées entièrement libres ; verts : rayon fixé ; rouges : rayon et cote fixés).

Ces différentes coordonnées libres sont englobées dans le vecteur de variable  $\mathbf{X}$ , et le problème d'optimisation à résoudre se met sous la forme :

$$\max_{\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{19}} T_m(\mathbf{X}), \text{ sous } \mathbf{X}^L \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}^U \quad (1)$$

Il est donc de dimension 19 avec uniquement des contraintes de bornes (sans contrainte non-linéaire). Grâce au logiciel libre NOMAD [3], plusieurs stratégies reposant toutes sur une recherche MADS ont été utilisées pour résoudre ce problème. Le fonctionnement général de l'algorithme sera détaillé dans la version longue du papier.

#### 3.2. Résultats

Trois points de départ très différents ont été choisis ( $\mathbf{X}_{01}$ ,  $\mathbf{X}_{02}$  et  $\mathbf{X}_{03}$ ). Ces derniers, et les solutions optimales correspondantes sont fournies en figure Fig. 5.

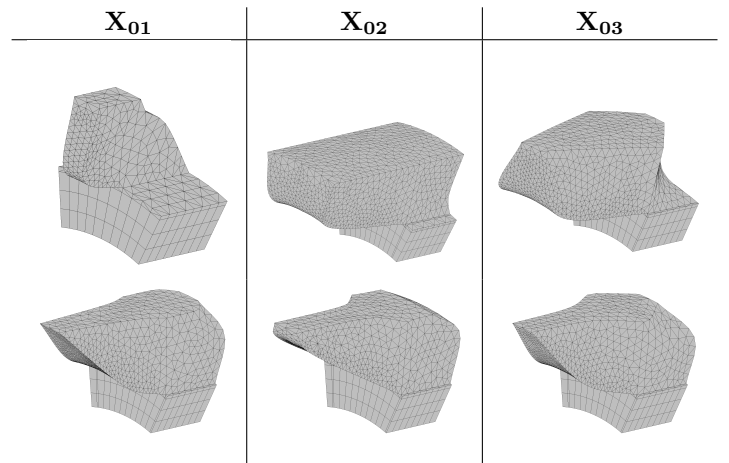


Fig. 5. Points de départ choisis et solutions optimales correspondantes

Même si les solutions obtenues sont différentes (ce qui montre par ailleurs le caractère déterministe local de la méthode), on constate de grandes similitudes entre les formes optimales. De plus, chacune de ces solutions fournit un couple moyen identique aux autres. Notre méthodologie fournit ainsi plusieurs solutions équivalentes en termes de performance. La solution finale du problème pourra ainsi être choisie à partir d'autres critères (coût de matière, facilité de fabrication, etc.).

Un problème plus complet comportant des aimants intergriffes et des contraintes supplémentaires sera détaillé dans le papier final.

### 4. CONCLUSIONS

Dans cet article, est présentée une approche originale basée sur un modèle hybride couplant fortement EF 3D et schéma de perméance associé à une recherche directe par treillis adaptatif. La méthodologie proposée permet de résoudre efficacement des problèmes de dimensionnement optimal compliqués tel que celui des griffes d'un alterno-démarreur.

### 5. REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cet article ont été financés dans le cadre du projet «LOWCO2MOTION+» porté par l'entreprise Valeo et visant à améliorer l'efficacité des moteurs automobiles et contribuer à réduire leurs émissions en CO<sub>2</sub>.

### 6. RÉFÉRENCES

- [1] Laurent Albert, «Modélisation et optimisation des alternateurs à griffes. Application au domaine automobile». Thèse de Doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, 2004.
- [2] C. Audet et J.E. Dennis, Jr., «Mesh adaptive direct search algorithms for constrained optimization», SIAM Journal on Optimization, vol. 17, no. 1, p. 188-217, 2006.
- [3] S. Le Digabel, «Algorithm 909 : NOMAD : Nonlinear optimization with the MADS algorithm», ACM Transactions on Mathematical Software, vol. 37, no. 4, p. 44 :1-44 :15, 2011.
- [4] G. Devornique, J. Fontchastagner, D. Netter et N. Takorabet, «Hybrid Model : Permeance Network and 3D finite Element for modeling Claw-Pole Synchronous Machines», IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 6, p. 7206704 :1-4, 2017.
- [5] C. Geuzaine and J.-F. Remacle, «Gmsh : a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities», International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 79, no. 11, p. 1309-1331, 2009.
- [6] P. Dular and C. Geuzaine, «GetDP reference manual : the documentation for GetDP, a general environment for the treatment of discrete problems», <http://getdp.info>.