



HAL
open science

Dimensionnement optimal de griffes d'alternos-démarrateurs 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'alternos-démarrateurs grâce à un modèle hybride couplant fortement EF 3D et schéma de perméances. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981844

HAL Id: hal-02981844

<https://hal.science/hal-02981844v1>

Submitted on 28 Oct 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). Le modèle ainsi obtenu sera finalement validé par un modèle EF complet et par des mesures expérimentales.

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'évaluations [2, 3]. Nous verrons ainsi que la méthodologie proposée est particulièrement bien adaptée pour résoudre nos problèmes de conception de machine synchrone à griffes. Deux cas seront étudiés : tout d'abord, un exemple type permettra de décrire le principe de la méthode ; puis nous résoudrons un vrai cas industriel, avant de conclure.

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 magnétomotrices (FMM) du circuit, ceci afin d'effectuer une résolution en champ magnétique (h-conforme) dans les deux sous domaines [4, 5].

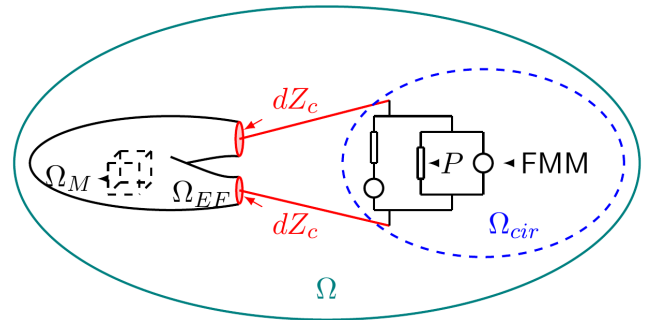


Fig. 1. Principe schématique du couplage pour le modèle hybride.

Aux n_i interfaces $dZ_c (= \cup_{k=1}^{n_i} dZ_{c_k})$ 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 [6]. De plus, grâce à ce type d'approche, il est envisageable de transférer les sources de champ correspondant aux conducteurs dans le domaine circuit Ω_{circ} . 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 .

En notant $[\mathbf{V}_p]$ le vecteur des FMM dans les n_b branches du circuit, et $[\varphi]$ celui des flux y circulant, la formulation faible ($U_m - V_p$) correspondant au modèle hybride est alors :

$$\begin{cases} \forall U'_m \in \mathbf{H}_1(\Omega), \forall [\mathbf{V}'_p] \in \mathbb{R}^{n_b} : \\ \bullet - (\mu \mathbf{grad} U'_m, \mathbf{grad} U'_m)_{\Omega_{EF}} \\ \quad + (\mu \mathbf{h}_c, \mathbf{grad} U'_m)_{\Omega_{EF}} + \langle \mathbf{n} \cdot \mathbf{b}, U'_m \rangle_{dZ_c} = 0 \\ \bullet ([\varphi], [\mathbf{V}'_p])_{\Omega_{circ}} - ([\mathbf{P}] \cdot [\mathbf{V}'_p], [\mathbf{V}'_p])_{\Omega_{circ}} = 0 \\ \bullet \varphi_k = \langle \mathbf{n} \cdot \mathbf{b}, U'_m \rangle_{dZ_{c_k}}, \forall k \in \llbracket 1, n_i \rrbracket \end{cases} \quad (1)$$

Le dernier terme correspond au couplage entre parties circuit et

EF, \mathbf{h}_c représente les champs coercitifs des aimants permanents (si nous sommes en présence d'aimant), et $[\mathbf{P}]$ correspond aux perméances des différentes branches du circuit magnétique [6].

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 a été implémenté en utilisant les logiciels libres Gmsh [7] et GetDP [8].

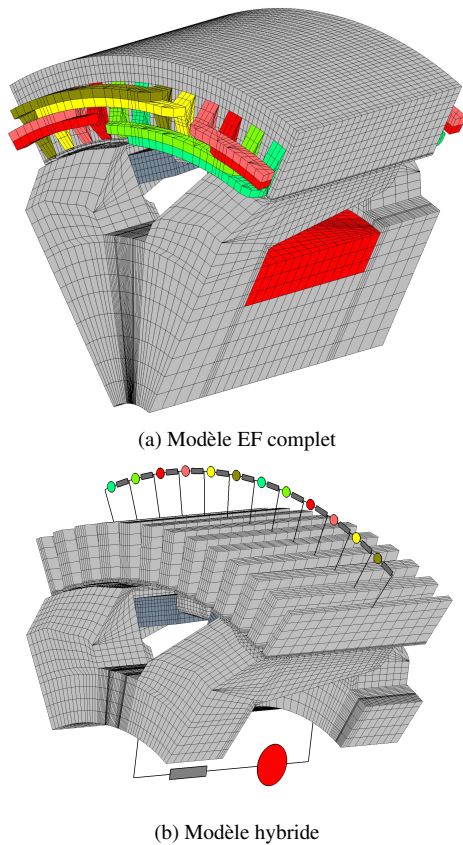


Fig. 2. Modèles de la machine à griffes.

Pour le modèle hybride, le domaine EF correspond aux griffes, à l'entrefer et aux encoches de l'alternateur. Le reste de la machine est modélisé par un circuit de perméances comportant 13 sources (12 encoches statoriques et l'inducteur rotorique) et 13 perméances. Dans ce cas, le nombre de faces d'interconnexion n_c est égal à 15. Ce modèle permet ainsi de réduire fortement le nombre d'inconnues (Dofs) du système à résoudre. Pour les modèles EF complets, leurs ordres de grandeurs sont de 450 000 Dofs pour une formulation en potentiel vecteur et de 226 000 Dofs pour une formulation en potentiel scalaire. Le modèle hybride conduit quant à lui à un système de 135 000 inconnues (en conservant le maillage du modèle initial dans les parties communes en éléments finis).

Le modèle complet est résolu en utilisant une formulation en potentiel vecteur magnétique \mathbf{a} avec jauge de Coulomb. En effet, même si la formulation en \mathbf{a} conduit à un système de taille plus importante, elle est plus rapide que celle en potentiel scalaire car nécessite près de deux fois moins d'itérations pour résoudre le problème non-linéaire associé. Ce problème non-linéaire est résolu par une méthode de Newton-Raphson dont le critère d'arrêt porte sur l'intégrale de $\mathbf{b} \cdot \mathbf{h}$ dans l'entrefer de la machine (produit de l'induction et du champ). Pour le modèle hybride, le problème non-linéaire est résolu suivant une méthode de point fixe

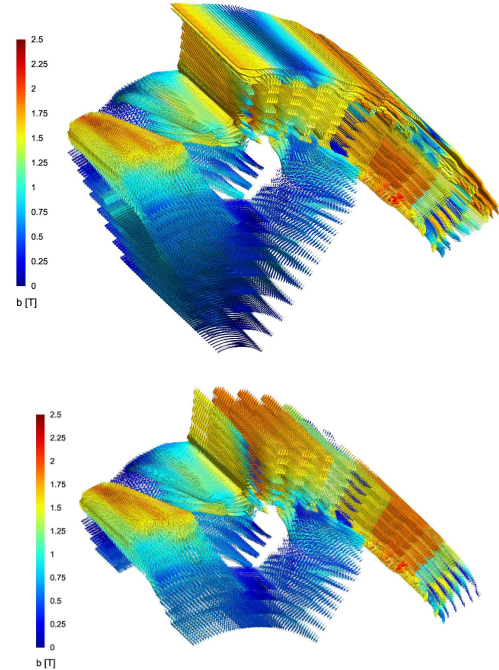


Fig. 3. Induction dans la machine calculée par les deux modèles, fonctionnement en charge (valeur max : 2,5 T).

(type Picard) dont la première itération correspond à une pré-initialisation en régime linéaire. Ces différents choix découlent de travaux antérieurs présentés dans [9]. 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.

Une validation expérimentale a également été menée. Une photographie du banc utilisé est donnée en Fig. 4. Deux alternateurs fournis par la société Valeo sont accouplés face à face : un en moteur et un en alternateur.

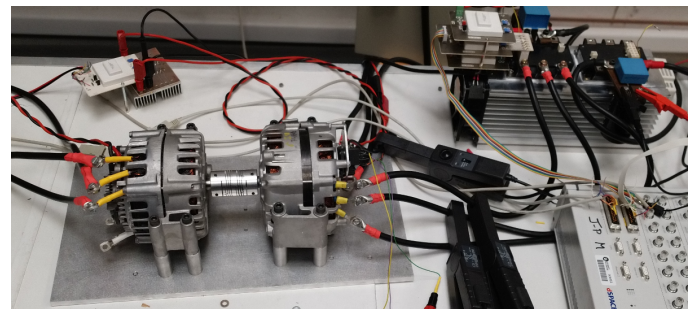


Fig. 4. Banc expérimental.

Nous avons ainsi pu relever par exemple les forces électromotrices (fém) à vide et les comparer à celles issues des deux modèles précédents. Les résultats obtenus sont tracés sur la figure Fig. 5.

Ici encore on constate une bonne corrélation des modèles. Le modèle hybride a une légère tendance à surestimer les valeurs de fém, mais les écarts restent faibles (autour de 10%) et sont encore moins importants dans le cas d'un fonctionnement en charge. Si on s'intéresse aux temps de calcul : le modèle hybride est environ 12 fois plus rapide que le modèle complet (54 sec contre 11 min 49 pour un calcul en charge). Ainsi, le modèle hybride pourra tout à fait être utilisé dans un processus d'optimisation.

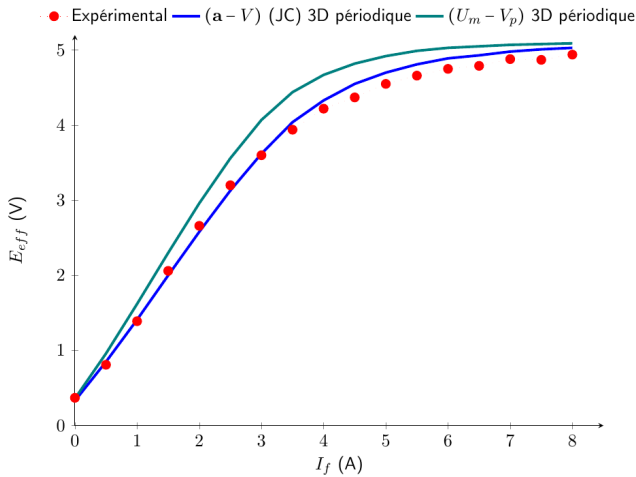


Fig. 5. Fém à vide : points rouges = relevés expérimentaux, ligne bleue = modèle EF complet, ligne verte = modèle hybride.

3. MÉTHODOLOGIE DE 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 fourni par un alterno-démarreur. Ce couple moyen sera évalué par le modèle hybride présenté ci-avant en l'appliquant sur trois positions judicieusement choisies (donc trois calculs différents par évaluation de la fonction objectif).

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. 6.

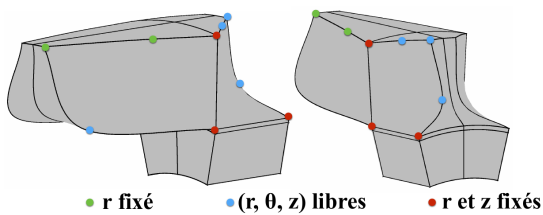


Fig. 6. Exemple de représentation géométrique des griffes (points bleus : coordonnées entièrement libres ; verts : rayon fixé ; rouges : rayon et cote fixés).

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

$$\max_{\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{19}} T_m(\mathbf{X}), \text{ sous } \mathbf{X}^L \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}^U \quad (2)$$

Il est donc de dimension 19 avec uniquement des contraintes de bornes (sans contrainte non-linéaire). Ce premier exemple est volontairement simplifié : à terme, nous souhaitons résoudre des problèmes avec un plus grand nombre de variables (et éventuellement des variables discrètes permettant d'intégrer la polarité de la machine ou différents types de matériaux magnétiques par exemple), et des contraintes plus générales.

Il a néanmoins le mérite de montrer l'originalité de l'approche choisie. En effet, nous avons décidé de nous placer à

mi-chemin entre l'optimisation paramétrique et l'optimisation de forme. Les formes de griffe définies par notre choix de variables (coordonnées de points de contrôles) sont beaucoup moins contraintes que si nous avons opté de les représenter par des paramètres géométriques tels que des hauteurs ou des largeurs. En cela, nous nous rapprochons de l'optimisation de forme. Cependant, après reformulation en problèmes d'optimisation, nos problèmes de conception relèvent toujours de l'optimisation paramétrique, et nous devons choisir un algorithme efficace pour les résoudre.

3.2. Choix et principe de l'algorithme d'optimisation

Même si le modèle hybride présenté précédemment a permis de fortement diminuer les temps de calcul nécessaire à l'estimation des grandeurs externes de la machine, il reste quand même lourd à manipuler (ordre de grandeur de la minute pour une évaluation). C'est pourquoi nous avons préféré écarter les méthodes méta-heuristiques globales (telles que les algorithmes génétiques ou autres algorithmes de population) pour nous concentrer sur des méthodes conçues pour être utilisées avec des boîtes noires à fort coût d'évaluation.

Nous nous sommes surtout intéressés à une classe de méthodes particulières : celle des recherches directes par motifs (*Pattern Search*). Initialement, ces méthodes étaient des déterministes locales sans calcul de dérivée. L'idée principale étant de chercher un meilleur point que la solution courante dans son voisinage défini par un nombre donné de directions. Au fil du temps, ces méthodes ont été étendues et enrichies, en essayant de les « globaliser » en introduisant certains caractères des méta-heuristiques. Un algorithme particulièrement intéressant est celui de recherche par treillis adaptatifs : MADS (*Mesh Adaptive Direct Search*) [2] développé par les chercheurs du GERAD de Montréal et facilement accessible grâce à la suite logicielle libre NOMAD [3, 10].

Le but de l'outil NOMAD est de fournir des méthodes d'optimisation permettant de résoudre spécifiquement des problèmes avec boîte noire à fort coût d'évaluation. Le type de problèmes résolus peut se mettre sous la forme :

$$\min_{x \in \Omega} f(x) \quad (3)$$

avec : $\Omega = \{x \in \mathbb{K} \subset \mathbb{R}^n : c_i(x) \leq 0, i \in \llbracket 1, n_c \rrbracket\}$, \mathbb{K} étant un hypercube de \mathbb{R}^n défini par les contraintes de bornes, les c_i représentent les n_c contraintes linéaires et non-linéaires. Le principal intérêt de l'outil NOMAD est de fournir un ensemble de « briques élémentaires » permettant à l'utilisateur de définir complètement la stratégie qu'il désire mettre en place.

Le principe général de résolution que nous avons choisi est donné par l'Algorithme 1. Ainsi, le fonctionnement de l'algorithme se décompose en deux grandes phases :

1. La phase de recherche globale (*SEARCH*). Celle-ci permet à l'algorithme MADS de prendre un caractère méta-heuristique dans la phase de recherche de l'optimum. Elle n'est pas nécessairement obligatoire mais lorsque celle-ci est activée, elle s'appuie soit sur différents algorithmes programmés dans l'outil, soit sur des méthodes fournies par l'utilisateur. Parmi celles-ci, on retrouve la phase de recherche programmée par défaut qui repose sur un modèle quadratique obtenu dynamiquement au fil des itérations. Ce dernier est affiné à chaque itération et prend en compte toutes les évaluations précédentes de la boîte noire.

À cette phase de recherche globale peut s'ajouter également des recherches pré-programmées dans NOMAD telles qu'une recherche via un hypercube latin ou une recherche de type VNS [11]. Ces dernières viennent enrichir la recherche initiale afin de favoriser la convergence de l'algorithme sur le treillis courant.

Algorithme 1 : Principe de la version de MADS utilisée

Initialisation :

Soit x_0 un point de départ du problème, $k \leftarrow 0$;
 Initialiser les directions de recherche D_l^0 , la largeur de la sonde Δ_p^0 , et la taille du treillis Δ_m^0 ($\leq \Delta_p^0$) ;

Boucle principale :
répéter

début Recherche Globale [SEARCH] si $k > 0$
 Créer une approximation quadratique $s(x)$ de l'objectif $f(x)$ et des contraintes $c_i(x)$ à partir des points de sondes déjà évalués ;
 Évaluer $s(x)$ aux N_s points choisis du treillis ;
 Récupérer le meilleur candidat m_j , et évaluer $f(m_j)$ et les $c_i(m_j)$;
si m_j n'est pas une meilleure solution que x_k **alors** la recherche a échoué ;
fin
si la Recherche Globale a échoué **alors**
début Sonde Locale [POLL]
 Évaluer f et les c_i en chacun des N_p points de la sonde et sortir dès qu'on a trouvé une meilleure solution que x_k ;
fin
fin
si une meilleure solution que x_k a été trouvée **alors**
 L'appeler x_{k+1} et élargir la taille du treillis Δ_m^k ;
sinon
 $x_{k+1} = x_k$ et réduire Δ_m^k ;
fin
 $k \leftarrow k + 1$, et mettre à jour les directions D_l^k et la largeur de sonde Δ_p^k (fonction de Δ_m^k respectant $\Delta_p^k \geq \Delta_m^k$) ;

jusqu'à critère d'arrêt satisfait (Δ_m^k suffisamment petit) ;

Sortie : x_k , le dernier itéré.

2. La phase de sonde locale (*POLL*). Cette dernière est automatiquement mise en œuvre dans tout problème d'optimisation résolu avec NOMAD. Celle-ci repose sur une recherche locale, sur un voisinage (sonde) du point courant et reposant sur le treillis, dans les directions choisies par l'utilisateur. Cette phase permet de déterminer de nouveaux points à évaluer en vue d'améliorer l'objectif ou les contraintes courantes. Suivant les résultats obtenus au cours de cette phase, deux cas de figures peuvent être envisagés :

- Si l'algorithme trouve un meilleur point, le treillis courant est centré sur ce point et une nouvelle phase de l'algorithme MADS est envisagée ;
- Si aucun point améliorant la solution courante (objectif ou contraintes) n'est trouvé, la taille des mailles composant le treillis est diminuée, son centre n'étant pas modifié. Si toutefois, la nouvelle taille des mailles composant le treillis est inférieure à la taille définie par l'utilisateur, alors l'algorithme NOMAD a convergé dans ce sens.

Une représentation schématique du treillis de largeur Δ_m^k et de la sonde (en gras) de largeur Δ_p^k est donné sur la Fig. 7. Dans ce cas 2D, les trois points d'évaluation de la sonde locale s'appellent p_1, p_2 et p_3 . Le schéma correspond à des directions de recherche

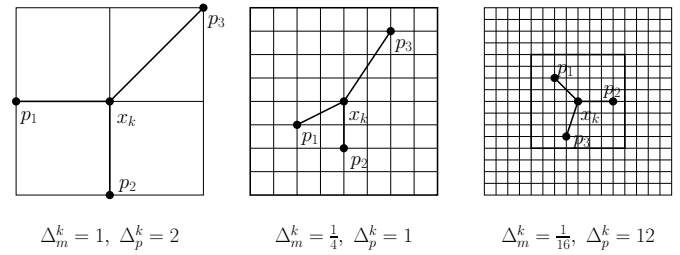


Fig. 7. Représentation schématique du treillis

de la forme LT-MADS N+1. En effet, au sein de l'outil NOMAD, il existe à ce jour deux types d'algorithmes MADS : LT-MADS et ORTHO-MADS. Le deuxième est une extension du premier. La différence se situe essentiellement dans le choix des directions de recherche de la sonde locale et donc dans la nature de la convergence. Pour le premier, la convergence vers un optimum est probabiliste avec une probabilité de 1 alors que pour le second, celle-ci est déterministe du fait de l'orthogonalité des directions de recherche [2]. De plus, un troisième algorithme est programmé dans l'outil, noté GPS (*General Pattern Search*) qui correspond à une extension de l'algorithme *Pattern Search* afin que celui-ci puisse prendre en compte des contraintes linéaires et non-linéaires.

Il est important de noter que les auteurs de la méthode fournissent toujours des résultats et des preuves de convergence de leurs algorithmes. Ceux-ci s'appuient toujours sur la phase de sonde locale, cœur de la méthode, qui assure l'obtention d'un minimum (local à une précision voulue) [2].

3.3. Résultats

Le problème simplifié (2) décrit dans la section 3.1 a été résolu avec différentes versions de l'algorithme et nous a ainsi permis de tester diverses configurations [12]. Par la suite, tous les résultats présentés seront obtenus en utilisant la variante LT-MADS N+1. Trois points de départ très différents ont été choisis (X_{01}, X_{02} et X_{03}). Ces derniers, et les solutions optimales correspondantes sont fournies en figure Fig. 8.

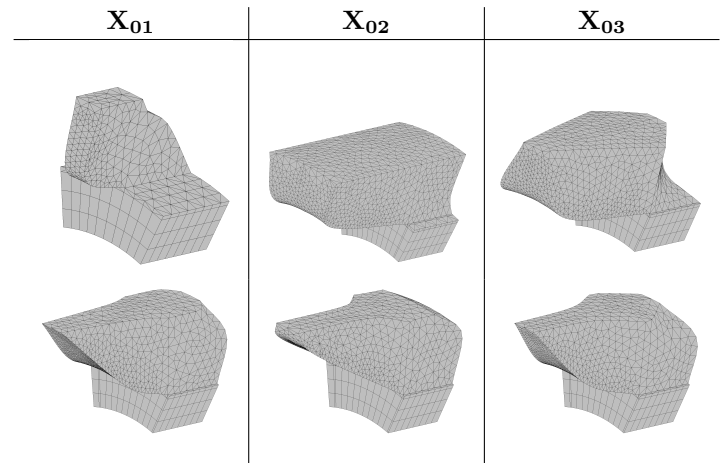


Fig. 8. Points de départ choisis et solutions optimales correspondantes

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. . .). Pour donner un ordre de grandeur des temps de calcul, sur une

station de travail GNU/Linux basique (Intel Xeon @2,40 GHz avec 4 cœurs physiques et 32 Go de RAM), chaque optimisation dure autour d'une journée (26 heures) pour un peu moins d'un millier d'appels à la boîte noire.

4. APPLICATION À UN CAS INDUSTRIEL

La méthodologie a ensuite été appliquée à un problème de dimensionnement optimal de griffes d'alternateur plus réaliste prenant en compte la présence d'aimants inter-polaires à l'inducteur. Une représentation graphique des nouvelles variables retenues est donnée en Fig. 9.

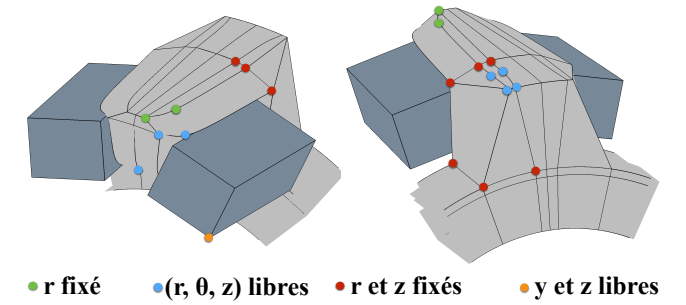


Fig. 9. Représentation géométrique des griffes du cas industriel (points bleus : coordonnées entièrement libres; verts : rayon fixé; rouges : rayon et cote fixés; orange : abscisse fixée).

Le nouveau vecteur de variables \mathbf{X} est alors de dimension 34. Deux problèmes d'optimisation sont ainsi définis pour dimensionner les griffes de notre machine :

$$(P_1) \begin{cases} \max_{\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{34}} T_m(\mathbf{X}) \\ \text{sous : } \mathbf{X}^L \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}^U \\ M_a(\mathbf{X}) \leq M_{a0} \end{cases} \quad (4)$$

$$(P_2) \begin{cases} \min_{\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{34}} M_a(\mathbf{X}) \\ \text{sous : } \mathbf{X}^L \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}^U \\ T_m(\mathbf{X}) \geq T_{m0} \end{cases} \quad (5)$$

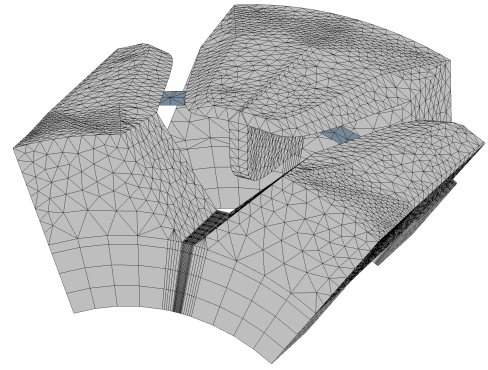
On constate qu'ils sont de taille très conséquente avec 34 variables et une contrainte non-linéaire. Le couple moyen T_m est calculé comme précédemment, et M_a correspond à la masse d'aimant permanent. T_{m0} et M_{a0} correspondent aux valeurs de couple moyen et de masse d'aimant d'une machine de référence : $T_{m0} = 41,68 \text{ N}\cdot\text{m}$ et $M_{a0} = 134 \text{ g}$.

Les problèmes (P_1) et (P_2) sont alors résolus en utilisant la méthodologie développée à partir du même point de départ \mathbf{X}_0 . Les solutions optimales correspondantes sont notées $\tilde{\mathbf{X}}_1$ et $\tilde{\mathbf{X}}_2$. Ces trois configurations sont données par la Fig. 10. Les valeurs correspondantes sont fournies par le Tableau 1.

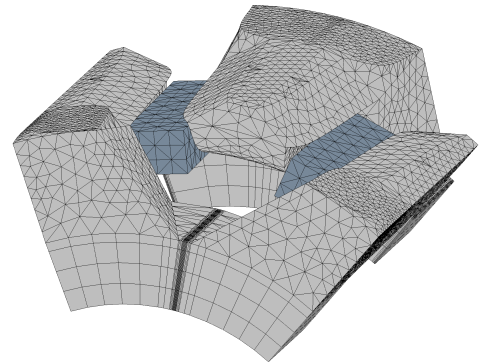
Tableau 1. Résultats obtenus sur les deux problèmes (P_1) et (P_2)

	$\tilde{\mathbf{X}}_1$	$\tilde{\mathbf{X}}_2$
Couple (en N·m)	47,7	41,7
Masse d'aimant (en g)	132,4	72,0
Nombre d'appels à la boîte noire	3529	1466

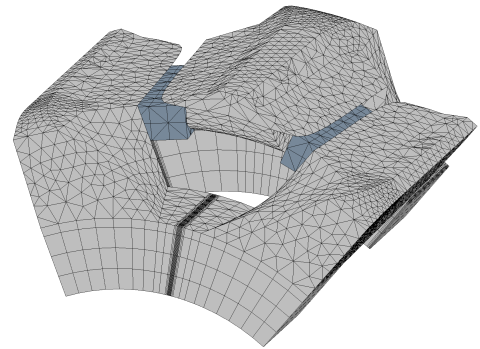
On constate que les résultats obtenus concordent tout à fait avec ce qu'on pouvait attendre. Les formes optimales de griffes sont sensiblement différentes et le problème (P_2) permet de fortement diminuer la masse d'aimant. Le nombre d'appels à la boîte noire (modèle hybride évalué sur 3 positions) pourrait paraître important mais en réalité il reste faible compte tenu du



Point de départ \mathbf{X}_0



$\tilde{\mathbf{X}}_1$ solution de (P_1)



$\tilde{\mathbf{X}}_2$ solution de (P_2)

Fig. 10. Point de départ et solutions optimales correspondant au cas industriel traité.

nombre de variables des deux problèmes. Ces résultats montrent clairement la pertinence de la méthodologie mise en place et permettent d'envisager la résolution de problèmes plus compliqués prenant en compte plus de contraintes. On pourrait penser, par exemple, à rajouter une contrainte sur les ondulations de couple.

5. CONCLUSIONS

Dans cet article, est présentée une approche originale basée sur un modèle hybride couplant fortement EF 3D et schéma de perméances associé à une recherche directe par treillis adaptatif. Le modèle hybride développé a été validé par un modèle éléments finis complet et par un banc expérimental. La méthodologie proposée permet de résoudre efficacement des problèmes de dimensionnement optimal compliqués tel que celui des griffes d'un alternateur. Les résultats obtenus montrent clairement l'intérêt de l'approche développée.

6. REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cet article ont été financés dans le cadre du projet «LOWCO2MOTION+» porté par l'entreprise Valeo, visant à améliorer l'efficacité des moteurs automobiles et contribuer à réduire leurs émissions en CO₂ (FUI - Investissement d'avenir / Pôles de compétitivité : i-Trans, Mov'eo, Pôle Véhicule du Futur).

Tous les résultats obtenus dans le cadre de ces travaux l'ont été en utilisant uniquement des logiciels libres. Les auteurs tiennent donc à remercier les développeurs de ses différents logiciels de les partager librement avec la communauté, et plus particulièrement :

- P. Dular et C. Geuzaine pour le logiciel GetDP [8];
- les membres du projet NOMAD pour le logiciel du même nom [10].

7. 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] P. Dular, P. Kuo-Peng, C. Geuzaine, N. Sadowski, et J.P.A. Bastos, «Dual magnetodynamic formulations and their source fields associated with massive and stranded inductors», *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 4, pp. 1293-1299, 2000.
- [5] P. Dular, J. Gyselinck, T. Henneron et F. Piriou, «Dual finite element formulations for lumped reluctances coupling», *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 5, pp. 1396-1399, 2005.
- [6] 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.
- [7] C. Geuzaine et 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.
- [8] P. Dular et C. Geuzaine, «GetDP reference manual : the documentation for GetDP, a general environment for the treatment of discrete problems», <http://getdp.info>.
- [9] G. Devornique, J. Fontchastagner, N. Takorabet et D. Netter, «Fast Computation of Nonlinear 3D FE Analysis for Electrical Machines», 10th International Symposium on Electric and Magnetic fields (EMF 2016), Lyon, France, Avril, 2016.
- [10] M. A. Abramson, C. Audet, G. Couture, J. E. Dennis Jr., S. Le Digabel, et C. Tribes, «The NOMAD project». <https://www.gerad.ca/nomad/>.
- [11] V. Béchar, C. Audet et S. Le Digabel, «Nonsmooth optimization through mesh adaptive direct search and variable neighborhood search», *Journal of Global Optimization*, vol. 41, no. 2, p. 299-318, 2008.
- [12] G. Devornique, J. Fontchastagner, D. Netter, et N. Takorabet, «Three dimensional pole shape optimization of claw pole machines based on a hybrid model», *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 57, no. S1, p. 73-81, 2018.