



**HAL**  
open science

## Association de différentes méthodes d'optimisation et de modèles de calcul du champ magnétique

Yvan Lefèvre, Frédéric Messine, Julien Fontchastagner, Xan T. A. Bui

### ► To cite this version:

Yvan Lefèvre, Frédéric Messine, Julien Fontchastagner, Xan T. A. Bui. Association de différentes méthodes d'optimisation et de modèles de calcul du champ magnétique. Journées de l'Électrotechnique du Futur (EF 2007), Sep 2007, Toulouse, France. hal-02945823

**HAL Id: hal-02945823**

**<https://hal.science/hal-02945823>**

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.



Conférence EF 2007  
ENSEEIH, Toulouse, 6-7 Septembre 2007

## ASSOCIATION DE DIFFERENTES METHODES OPTIMISATION ET DE MODELES DE CALCUL DU CHAMP MAGNETIQUE

Y. LEFEVRE<sup>1</sup>, F. MESSINE<sup>2</sup>, J. FONTCHASTAGNER<sup>1</sup>, X. T. A. BUI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LAPLACE, GREM3 group, INPT-CNRS UMR 5213

<sup>2</sup>IRIT, INPT-CNRS UMR 5505

ENSEEIH, 2, Rue Camichel, BP 7122, 31071 Toulouse

[Yvan.Lefevre@laplace.univ-tlse.fr](mailto:Yvan.Lefevre@laplace.univ-tlse.fr)

### Résumé

L'article rend compte de l'expérience des auteurs dans l'association de méthodes d'optimisation avec différents modèles utilisés dans une procédure de conception de moteur. Un éclairage supplémentaire est donné à partir des travaux publiés par d'autres chercheurs.

**Mots Clés.** Optimisation locale, optimisation globale, modèles analytiques, modèles numériques, conception, actionneurs électriques

### INTRODUCTION

La conception d'un actionneur électromécanique est une démarche de synthèse qui est initiée par l'existence d'un cahier des charges et qui s'appuie sur des modèles représentant à divers niveaux les phénomènes électromécaniques et thermiques au sein de l'actionneur. Dans cet article, nous allons d'abord examiner la définition d'un cahier des charges et le processus classique de conception d'un actionneur électromécanique.

L'utilisation des méthodes d'optimisation remet en cause d'une certaine manière cette vision classique de la conception d'un actionneur électromécanique réservée jusqu'à présent à des spécialistes. L'apport des méthodes d'optimisation, locales et globales, sera donc ensuite analysé.

Enfin, avec la montée vertigineuse de la puissance des ordinateurs, il est maintenant possible d'utiliser des codes de calculs numériques de type éléments finis de manière très intensive dans l'étude et la conception d'actionneurs électromécaniques. Ceci offre la possibilité de les associer avec les méthodes d'optimisation pour avoir des modèles efficaces et robustes. Nous allons donc analyser à partir de publications récentes les possibilités et les obstacles d'un tel projet dans sa généralité.

### CAHIER DES CHARGES

La démarche de conception d'un actionneur électromécanique est initiée par une demande formulée sous forme de spécifications dans un cahier des charges [1][2]. Les concepteurs se sont aperçus que pour bien y répondre il fallait retoucher au cahier des charges dans la plupart des cas. Certains concepteurs considéraient cette modification du cahier des charges, pour l'adapter au mieux aux possibilités d'un actionneur, comme faisant partie intégralement de la démarche de conception [3]. De là est née la prise de conscience de la nécessité d'une démarche plus globale pour mieux définir le cahier des charges d'un actionneur. Il s'agit de prendre en compte l'environnement immédiat de l'actionneur et de définir une méthode qui permet d'optimiser les performances du système ou du sous-système auquel appartient l'actionneur. Cette démarche doit être menée de concert par le concepteur du système et les spécialistes des différents composants. A notre sens, elle est source d'innovations à condition toutefois de ne pas définir a priori les différents composants à partir de composants prédéfinis ou déjà existants. Dans ce processus d'innovation, qui dépasse le sujet de notre article, on peut s'aider des classements des actionneurs réalisés par des spécialistes du domaine, soit à partir de considérations topologiques [5], soit à partir de considérations plus fondamentales s'appuyant sur la thermodynamique [4].

Une fois que l'architecture d'un système est définie, il faut procéder à sa conception, au choix des différents composants et à leurs dimensionnements. C'est à ce niveau que le cahier des charges de chaque composant peut-être défini par une démarche descendante et à l'aide de modèles. Le spécialiste du composant peut alors fournir au concepteur du système des modèles simplifiés spécifiques du composant pour optimiser les performances globales de l'ensemble. Selon le composant et les différents stades de la conception du système, ce modèle peut être très grossier,

représentant uniquement les échanges d'énergies ou de puissance, ou plus fins comme les modèles à constantes localisées.

## **PROCEDURE CLASSIQUE DE CONCEPTION D'UN ACTIONNEUR**

Compte-tenu de la diversité des domaines d'application, des efforts considérables ont été faits ces vingt dernières années pour développer les moteurs à aimants permanents. Le livre de J. R. Hendershot et TJE Miller [6] expose de manière détaillée les différentes étapes de la conception d'un moteur à aimants permanents. A partir de ce livre, on peut déterminer les différents types de modèles nécessaires dans une étape de conception.

### **Choix des types, des structures et des configurations d'actionneur**

Un cahiers des charges peut contenir jusqu'à 24 types de spécifications différentes allant des normes en vigueur jusqu'au niveau maximal de vibrations ou des types de protection souhaités en passant par la définition du type d'alimentation ou les caractéristiques de la charge mécanique. A ce stade, le concepteur fait appel à son expertise pour choisir les différents types et structures d'actionneur susceptibles d'y répondre. On peut ainsi définir pour un moteur à aimants permanents : la configuration du moteur, un entrefer radial ou axial, le type d'aimants, les nombres de phases, de pôles, le type d'alimentation : courants sinusoïdaux ou trapézoïdaux. Le bobinage peut aussi être défini à ce stade. Mais même un spécialiste ne peut pas connaître tous les bobinages possibles développés sur plus de 150 ans d'histoire de développement des actionneurs électriques [7].

### **Dimensionnement par des modèles analytiques**

Ensuite, le concepteur procède au dimensionnement de chaque structure de moteur choisi. Pour les moteurs à aimants permanents, ils existent différents modèles analytiques de dimensionnement, comme par exemple ceux proposés dans [6] et [8]. Dans la plupart des cas, le concepteur cherche un dimensionnement initial à partir de dimensions de moteurs existants dont les performances sont proches de son cahier des charges. On peut ainsi procéder au dimensionnement « à la main » en utilisant des valeurs typiques de grandeurs que les spécialistes connaissent [6] : le couple par unité de volume, la charge linéique et la densité efficace de courant suivant le type de refroidissement, l'induction magnétique moyenne dans l'entrefer, etc... Il existe aussi des logiciels qui sont de véritables aides à la conception des moteurs permettant de dimensionner un actionneur électromécanique de manière interactive. A partir d'un dimensionnement initial et par interaction successive avec le logiciel, le concepteur peut arriver à un dimensionnement qui répond au cahier des charges en un temps relativement court. Ce type de logiciels est basé sur des modèles simplifiés de dimensionnement et permet de calculer les formes d'ondes idéales de flux, de f.e.m. ou de couples statiques et de les présenter sous forme d'une sortie graphique permettant de les visualiser à tout moment ainsi qu'un dessin du moteur. Pour un moteur donné, le logiciel doit gérer jusqu'à 500 paramètres [6].

### **Caractérisation par des modèles numériques**

Cependant, les modèles utilisés dans l'étape de dimensionnement sont basés sur des hypothèses simplificatrices dont il est difficile de cerner le domaine de validité car ils dépendent de beaucoup de paramètres. Il faut alors procéder à l'étape de caractérisation du moteur dans lequel on utilise des modèles numériques de type éléments finis pour calculer les caractéristiques électromécaniques, magnétiques ou thermiques de l'actionneur. Les logiciels de calcul du champ électromagnétique adaptés pour les moteurs peuvent donner les courbes de flux, de f.e.m ou de couples statiques en fonction de la position du rotor [9][10]. Dans leur version originale, ces logiciels sont très lourds à manipuler car il faut procéder à un certain nombre d'étapes : dessin, maillage, résolution et exploitation des données. Des versions plus récentes de ces logiciels offrent des facilités permettant d'obtenir automatiquement le dessin de la structure, voire le maillage et le lancement automatique des calculs, à partir de la donnée des dimensions du moteur [11][12][13].

## **APPORT DES METHODES D'OPTIMISATION**

Les concepteurs de moteurs électriques ont utilisé dès les années 1970 des méthodes d'optimisation pour la conception optimale de moteurs électriques [14]. On peut classer les problèmes d'optimisation suivant la nature des variables qu'ils manipulent. On dit ainsi qu'un problème est continu si ses

variables sont des variables réelles. Il est discret quand elles sont toutes entières, booléennes ou de catégories. On dit qu'il est mixte si une partie des variables est continue et l'autre discrète. Ces variables sont reliées entre-elles par un modèle mathématique. Dans le cas des actionneurs électriques, les variables sont mixtes et le modèle peut-être analytique ou numérique. Les variables continues correspondent presque uniquement aux dimensions de l'actionneur. Les variables discrètes permettent quant à elles de caractériser le type, la structure, la configuration et la composition de l'actionneur. Les algorithmes d'optimisation pour la résolution de ces problèmes peuvent être classés en méthodes d'optimisation locale ou globale de type stochastiques ou déterministes [15]. Chaque type méthode peut être associé soit à des modèles analytiques, soit à des modèles numériques.

### **Méthodes locales d'optimisation et modèles analytiques**

Les méthodes locales d'optimisation ont été les premières à être utilisées pour dimensionner les actionneurs électromécaniques. Ces méthodes sont fondées sur les théories de la Programmation Non-Linéaire (PNL) pour la résolution de problèmes avec contraintes [16]. On peut citer par exemple la méthode du Lagrangien Augmenté appelée encore la Méthode des Multiplicateurs ou MOM (Methods of Multipliers) [17]. Ces méthodes ne traitent que des problèmes continus. Les variables entières apparaissant dans un modèle d'actionneur sont alors en général relâchées et traitées comme des variables réelles, elles sont ensuite arrondies à l'entier le plus proche à chaque itération ; cela occasionne des problèmes de convergence de l'algorithme. Ces variables entières peuvent aussi être imposées par le concepteur, ce qui laisse sous entendre qu'il y a autant de problèmes d'optimisation continus que de combinaisons possibles générées par les variables discrètes.

En général, les méthodes locales d'optimisation permettent de déterminer les variables continues optimales, i.e. les dimensions, quand les variables entières ou booléennes, i.e. le type, la structure, la configuration et la composition, sont fixées. Ces méthodes sont souvent associées à des modèles analytiques. Elles ne trouvent généralement qu'un optimum local à partir d'un dimensionnement initial. De plus, la convergence de la méthode locale choisie dépend fortement de ce point initial [18]. Il est donc conseillé de déterminer ce dernier soit à partir d'une procédure classique de conception décrite précédemment soit à partir d'un moteur existant dont les dimensions et les performances sont connues. A partir des méthodes développées dans [18], depuis environ 5 ans, un logiciel nommé Pro@Design entièrement dédié à la conception d'actionneurs électromécaniques en associant des modèles analytiques et des méthodes d'optimisation locales a été développé par une entreprise grenobloise.

Comme un modèle analytique nécessite des hypothèses simplificatrices, il faut alors valider le dimensionnement par un modèle numérique. Des chercheurs ont élaboré des environnements informatiques mettant à disposition du concepteur des méthodes locales d'optimisation, des modèles analytiques de dimensionnement et des modèles numériques de caractérisation ou de validation. Ces environnements facilitent le passage d'une étape à l'autre du processus de conception et la possibilité d'itérer le processus plusieurs fois [19][20][21].

### **Méthodes locales d'optimisation et modèles numériques**

Certains chercheurs ont, dès les années 1990, associés ces méthodes d'optimisation locales à des modèles numériques de type différences finies ou éléments finis [22][23]. A partir du concept de laboratoire numérique de Muller, ancêtre des environnements informatiques dédiés à la conception d'actionneur, Russenschuck a utilisé les méthodes de la PNL associées à un modèle numérique en différences finies pour optimiser un moteur à aimants permanents [24]. Suivant les algorithmes employés l'optimisation a nécessité entre 50 et 120 calculs par différences finies. Ce type d'évaluations demandait beaucoup de temps à l'époque. Actuellement avec les capacités de calculs d'un ordinateur personnel cela demande beaucoup moins de temps.

Certaines des méthodes de la PNL sont disponibles dans le logiciel ANSYS® Academic Research. Nous avons utilisé ce logiciel pour optimiser un coupleur magnétique à aimants permanents. Les figures (Fig 1) et (Fig. 2) montrent le maillage du domaine d'étude du coupleur et le champ magnétique dans la structure initiale. Dans ce logiciel, l'association des modèles par éléments finis et des méthodes d'optimisation est facilitée par l'utilisation d'un langage de programmation APDL (Ansys Programming Design Language). Cinq variables de dimensionnement ont été définies. Le volume total d'aimants a été optimisé pour avoir un couple de 110 N.m. Le couple a été défini comme une contrainte inégalité valant entre 100 N.m et 120 N.m. Le logiciel calcule alors plusieurs « solutions ». Une solution est faisable quand elle satisfait toute les contraintes. La meilleure solution est une solution faisable et qui a le plus petit volume d'aimant. Plusieurs tests avec ce logiciel ont montré que

la meilleure méthode pour ce problème est la méthode d'approximations par sous-problèmes [25]. Cette méthode d'optimisation est une méthode d'ordre zéro avancée car elle utilise seulement les valeurs des variables dépendantes définissant la fonction objective et les contraintes et non leurs dérivées. Ces variables sont remplacées par des approximations quadratiques déterminées par la méthode des moindres carrés et à partir d'un certain nombre d'échantillons, fourni par l'utilisateur, de coupleurs virtuels définis par 5 variables de dimensionnement. Si elles ne sont pas fournies, la méthode elle-même les générera aléatoirement. Le problème d'optimisation est alors traduit en un problème sans contrainte en utilisant des fonctions de pénalités. La minimisation est alors exécutée sur la fonction approximée et pénalisée (appelée le « sous-problème ») jusqu'à ce qu'il y ait convergence. Le logiciel a effectué 27 calculs et a fourni 7 solutions faisables. Les figures (Fig. 3) et (Fig. 4) montrent la convergence de la fonction objective à minimiser et la contrainte de couple ( $\text{abs}(\text{Cref} - C) < 0,1 \text{ Cref}$ ) en 27 itérations. Cette méthode est sensible au choix de la solution initiale. En changeant de 10% les variables de la solution initiale, certains variables varient jusqu'à 20% [25].

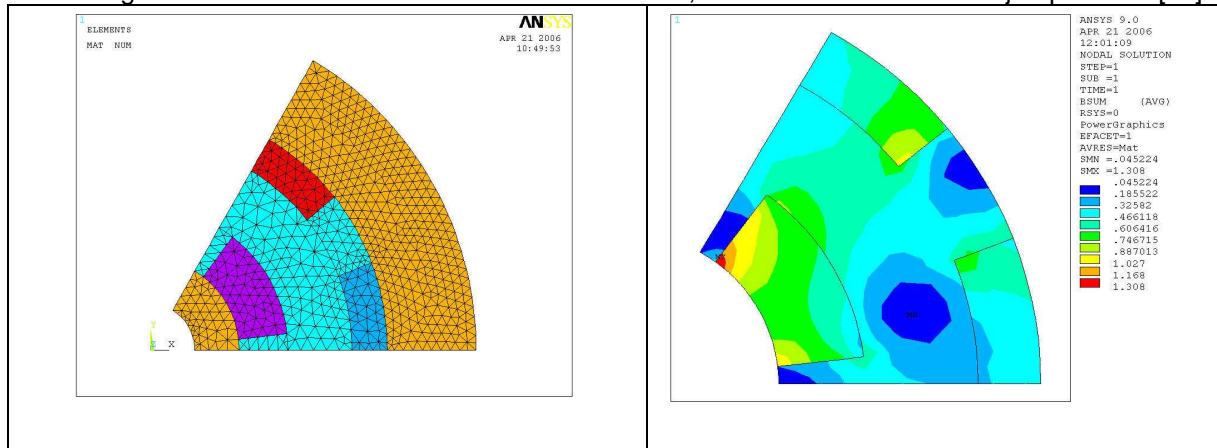


Fig. 1 : Maillage d'un pôle du coupleur

Fig. 2 : Répartition du champ magnétique (B)

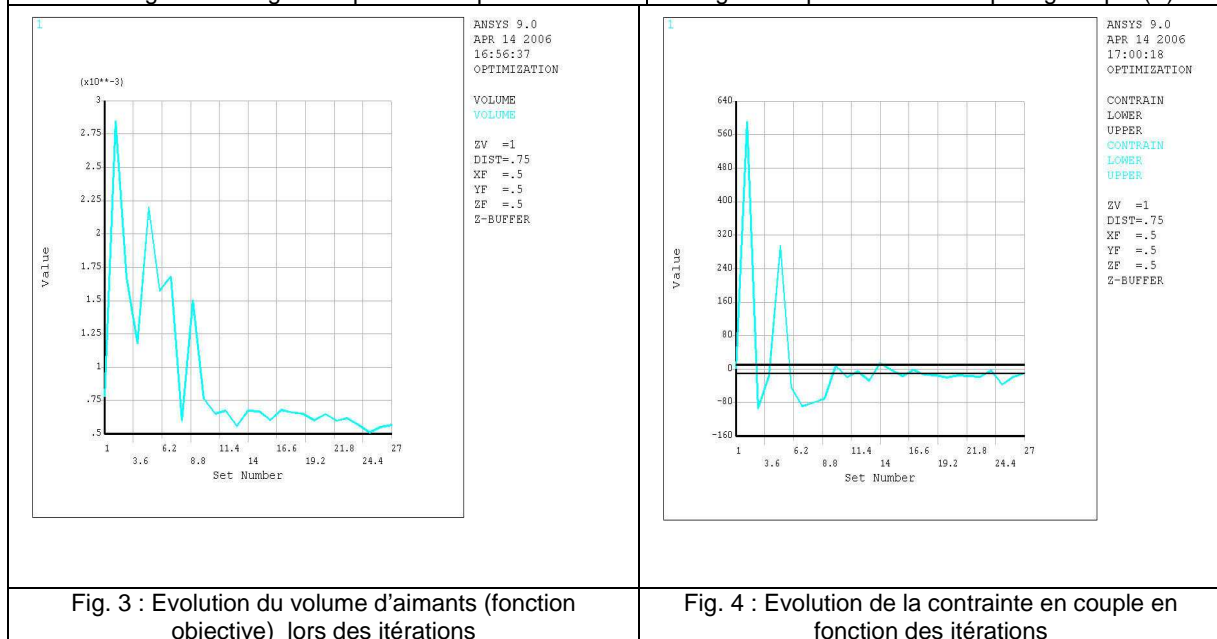


Fig. 3 : Evolution du volume d'aimants (fonction objective) lors des itérations

Fig. 4 : Evolution de la contrainte en couple en fonction des itérations

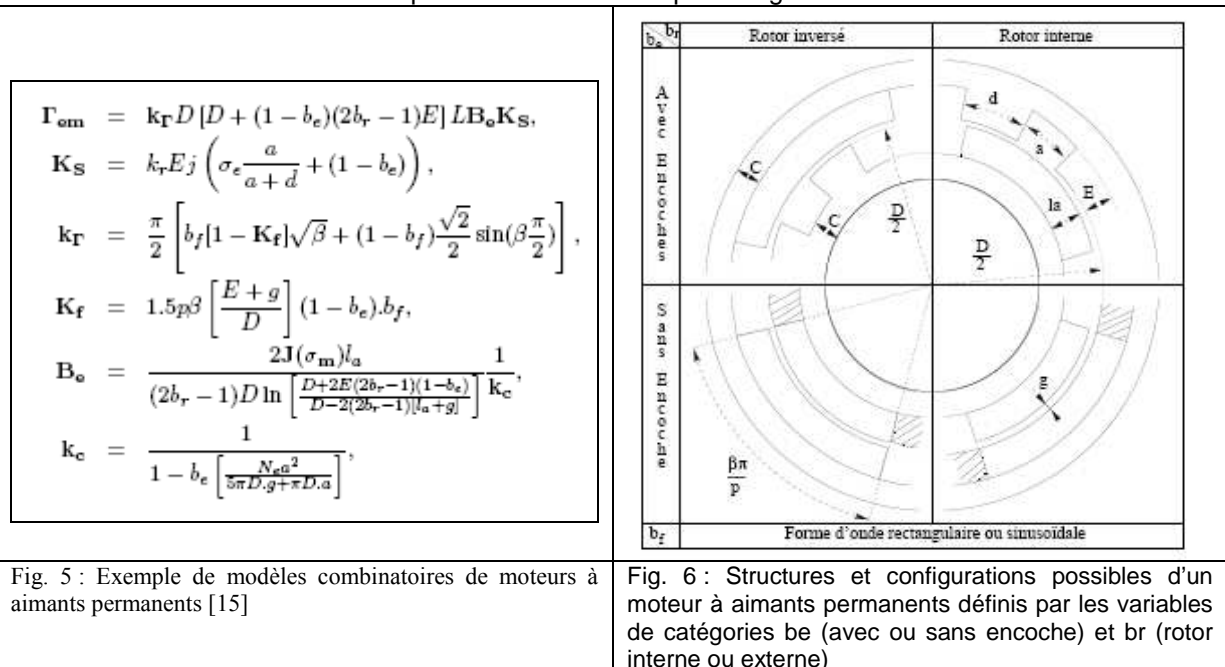
### Méthodes d'optimisation globale et modèles analytiques

L'application de méthodes d'optimisation globale dans le domaine de l'ingénierie s'est développée considérablement ces 20 dernières années avec la croissance de la puissance intrinsèque des ordinateurs. Ces méthodes ont pour ambition de s'approcher au mieux de l'optimum absolu.

Dans les méthodes d'optimisation globales, on peut trouver des méthodes méta-heuristiques. Ces méthodes s'appuient sur des règles heuristiques générales pour éviter ou sortir des optima locaux. On peut citer par exemple la méthode Taboo de F. Glover aussi co-découverte par P. Hansen [15]. Les méthodes stochastiques sont aussi classées dans les méthodes d'optimisation globale. Elles sont basées sur la génération aléatoire de points dans le domaine de recherche. Ces techniques diffèrent

par la manière d'élaborer la génération suivante de points. Les méthodes de recuit simulé prennent pour heuristique un principe thermodynamique, les algorithmes génétiques, les lois de la biologie cellulaire. En conception des actionneurs électriques les algorithmes génétiques sont très utilisés quand ils s'agit d'évaluer certaines contraintes par un modèle éléments finis [26][27]. Ces deux classes de méthodes améliorent de manière considérable les solutions optimales trouvées par les méthodes locales, mais ils n'offrent aucune garantie quant au caractère global des solutions ainsi trouvées. Dans [28], Hajji compare le comportement, des méthodes d'optimisation locales et des méthodes stochastiques pour l'optimisation d'un moteur à aimants permanents.

Dans la troisième classe de méthodes d'optimisation globale, on trouve les méthodes dites exactes, ou déterministes globales. Les algorithmes de ces méthodes ne s'arrêtent que lorsque la preuve de la globalité de la solution est apportée. Leurs principes sont généralement basés sur des techniques de décomposition du domaine de recherche initial en pavés de plus en plus petits en excluant au fil des itérations les pavés dont on est sûr qu'il ne contient pas la solution globale. Ces algorithmes sont de type séparation-évaluation (Branch and Bound). Un algorithme de ce type, IBBA pour Interval Branch and Bound Algorithm, a été utilisé pour optimiser un moteur précédemment dimensionné à l'aide de méthodes d'optimisation locales [17]. Les résultats sont reportés dans [15][29]. Toutes les solutions sont de 5% à 10% meilleures que dans [17]. L'avantage de cette méthode est qu'elle est capable de trouver l'optimum global d'un problème donné. Ce qui est d'un grand intérêt pour le concepteur : même si ce n'est pas la solution finale adoptée pour des raisons économiques ou technologiques au moins il saura si sa solution est « proche ou non » de l'optimum global.



L'un des intérêts des méthodes d'optimisation globale en général est la possibilité de résoudre un problème mixte. Ceci est très intéressant car au lieu de chercher l'optimum global uniquement pour un type, une structure, une configuration et une composition donnés de moteurs, on le cherche sur une famille entière d'actionneur. Pour prendre en compte une famille de moteur à aimants permanents, on peut définir un certain nombre de variables de catégories : de type entier comme le nombre de pôles, le nombre de dents ; le type de configuration (0 : rotor interne, 1 rotor externe). Ainsi avec 5 variables discrètes qui prennent des valeurs binaires ou de catégories, on a une famille composée de 32 machines distinctes. Il est possible de prendre en compte tous ces moteurs en développant des modèles combinatoires [30]. La figure (Fig.5) montre un exemple de ce type de modèle :

Dans les expressions de la figure 5 on reconnaît par exemple le couple  $\Gamma_{em}$  et l'induction moyenne dans l'entrefer  $B_e$  exprimés en fonction : -de variables réelles comme le diamètre d'alésage  $D$ , la longueur du moteur  $L$ , -de variables booléennes telles que :  $b_r$  qui vaut lorsque le rotor est interne et 0 dans le cas contraire,  $b_e$  qui vaut 1 pour un moteur avec encoches et 0 sinon et  $b_f$  qui vaut quand les courants sont de formes rectangulaires et 0, si sinusoidales, -de variables de catégories telle que  $\sigma_m$  qui correspond au numéro du matériau magnétique utilisé pour l'aimant, et -de variables entières comme  $N_e$  pour le nombre d'encoches. Quelques cas de machines possibles sont représentés sur la figure (Fig. 6).

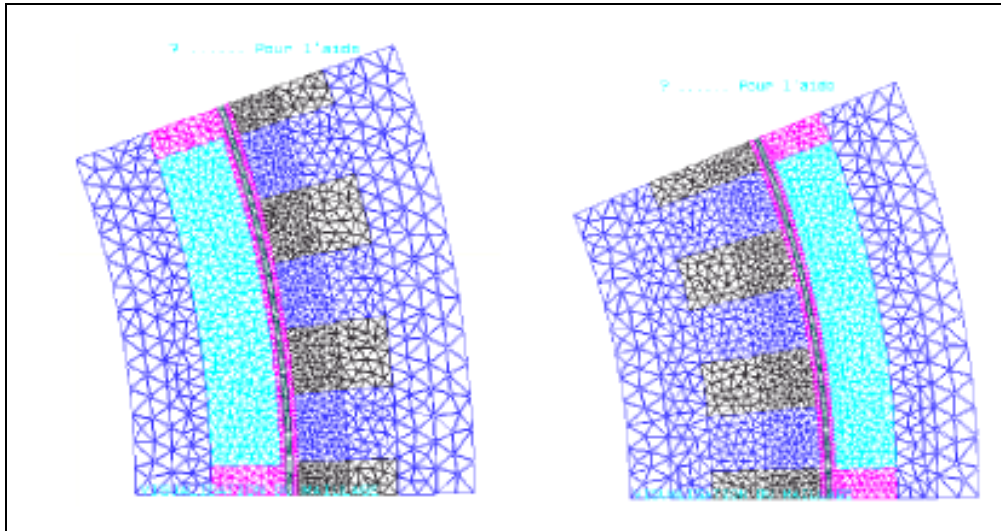


Fig. 7 : Maillages des solutions optimales obtenues par IBBA à gauche solution minimisant la masse (rotor intérieur) et à droite solution multicritères (rotor extérieur)

Dans [15], on peut voir tout le travail d'adaptation du logiciel d'optimisation IBBA, créé initialement pour traiter un modèle analytique classique de dimensionnement d'un moteur électrique, à la prise en compte des variables entières et de catégories. Dans [30] et [31], sont rapportés les résultats complets de conception de moteurs à aimants permanents à l'aide de cette méthodologie.

Toutefois, les solutions trouvées par ce logiciel nécessitent toujours une étape de validation et de caractérisation par des modèles numériques. Pour faciliter cette étape de validation, un logiciel permettant, à partir des solutions optimales trouvées par IBBA, de calculer automatiquement par éléments finis certaines caractéristiques magnétiques comme les flux ou le couple moyen, a été élaboré. Les figures (Fig. 7) et (Fig.8) présentent les dessins et les maillages des solutions optimales obtenues avec IBBA pour deux critères différents. Les évaluations avec la méthode des éléments finis des solutions obtenues montre le modèle analytique combinatoire utilisé est assez précis. Les écarts constatés sont de l'ordre de 10%, [11].

### Méthodes d'optimisation globale et modèles numériques

En génie électrique, les algorithmes génétiques ont été d'abord utilisés pour faire de l'optimisation de forme [32]. Dans [33], les principes d'élaboration d'un environnement informatique pour associer les méthodes d'optimisations avec des modèles numériques en utilisant les concepts de la Programmation Orientée Objet sont posés. Une évaluation directe des contraintes par un modèle numérique dans le processus d'optimisation coûte trop de temps.

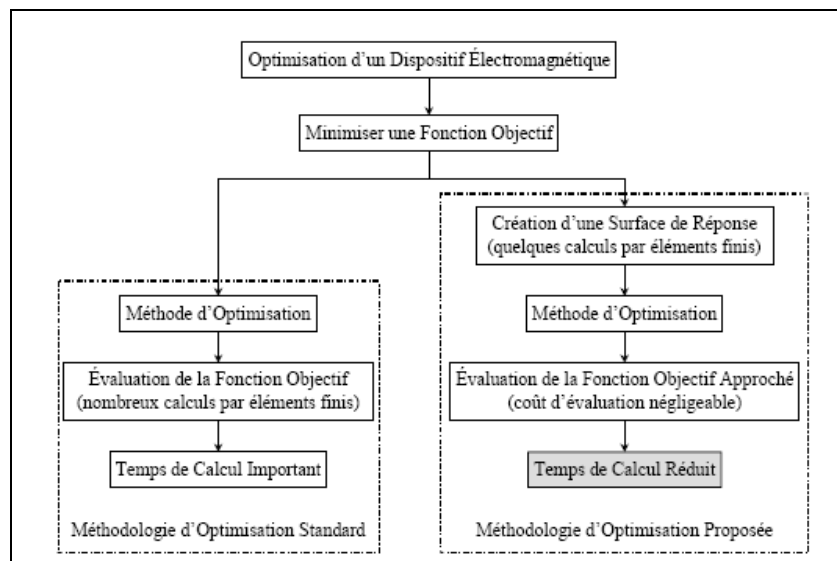


Fig. 8 : Optimisation à partir d'une surface de réponse [33]

On utilise alors les modèles numériques dans une étape préliminaire pour construire une Surface de Réponse. Ce qui revient un peu à la méthode d'approximations par sous problème utilisée par le logiciel Ansys ou à la méthode des plans d'Expérience [34]. La figure (Fig.8) montre cette approche. Cette méthode indirecte est aussi utilisable avec la méthode d'optimisation globale IBBA décrite précédemment. Cependant, on peut aussi utiliser conjointement dans un même processus d'optimisation les modèles analytiques avec les modèles numériques. Pour un actionneur à aimants permanents, on peut évaluer le couple et les flux du moteur par un modèle analytique pendant la recherche de la solution. Mais quand la valeur fournie par le modèle analytique est à 10% du couple recherché, on fait une évaluation par un code par éléments finis [35]. La comparaison entre l'algorithme IBBA original et celui ainsi modifié (IBBA+NUMT) est reportée sur le tableau 1. Pour le problème de la minimisation du volume, on trouve un volume plus faible avec IBBA mais le couple évalué numériquement est inférieur au couple de la solution fournie par l'algorithme modifié. On peut faire le même constat pour le problème de la minimisation de la masse ou le problème multicritère [35]. On constate cependant un accroissement considérable du temps de calcul mais qui reste très raisonnable même dans un contexte industriel.

| Name                   | Parameters Bounds | Unit  | Min $V_g$             |                       | Min $M_a$             |                        | Min $M_{ulti}$        |                       |
|------------------------|-------------------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                        |                   |       | IBBA                  | IBBA+NUMT             | IBBA                  | IBBA+NUMT              | IBBA                  | IBBA+NUMT             |
| $D$                    | [0.01, 0.3]       | m     | 0.1331                | 0.1310                | 0.1400                | 0.1400                 | 0.1400                | 0.1310                |
| $L$                    | [0.01, 0.3]       | m     | 0.0474                | 0.0497                | 0.0496                | 0.0519                 | 0.0451                | 0.0497                |
| $l_a$                  | [0.003, 0.01]     | m     | 0.0047                | 0.0047                | 0.0039                | 0.0039                 | 0.0039                | 0.0047                |
| $E$                    | [0.005, 0.03]     | m     | 0.0074                | 0.0074                | 0.0074                | 0.0075                 | 0.0074                | 0.0073                |
| $C$                    | [0.003, 0.02]     | m     | 0.0049                | 0.0049                | 0.0039                | 0.0039                 | 0.0050                | 0.0049                |
| $\beta$                | [0.7, 0.9]        |       | 0.89                  | 0.89                  | 0.74                  | 0.71                   | 0.89                  | 0.89                  |
| $k_d$                  | [0.4, 0.6]        |       | 0.5043                | 0.5043                | 0.4978                | 0.5022                 | 0.5043                | 0.4957                |
| $p$                    | [3, 10]           |       | 8                     | 8                     | 8                     | 8                      | 8                     | 8                     |
| $m$                    | {1, 2}            |       | 1                     | 1                     | 1                     | 1                      | 1                     | 1                     |
| $b_r$                  | {0, 1}            |       | 0                     | 0                     | 0                     | 0                      | 0                     | 0                     |
| Volume                 |                   | $m^3$ | $8.881 \cdot 10^{-4}$ | $9.072 \cdot 10^{-4}$ | $9.716 \cdot 10^{-4}$ | $10.157 \cdot 10^{-4}$ | $9.067 \cdot 10^{-4}$ | $9.072 \cdot 10^{-4}$ |
| Mass                   |                   | $kg$  | 3.21                  | 3.31                  | 2.94                  | 3.07                   | 3.10                  | 3.30                  |
| Multi                  |                   |       | 2.09                  | 2.15                  | 2.10                  | 2.19                   | 2.07                  | 2.14                  |
| Analytical Torque      |                   | N.m   | 9.81                  | 10.00                 | 9.82                  | 10.21                  | 9.88                  | 9.93                  |
| Numerical Torque       |                   | N.m   | 9.35                  | 9.96                  | 9.26                  | 9.86                   | 9.06                  | 9.96                  |
| CPU - Time             |                   | min   | 0'35                  | 7'15                  | 1'14                  | 8'17                   | 1'03                  | 7'37                  |
| Numerical Computations |                   |       | -                     | 437                   | -                     | 560                    | -                     | 526                   |

Tab 1 : Comparaison entre les méthodes IBBA et IBBA+NUMT pour l'optimisation d'un moteur à aimants permanents suivant trois critères différents

## CONCLUSION

Un effort important a été fait par la communauté électrotechnique sur la mise au point de modèles analytiques de dimensionnement et des modèles numériques ainsi que des passerelles basées sur des méthodes d'identification pour déduire les premières des secondes. Plusieurs chercheurs en électrotechnique ont beaucoup investi non seulement dans les méthodes d'optimisation, d'analyses numériques mais aussi dans les outils informatiques tels que la Programmation Orientée Objet pour offrir au concepteur des facilités lui permettant en un temps de plus en plus réduit de concevoir les actionneurs les plus performants pour une application donnée. Cependant, il reste de réelles difficultés pour automatiser la conception d'un actionneur électrique. Même pour des actionneurs très connues et en apparence peu complexes comme par exemple les moteurs à aimants permanents : prise en compte de manière exhaustive des bobinages possibles, des pertes par hystérésis et par courants de Foucault... La possibilité d'accéder à l'optimum global de manière sûr et robuste est l'un des principaux challenges de l'électrotechnique du futur.

## REFERENCES

- [1] NOGAREDE B., Conception des dispositifs électroactifs : de la recherche du concept au dimensionnement de la structure, Habilitation à Diriger des Recherches, INP Toulouse, 1997.
- [2] KONE A D, Contribution à la conception des actionneurs électriques par formulation en termes d'optimisation, Thèse de Doctorat INP Toulouse, 1993
- [3] NOGAREDE B., Machines tournantes : principes et constitution, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Electrique, D3411
- [4] NOGAREDE B., L'Electrodynamique Appliquée, Editions Dunod, Collection Sciences Sup, 2005
- [5] CAVAREC P-E, BEN AHMED H., MULTON B., Actionneurs électromagnétiques: Classification topologique, Techniques de l'Ingénieur, D3412
- [6] HENDERSHOT J. R., MILLER TJE, Design of brushless permanent-magnet motors, Magna Physics Publishing, Oxford, 1996



- [7] SAINT-MICHEL J, Bobinage des machines tournantes à courant alternative, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie Electrique, D 3420
- [8] LIU X, SLEMON GR, Modeling and design optimization of permanent magnet motors, Electric Machines and Power Systems, pp 131-164, 1992
- [9] SADOWSKI N, Modélisation des machines électriques à partir de la resolution des equations du champ en tenant compte du mouvement et du circuit d'alimentation (Logiciel Efcad], Thèse de Doctorat de l'INP Toulouse, 1993
- [10] SADOWSKI N, LEFEVRE Y, LAJOIE-MAZENC M, CROS J, Finite element torque calculation in electrical machine while considering the movement, , IEEE Transactions on Magnetics, vol 28, n<sup>2</sup>, March 1992, pp 14 10-1413
- [11] LEFEVRE Y, FONTCHASTAGNER Y, MESSINE F, Building a CAD System For Educational Purpose Based Only on a Mesh Tool and Finite Element Solver, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, n<sup>4</sup>, April 2006 pp 1483-1486
- [12] LACOMBE G, FOGGIA A, MARECHAL Y, BRUNOTTE X, WENDING P, From General Finite Element Simulation Software to Engineering-Focused Software: Example of Brushless Permanent Magnet Motors Design, IEEE Transactions on Magnetics, vol 43, Issue 4, April 2007, pp 1657-1660
- [13] GRIFFITHS D R, SYKULSKI JK, Automation of finite-element aided design of induction motors using multi-slice 2D models, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 25, n<sup>2</sup>, 2006, pp 309-319
- [14] RAMARATHNAM R et al., A Comparative Study of Minimization Techniques for Optimization of Induction Motor Design, IEEE Trans. PAS-92, 1973, n<sup>5</sup>, pp 1448-1 453
- [15] MESSINE F, L'Optimisation Globale par Intervalles: de l'Etude Théorique aux Applications, Habilitation à Diriger des Recherche, INP Toulouse, 2006
- [16] LIU X, SLEMON G.R., An improved Method or Optimization for Electrical Machines, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 6, n<sup>3</sup>, September 1991, pp 492-496
- [17] KONE A D, NOGAREDE B, LAJOIE-MAZENC M, Le dimensionnement des actionneurs électriques: problème de programmation non linéaire, Journal de Physique III, France, 3, 1993, pp 285-301
- [18] WURTZ F, BIGEON J, A Methodology and a Tool for the Computer Aided Design with Constraints of Electrical Devices, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, n<sup>3</sup>, May, 1996
- [19] WURTZ F et al, Methodological Guidelines for the use of Analytical and Numerical in a Design Process of an Electromagnetic Device, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 34, n<sup>5</sup>, September 1998
- [20] COLYER B et al, Project MIDAS: Magnet Integrated Design and Analysis System, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, n<sup>2</sup>, March 1997
- [21] BIDDLECOMBE et al, Design Environment Modules for Non-Specialist Users of EM Software, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, n<sup>5</sup>, September 1994
- [22] SCHAFER-JOTER M, MULLER W, Optimization of Electrotechnical Devices Using a Numerical Laboratory, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, n<sup>2</sup>, March 1990
- [23] WATTERSON et al, Optimisation of Permanent Magnet Motors Using Field Calculations of Increasing Precision, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 28, n<sup>2</sup>, March 1992
- [24] RUSSENSCHUCK S, Mathematical Optimization Techniques for the Design of Permanent Magnet Synchronous Machines Based on Numerical Field Calculation, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, n<sup>2</sup>, March 1990
- [25] BUI X. T. A, Optimisation d'actionneurs électriques à l'aide dun modèle numérique sous le logiciel ANSYS Multi-Physics, Rapport de Stage de Master Recherche, Université Paul Sabatier et INP Toulouse, Année 2005-2006
- [26] WURTZ F at al, A Few Results for using Genetic Algorithms in the Design of Electrical Machines, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, n<sup>2</sup>, March 1997
- [27] HAJJI O, BRISSET S, BROCHET P, A New Tabu Search Method for Optimization With Continuous Parameters, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 40, n<sup>2</sup>, March 2004
- [28] HAJJI OE et al, Comparaison des méthodes stochastiques et déterministes pour l'optimisation des dispositifs électrotechniques, EF'2003, Electrotechnique du Futur, 9 et 10 Décembre 2003, Paris
- [29] MESSINE F, NOGAREDE B, LAGOUANNELLE JL, Optimal Design of Electromechanical Actuators: A New Method Based on Global Optimization, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 31, n<sup>1</sup>, January 1998, pp 299-30 8
- [30] FITAN E, MESSINE F, NOGAREDE B, A general analytical model of electrical permanent magnet machine dedicated to optimal design, COMPEL, vol. 22, n<sup>4</sup>, 20 03, pp 1037-1050
- [31] FITAN E, MESSINE F, NOGAREDE B, The Electromagnetic Actuator Design Problem: A General and Rational Approach, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 40, n<sup>3</sup>, May 2005, pp 1579-1590
- [32] ULER G F et al, Utilizing Genetic Algorithms for the Optimal Design of Electromagnetic Devices, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, n<sup>6</sup>, November 1 994, pp 4296-4298
- [33] CALDORA COSTA M, Optimisation de dispositifs électromagnétiques dans un contexte d'analyse par la méthode des éléments finis, Thèse de Doctorat de l'INP Grenoble, 2001
- [34] VIVIER S, GILLON F, BROCHET P, Optimization Techniques Derived from Experimental Design Method and Their Application to the Design of a Brushless Direct Current Motor, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 37, n<sup>5</sup>, September 2001, pp 3622-3626
- [35] FONTCHASTAGNER J, MESSINE, LEFEVRE Y, A New Rational Way Combining Analytical and Numerical Models with a Deterministic Global Optimization Algorithm for the Design of Electrical Rotating Machines, ICEM 2006, 12ème International Conference on Electrical Machine, 2-5 September 2006, Chania, Crete Island, 6 pages