



HAL
open science

Etude d'une machine discoïde à bobinage sur dents et aimants permanents

Edouard Bommé, Albert Foggia

► **To cite this version:**

Edouard Bommé, Albert Foggia. Etude d'une machine discoïde à bobinage sur dents et aimants permanents. Electrotechnique du Futur 2009, Sep 2009, Compiègne, France. hal-00424480

HAL Id: hal-00424480

<https://hal.science/hal-00424480>

Submitted on 16 Oct 2009

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.

ETUDE D'UNE MACHINE DISCOÏDE A BOBINAGE SUR DENTS ET AIMANTS ENTERRES

BOMMÉ Édouard, FOGGLIA Albert.

G2ELab – UMR 5529 INPG/UJF-CNRS, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France.

Edouard.Bomme@g2elab.grenoble-inp.fr

Résumé

Depuis une vingtaine d'années, la machine à flux axial fait l'objet de nombreuses études. Dans cet article, la machine discoïde est innovante car elle allie bobinage sur dents et aimants enterrés. Pour évaluer les performances de ce nouveau concept discoïde, une analyse numérique comprenant une étude numérique par modèle en 3 dimensions par éléments finis et une optimisation tridimensionnelle est proposée. Cette étude permet de déterminer les caractéristiques électriques, magnétiques et les performances en termes de couple électromagnétique.

Mots Clés. Discoïde, aimants permanents, bobinage sur dents, optimisation.

I. LA MACHINE DISCOÏDE

I.1 Présentation générale

Ces dernières années ont vu l'émergence dans le domaine des machines électriques de nouvelles structures appelées machines discoïdes [1] [2]. Un grand nombre de structures est apparu allant de la multiplication des entrefers à l'utilisation du bobinage sur dents [3]. Dans cet article, nous nous proposons d'étudier une machine discoïde avec 2 rotors munis d'aimants enterrés et d'un bobinage sur dents pour l'excitation statorique (Figure 1).

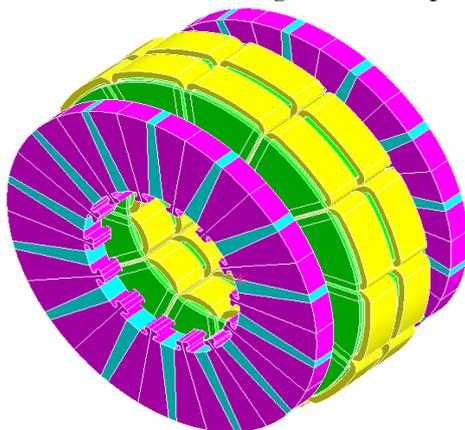


Figure 1. Vue Générale de la machine discoïde

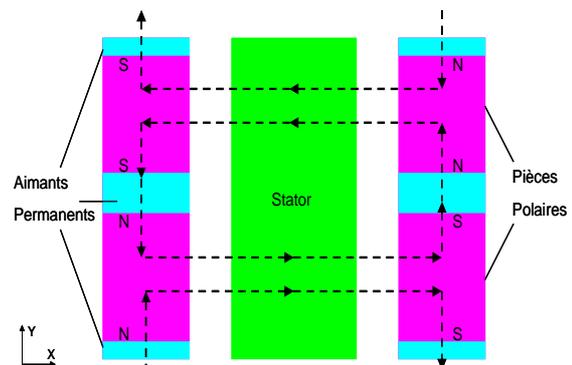


Figure 2. Directions des flux de la machine

Le fonctionnement global de la machine est décrit par le schéma de la Figure.2. Ce schéma représente le chemin du flux se situant sur le diamètre moyen de la machine. Ce type de machine axiale peut être considéré comme une machine Torus NS. Elle est constituée d'un stator et de

deux rotors. Grâce à cette configuration, les aimants permanents sont utilisés en concentration de flux et le flux ne fait que traverser la culasse du stator. Ainsi, la culasse du stator et les pertes fer sont diminuées. De plus, le choix d'un bobinage sur dents est motivé par un gain conséquent en place mais surtout d'une diminution significative des pertes Joule.

Cette machine est composée de 12 dents, 14 pôles pour un rayon extérieur de 100 mm et une longueur globale inférieure au décimètre. La forme et l'orientation des pièces polaires et des dents du stator ne permettent pas d'utiliser de tôle feuilletée apparaissant complexe et onéreux, la poudre de fer est le matériau de base du concept électromagnétique.

I.2 Matériaux et assemblage :

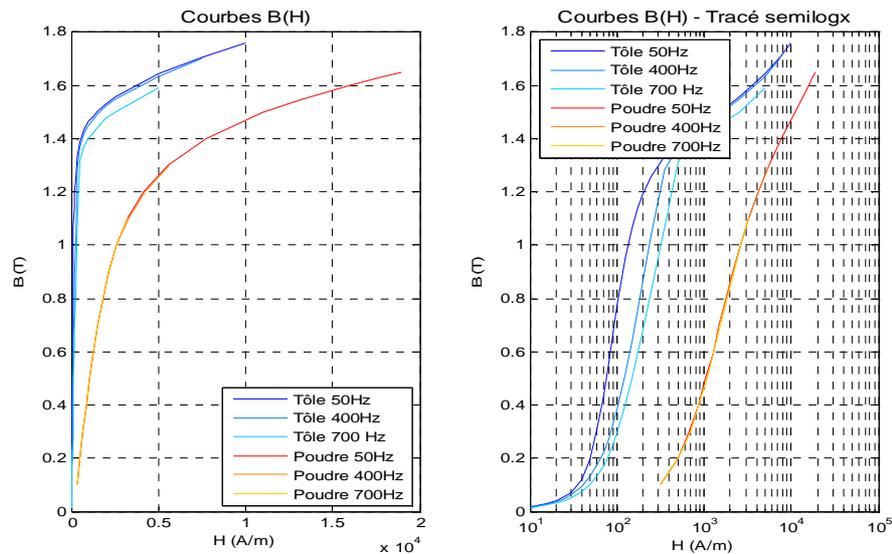


Figure 3. Comparaisons des caractéristiques physiques entre tôles et poudre de fer à différentes fréquences.

La poudre de fer est un matériau qui reste rarement utilisé dans le domaine industriel. Son principal avantage est qu'elle soit constituée de grains permettant de réaliser n'importe quelle forme sans devoir orienter le matériau. Cet avantage trouve donc sa place pour cette application puisque les formes des différentes pièces ne sont pas conventionnelles. C'est pourquoi l'utilisation de poudre de fer s'est naturellement imposé pour ce type de machine discoïde où avec de la tôle il faudrait de nombreuses pièces différentes pour concevoir les dents et les pièces polaires.

Toutefois, ses performances sont limitées par rapport à une tôle conventionnelle. Des essais ont donc été menés pour évaluer les performances et les caractéristiques de ce nouveau matériau. Ces essais expérimentaux ont été réalisés il y a quelques années par le G2Elab sur un échantillon de poudre de fer de l'entreprise suédoise HÖGANÄS référencée Somaloy 500 + 0,5% Kenolube compacté à 800 MPa. Cet échantillon torique a ainsi été placé sur un banc automatique pouvant caractériser des échantillons de type Epstein. Le banc permet entre autre de réaliser des mesures en contrôlant l'amplitude et la forme de l'induction ou du champ magnétique pour des fréquences de quelques hertz à quelques kilohertz.

Les résultats obtenus ont permis de tracer les courbes $B(H)$ en régime continu pour des fréquences de 50, 400 et 700 Hz sous une induction sinusoïdale (Figure 3). En comparaison, les courbes $B(H)$ en régime continu caractérisant les tôles conventionnelles sont représentées sur ce même graphique. On peut remarquer un avantage important de la poudre de fer qui est de conserver la même caractéristique $B(H)$ pour des fréquences différentes. Cela n'étant pas le cas

avec des tôles magnétiques classiques. On constate ainsi que les performances sont nettement différentes entre la tôle et la poudre de fer. Effectivement, à induction identique, la consommation d'ampère-tour est nettement plus importante avec la poudre de fer qu'avec la tôle. Pour la configuration de la machine choisie, la poudre de fer n'est pas trop pénalisante puisque le nombre de pôles est important (14 pôles, la fréquence sera alors élevée).

Mécaniquement et à la vue des figures précédentes décrivant la machine d'étude, l'assemblage des différentes parties de la machine et notamment le stator doit faire l'objet d'une réflexion. Pour le rotor, la forme particulière des pièces polaires, elles-mêmes solidaires d'un moyeu en matériau amagnétique par un système de queue d'aronde, permet le blocage des aimants par centrifugation pour une meilleure tenue mécanique à haute vitesse et supprimer collage et frottement. Pour le stator, deux solutions concevables s'offrent à nous. La première solution consiste à placer dans un moule d'outillage les différentes dents. Une fois placée, une résine de type Epoxy (conductivité thermique meilleure que l'air) est coulée autour des dents. Cette méthode est simple à appliquer et n'ajoute pas de nouvelles pièces. La seconde solution consiste à loger dans des flasques de fibre de verre les dents du stator. Les flasques sont ensuite réunis de façon à avoir une enveloppe étanche dans laquelle dents et refroidissement liquide sont présents. Malheureusement, cette méthode augmente l'entrefer mécanique de la machine et impose l'ajout de nouvelles pièces. Ces deux méthodes d'assemblage du stator sont ici à titre d'information et montrent qu'il est envisageable de concevoir ce genre de stator. Le modèle numérique 3D par éléments finis ne sera pas impacté par le choix final de l'assemblage de la machine.

II. MODELISATION 3D PAR ELEMENTS FINIS

II.1 Présentation

Pour évaluer les performances de cette nouvelle machine, un des moyens les plus fiables est de modéliser ce moteur discoïde numériquement. En effet, la présence du bobinage sur dents complique le modèle analytique.

Les premiers résultats des simulations en 3 Dimensions par éléments finis ont été obtenus grâce à une application Magnéto Transitoire à l'aide du logiciel FLUX.

Grâce à la présence d'une symétrie (par rapport au plan XY) et de périodicités anticycliques (autour de l'axe Z), seul un quart de la machine est traité. Ainsi, le temps de calculs et de résolution est fortement réduit.

Au vue des formes très opposées (mince pour les dents, imposantes pour les pièces polaires) des différentes pièces du problème, un maillage local et personnalisé a été réalisé. Ainsi, toutes les parties du problème ont une influence cohérente les unes des autres.

Le bobinage est réalisé grâce à des bobines non maillées parcourues par un courant sinusoïdal dont la valeur crête est de 67.5 A. Les pièces polaires et les dents ont le même matériau (poudre de fer) de perméabilité 500 et saturant à 2 T. Les aimants permanents ont une perméabilité de 1.05 et une induction rémanent de 1.02 T. Grâce à cette configuration de problème, une étude magnétique et des grandeurs globales a pu être menée.

II.2 Etude magnétique

L'objectif de cette étude magnétique est de localiser les points géométriques pour lesquels l'induction semble élevée. Si les dents du stator sont mal dimensionnées, elles deviennent les pièces actives quiaturent le plus rapidement. En effet, l'épanouissement polaire des dents est réalisé avec des parties très minces et sujettes à la saturation. Les figures 4 et 5 montrent que le module de l'induction dans les parties actives de la machine atteint 2 Tesla. Les zones dans lesquels l'induction est supérieure à 2 Tesla sont des zones de singularité de maillage, proche des

arêtes des pièces soit des zones non représentative de la réalité. Cependant il est judicieux de remarquer que l'épanouissement polaire des dents (compris dans l'entrefer) et le côté entrefer des pièces polaires sont des zones où l'induction est élevée. En s'éloignant de l'entrefer, le module de l'induction diminue et retrouve des valeurs proches du Tesla.

Les aimants permanents grâce à leur dimensionnement permettent d'obtenir l'excitation rotorique attendue et le risque de démagnétisation n'est pas atteint. L'étude de la répartition du champ H dans les aimants montre que la valeur limite de démagnétisation (aux alentours de 650 kA/m) n'est pas atteinte.

Aux regards des premières constatations et de cette étude en magnéto-transitoire, il s'avère que l'épanouissement polaire de ces dents est sujet à des inductions élevées pouvant altérer le bon fonctionnement de la machine. Cette induction élevée aurait pu être due à un surdimensionnement des aimants permanents mais ceux-ci semblent bien dimensionnés puisque le risque de démagnétisation est écarté et l'excitation rotorique obtenue est satisfaisante. Le point à remettre en cause est donc le dimensionnement trop minimal de l'épanouissement polaire des dents statorique. Deux alternatives s'offrent à nous, soit un redimensionnement de cette partie de la dent soit la suppression de l'épanouissement. Concernant les pièces polaires, les inductions maximales sont obtenues aux abords des aimants et ne sont pas sujet à de modifications particulières.

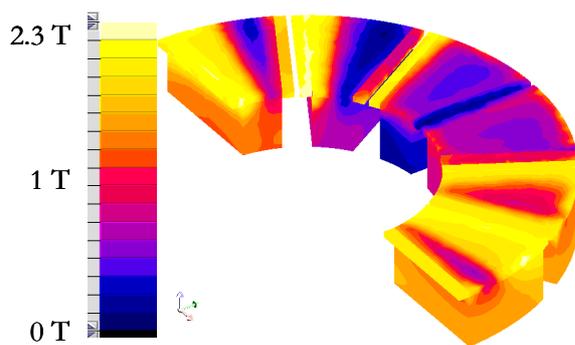


Figure 4. Module de l'induction dans les dents du stator (côté entrefer)

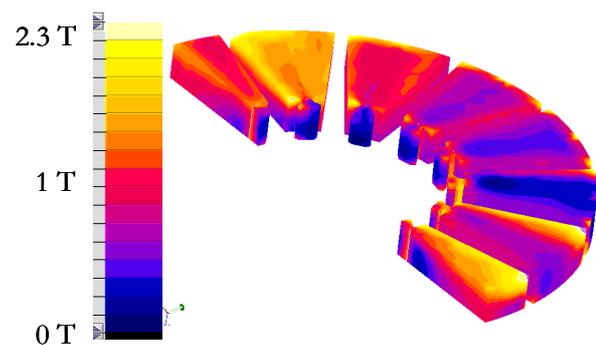


Figure 5. Module de l'induction dans les pièces polaires (côté entrefer)

II.3 Etude du couple électromagnétique :

Après cette étude locale concernant l'induction dans les parties actives de la machine, l'étude portant sur les grandeurs globales permet de quantifier les performances de la machine. Les figures 6 et 7 décrivant l'évolution du couple électromagnétique et son spectre montre que ce type de machine discoïde peut atteindre une valeur moyenne de couple 86.5 Nm. L'ondulation de celui-ci n'est pas pénalisante puisqu'elle est en deçà de 10% du couple électromagnétique. Le spectre apporte des informations sur les harmoniques et montre l'importance de l'harmonique de rang 6. Pour une courbe de couple d'une machine électrique standard, cet harmonique est toujours le plus prépondérant.

Cette étude numérique en trois dimensions par éléments finis a permis de discuter sur le comportement magnétique et une caractéristique globale (le couple électromagnétique) d'une machine discoïde double entrefer à bobinages sur dents. Les résultats sont positifs pour la suite de l'étude puisque la machine d'étude peut atteindre un couple satisfaisant (environ 86 Nm) et être magnétiquement bien dimensionner (non risque de démagnétisation des aimants). Pourtant ces résultats ont été obtenus sans avoir fait au préalable une optimisation. Le prochain

paragraphe montre qu'il est possible d'améliorer ce couple en appliquant une optimisation en trois dimensions basée sur des plans d'expérience.

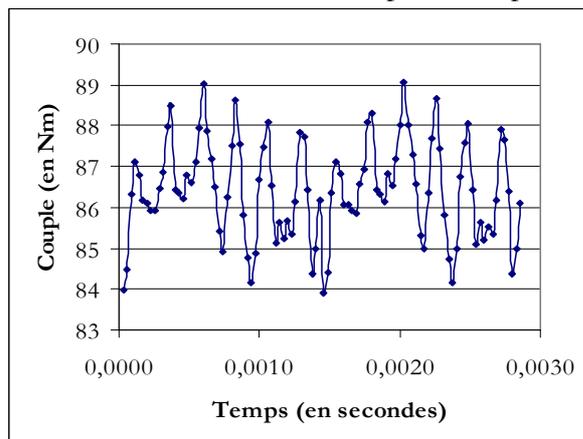


Figure 6. Evolution du couple électromagnétique

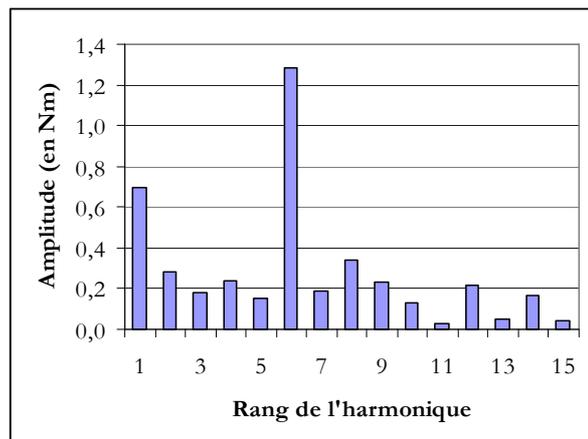


Figure 7. Spectre du couple électromagnétique

III. OPTIMISATIONS EN TROIS DIMENSIONS

III.1 Présentation

Les résultats obtenus précédemment ont été acquis pour des dimensions géométriques et physiques découlant de la recherche bibliographique concernant les machines discoïdes. Malgré les bonnes performances présentées dans le paragraphe précédent, l'optimum de la machine discoïde à bobinage sur dents n'est pas atteint. L'élaboration d'un modèle analytique étant trop complexe et trop long à réaliser, nous nous proposons d'effectuer une optimisation en trois dimensions à l'aide du logiciel GOT (développé par le laboratoire). GOT, qui signifie General Optimization Tool, est un ensemble d'outils logiciels destinés à l'optimisation des structures électromagnétiques. Ce moteur d'optimisation écrit sous Java permet de résoudre des problèmes d'optimisation de systèmes en 3 dimensions grâce à la méthode des plans d'expérience [4]. Un des avantages avec le logiciel GOT est de pouvoir le coupler avec des logiciels de calculs par éléments finis du type FLUX. Ainsi la définition et la description du modèle à optimiser sont simplifiées et les expériences sont directement réalisées sous le solveur.

Notre problème électromagnétique se prête idéalement à ce genre de procédé puisque toute la géométrie (soit un quart de la machine) a été paramétrée sous FLUX et des capteurs de calculs ont été définis (en l'occurrence le capteur Couple). La définition de notre problème d'optimisation est donc réalisée. Les étapes de l'optimisation en trois dimensions (le débroussaillage et l'optimisation directe) peuvent être effectuées.

III.2 Le débroussaillage :

La première étape, avant d'optimiser directement le problème électromagnétique proposé, consiste à effectuer un débroussaillage. Ce débroussaillage permet d'évaluer et déterminer les paramètres influents de la machine discoïde pour, par la suite, supprimer les paramètres géométriques n'ayant aucune influence sur le couple et ainsi diminuer le problème d'optimisation. L'image du résultat de ce débroussaillage est contenue dans une équation appelée fonction substitut (Eq.1) :

$$-18.72+3.37*\ln(lenc,5,15)^2-3.05*\ln(rrext,90,110)+2.96*\ln(entrefer,1,3)-2.14*\ln(lenc,5,15) +1.65*\ln(rrint,45,70) -1.59*\ln(l_min_aim, 3,10) + \dots = \text{Fonction Substitut} \quad (\text{Eq.1})$$

Grâce à cette équation (e1), les paramètres ayant une influence sur le couple électromagnétique sont déterminés. Dans ce cas précis, le premier terme correspond à la valeur moyenne du couple (18.72 Nm soit 75 Nm pour la machine complète) autour de laquelle les différentes expériences oscillent. Les termes suivants correspondent aux paramètres géométriques ayant par ordre d'apparition une grande influence sur le résultat final. Ce débroussaillage permet donc de déduire que la largeur de l'encoche, le rayon extérieur du rotor et l'entrefer joue un rôle important dans l'optimisation du couple électromagnétique. Cependant aucun des autres paramètres d'entrée de l'optimisation (rayon intérieur du stator et rotor, rayon extérieur du stator, largeur minimale de l'aimant, hauteur de dents, largeur et ouverture d'encoches) n'est à exclure pour l'optimisation suivante.

III.3 : L'optimisation :

Coûteux en temps (création de 80 prototypes « virtuels » à l'aide FLUX), le débroussaillage a indiqué les paramètres géométriques à surveiller en particulier lors de l'optimisation. Pour ce problème électromagnétique, une optimisation stochastique déterministe est choisie car tous les paramètres sont continus et dérivables. Quasi-instantanée, l'optimisation livre au bout de 8 itérations le résultat final et la valeur du couple optimisé soit 129 Nm (Figure 8).

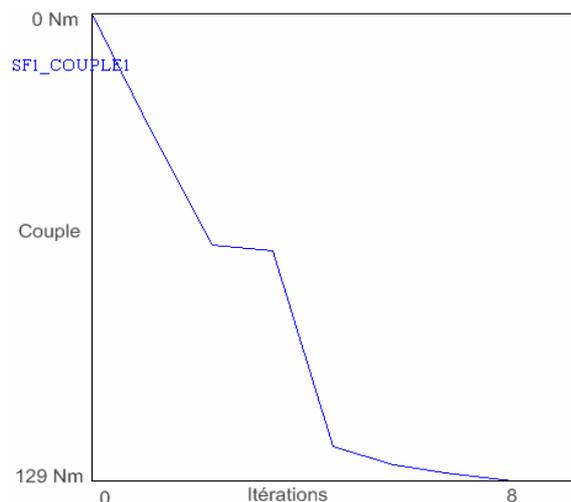


Figure 8. Evolution de la fonction Objectif

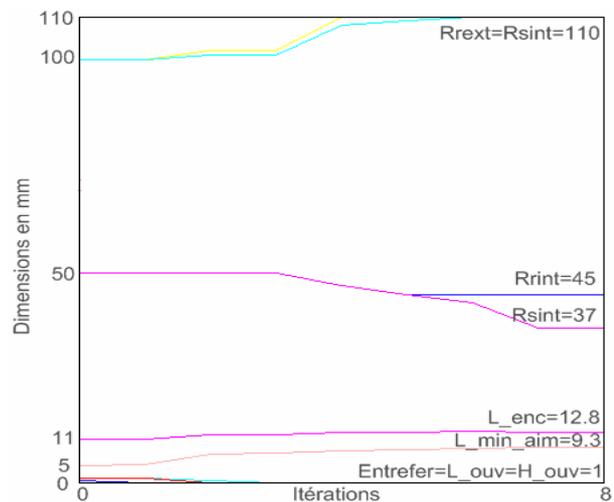


Figure 9. Evolution des paramètres lors de l'optimisation

Le point optimum de la machine discoïde à bobinage sur dents est donc atteint pour la configuration décrite en Figure 9. En comparant le couple électromagnétique en fin d'étude magnétotransitoire et le couple en fin d'optimisation, un gain de plus de 30 % a été obtenu simplement en jouant sur la géométrie de la machine. Pour avoir une comparaison plus compréhensive, la figure 10 représente graphiquement une dent, une pièce polaire et un aimant avant et après l'optimisation. Trois points de modifications ont été localisés sur les différentes pièces. Le premier point (noté 1 sur la figure 10) concerne le stator dont sa surface d'échange s'agrandit. Après optimisation, le rayon intérieur du stator n'est plus identique au rayon intérieur du rotor. Ce changement a pour conséquence de réduire les têtes de bobines de la machine. Le deuxième point (noté 2 sur la figure 10) concerne l'épanouissement polaire qui diminue et arrive en butée minimale (pour la largeur et la hauteur de l'ouverture). Enfin le troisième point (noté sur 3 sur la figure 10) de modification concerne les aimants. Naturellement pour augmenter le couple d'une machine, les aimants permanents voient leur volume augmenter. Cette optimisation met en

évidence que la largeur minimale de l'aimant double. Ultérieurement un compromis doit être trouvé entre la maximisation du couple et le volume d'aimants utilisé (soit le coût de la machine).

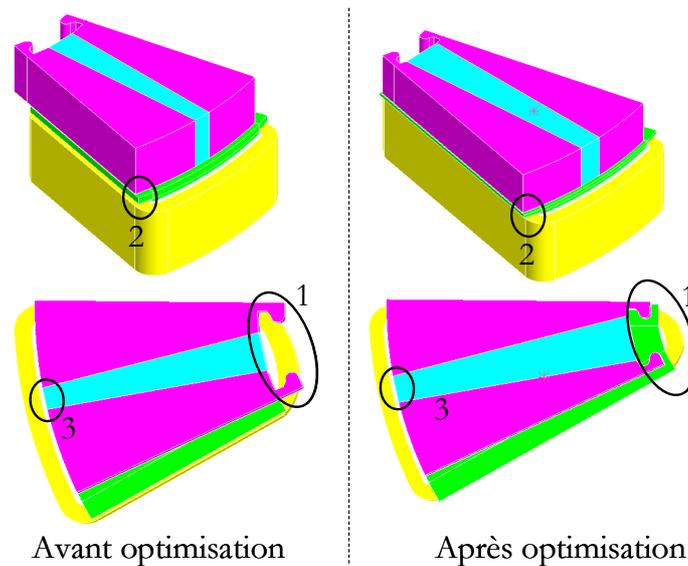


Figure 10. Evolution graphique d'une pièce polaire, d'une dent et d'une bobine au cours de l'optimisation

Cette optimisation a permis de présenter une nouvelle approche d'optimisation dans le cas où un modèle analytique est complexe et coûteux en temps. De plus grâce aux résultats obtenus, les perspectives pour ce type de machine discoïde sont encourageantes.

IV.CONCLUSION

L'objectif de cet article est double. Il permet d'exposer une machine discoïde innovante car elle allie un bobinage sur dents, des aimants enterrés et l'utilisation de la poudre de fer. L'étude par éléments finis en trois dimensions montre que ce type de machine obtient des performances satisfaisantes en terme de couple et couple massique. Le comportement magnétique de la machine peut être améliorée en étudiant précisément l'impact de l'épanouissement polaire (saturation élevée) sur les performances globales de la machine. Le second objectif de cet article est d'apporter une démarche d'optimisation en trois dimensions par plans d'expériences. Les résultats de cette optimisation montrent la pertinence de ce choix pour des problèmes purement tridimensionnelle dont l'analyse analytique est complexe. L'analyse d'influence des paramètres a permis de cibler et de concentrer l'optimisation. La machine discoïde a profité de cette démarche pour être optimisée et augmentée son couple électromagnétique de 30% (passant de 86 Nm à 129 Nm).

V.REFERENCES

- [1]J.F.GIERAS, R.WANG et M.J. KAMPER, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines", Dordrecht, The Netherlands : Kluwer, (2004).
- [2]M.AYDIN, S.HUANG, T.A.LIPO, "Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: a review", Proc. of EPE PEMC'04, (2004).
- [3]F.MARIGNETTI, G.TOMASSI, P.CANCELLIERE, V.DELLI COLLI, R.DI STEFANO, M.SCARANO, "Electromagnetic and Mechanical Design of a Fractional-Slot-Winding Axial Flux PM Synchronous Machine with Soft Magnetic Compound Stator", IAS'06, (2006).
- [4] J.L. Coulomb, "Electromagnétisme et problèmes couples", "Electromagnétisme et éléments finis 3, Hermes, Chapitre 16, 2002.