

Maquette de T.P. *OPTIMAG* : création du couple électromagnétique dans une machine synchrone et optimisation de sa forme d'onde

V. Monturet*, D. Harribey** et B. Nogarede*** (ENSEEIH, Toulouse)
Mis en ligne le 19 février 2003.

Résumé

Les travaux pratiques réalisés à l'ENSEEIH à l'aide de la maquette *OPTIMAG* mettent en évidence d'une part, la création du couple électromagnétique dans une machine à aimants permanents à induit sans encoche et, d'autre part, l'optimisation de la forme d'onde du couple créé.

Mots-clés : TP, maquette, couple électromagnétique, interaction, aimants, champ tournant, champ pulsant, optimisation, valeur moyenne, ondulations, bobinages.

© EDP Sciences, 2003.

Niveau de connaissances requis. Connaissances de base en électromécanique.

Niveau des étudiants. Première et deuxième années du cycle de formation ingénieur.

* **Valérie Monturet**¹ est Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT) et ancienne élève de l'École Normale Supérieure de Cachan. Agrégée de physique appliquée, elle était lors de l'écriture de l'article, doctorante au sein du groupe « Machines et Mécanismes et Mécanismes Electroactifs - EM² » du Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle de Toulouse (LEEI). Sa thèse au sein du groupe EM² a porté sur « la conception optimale des actionneurs piézoélectriques à l'aide d'une méthodologie de type problème inverse ». Elle est actuellement professeur de physique appliquée en BTS électronique au Lycée Pape Clément de Pessac.

** **Dominique Harribey**¹ est ingénieur d'étude au CNRS. Il est responsable de la conception et de la réalisation des maquettes et prototypes au sein du groupe « Machines et Mécanismes et Mécanismes Electroactifs - EM² » du Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle de Toulouse (LEEI). Il a, à plusieurs reprises, développé conjointement avec Bertrand Nogarede des maquettes didactiques, en particulier celle dont il est question dans cet article. Ces maquettes, touchant le secteur des machines tournantes, sont destinées aux enseignements pratiques de la filière de formation ingénieur de l'ENSEEIH.

*** **Bertrand Nogarede**¹, Professeur des Universités, est Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT) et Ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Électrotechnique, d'Électronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications (ENSEEIH). Il enseigne l'Électrodynamique et les Machines Électriques au sein du département Génie Électrique - Automatique de l'ENSEEIH. Responsable du groupe « Machines et Mécanismes Electroactifs - EM² » du Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle de Toulouse (LEEI), ses travaux de recherche portent de manière générale sur la conception et la modélisation de nouveaux concepts d'actionneurs électromécaniques.
e-mail : bertrand.nogarede@leei.enseiht.fr

¹Laboratoire d'Électronique et d'Électrotechnique Industrielle, Groupe EM²
École Nationale Supérieure d'Électronique, d'Électrotechnique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse,
2 Rue Charles Camichel, BP 7122,
F-31071 Toulouse cedex 7, France.

1. Introduction

Les travaux pratiques d'Électrotechnique réalisés en première et deuxième année de l'ENSEEIH à l'aide de la maquette *OPTIMAG* constituent le prolongement des cours intitulés Électrodynamique et Machines. Ces cours, dispensés en première et deuxième année de la formation d'ingénieur, présentent d'une part, les procédés de conversion électromécanique de l'énergie et, d'autre part, les machines tournantes à interaction de champs magnétiques [1]. Parmi toutes les possibilités offertes par la console de manipulation unique *OPTIMAG*, un choix a été effectué pour proposer aux étudiants des expériences permettant de mieux comprendre le fonctionnement des machines magnétiques tournantes [2].

En effet, au cours du T.P. de première année, les étudiants mettent en évidence la création du couple électromagnétique dans une machine synchrone à aimants permanents [3]. Ainsi, ils caractérisent d'abord le couple produit par l'interaction d'un aimant avec un champ pulsant avant de s'intéresser de manière plus approfondie au couple résultant de l'interaction d'un aimant avec un champ tournant.

Quant au T.P. de deuxième année, l'objectif est d'optimiser la forme d'onde du couple en agissant sur le type d'alimentation et sur le modèle de bobinage [3].

Ainsi, la maquette de TP *OPTIMAG*, de par sa réalisation, recèle des manipulations diverses et permet d'appréhender de manière non conventionnelle la conversion électro-mécanique de l'énergie dans une machine à aimants permanents [4].

Télécharger la vidéo (28 Mo, format MPEG 1).

2. Présentation de la maquette *OPTIMAG*

Le dispositif expérimental (Fig. 1), associe une machine synchrone à aimants permanents, dont l'induit est dépourvu d'encoches, à un module électronique d'alimentation et de commande.

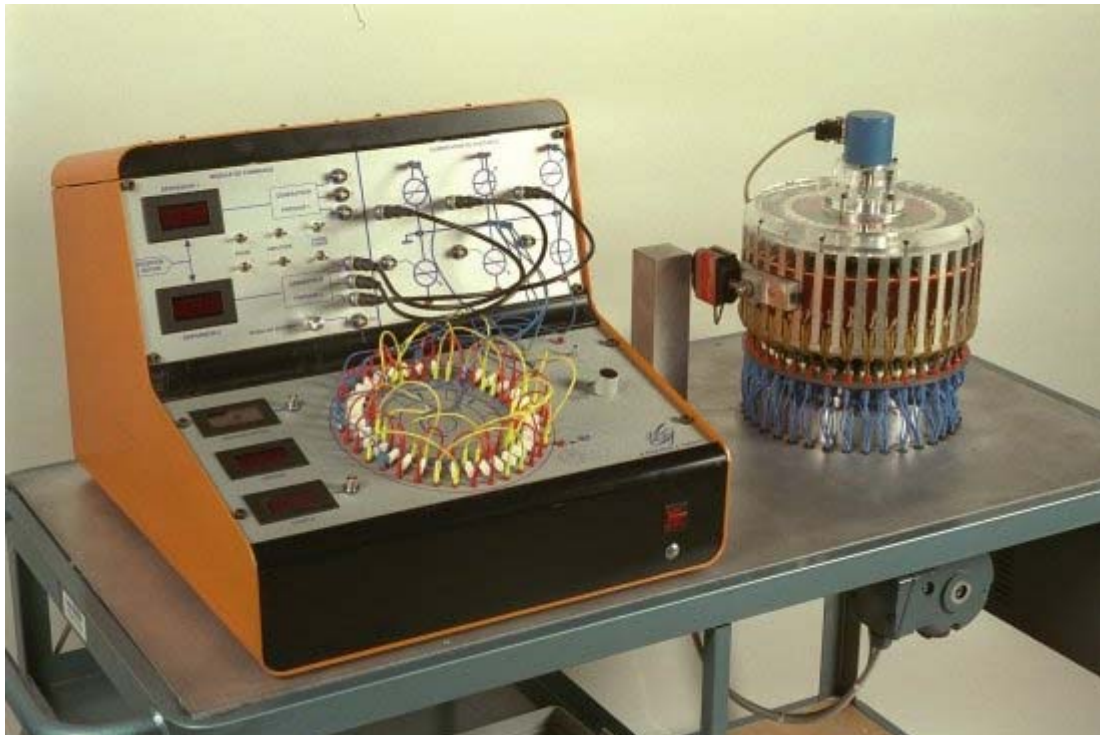


Fig. 1. Maquette de TP *OPTIMAG*.

2.1. Structure de la machine synchrone

Le rotor de la machine synchrone, constitué d'un empilement de tôles circulaires et d'aimants inducteurs disposés à la périphérie, est entraîné par un moto réducteur à faible vitesse variable (Fig. 2). Une spire exploratrice placée dans l'entrefer permet de visualiser l'évolution du champ magnétique rotorique au cours du temps. Un capteur de force soumis à l'effort de réaction du stator vis-à-vis du bâti permet d'accéder à la mesure du couple ; sa visualisation est possible grâce à une sortie oscilloscope implantée sur la face avant de la console de manipulation.

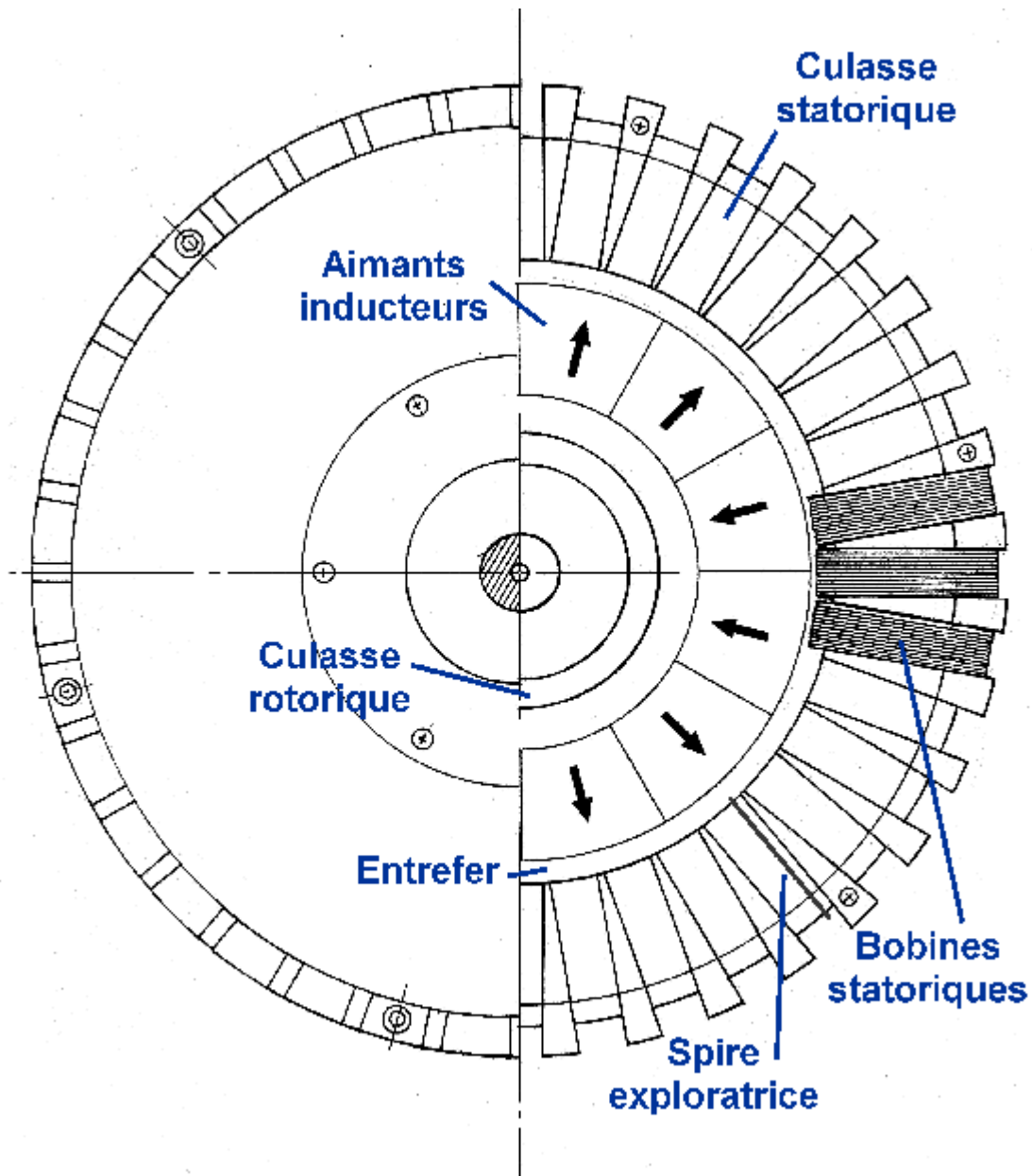


Fig. 2. Coupe transversale de la machine synchrone.

Quant au bobinage statorique, il est réalisé à l'aide de 36 bobines élémentaires enroulées autour de la culasse et guidées vers l'extérieur par le biais d'encoches pratiquées dans la carcasse (Fig. 2). Chacune des 36 bobines est composée de deux couches de 23 spires, et est accessible par la plaque à bornes disposée sur la façade avant de la console de manipulation. La mise en oeuvre d'un tel bobinage, dit en anneau, permet non seulement de résoudre le problème de tenue mécanique des conducteurs sur un stator dépourvu d'encoches mais il permet également à l'utilisateur d'expérimenter de multiples formes de bobinages, ce qui constitue un des intérêts majeurs de la maquette *OPTIMAG*.

Un autre attrait de cette maquette de T.P. réside dans la présence de diodes électro-luminescentes placées au-dessus des conducteurs statoriques situés dans l'entrefer. Ainsi, la visualisation en couleurs du sens de passage du courant permet de représenter spatialement le champ magnétique statorique (Fig. 3).

2.2. Alimentation et commande

La génération synchrone des courants d'alimentation polyphasés est assurée par un onduleur de tension réglé en courant à Modulation de Largeur d'Impulsions [2]. Des potentiomètres électroniques accessibles depuis le module de commande permettent d'agir sur la forme d'onde, l'amplitude et la phase des consignes de courant. L'alimentation de puissance est constituée de deux sources de courants triphasés.

3. Interaction Aimant - Champ

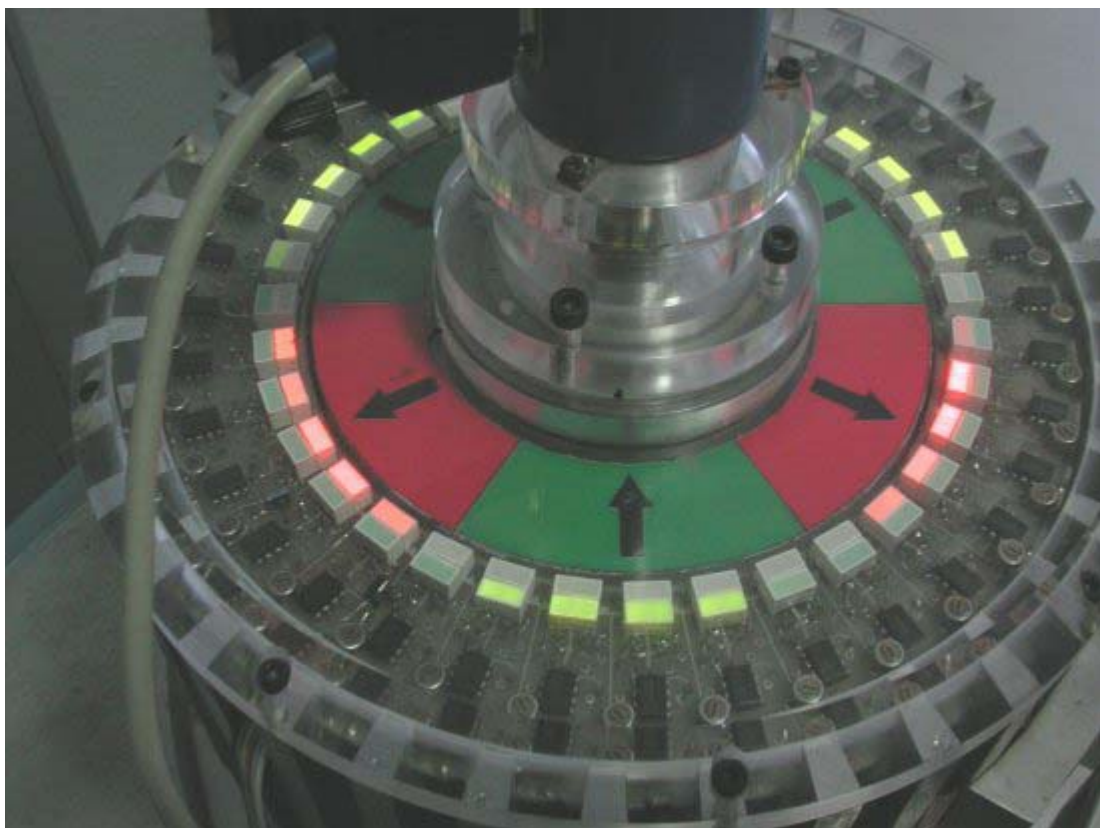
Les interactions magnétiques étudiées ont lieu entre le champ rotorique tournant créé par les aimants et le champ statorique dont la nature dépend du nombre de phases.

3.1. Champ statorique pulsant

Le premier couple auquel les étudiants s'intéressent est celui résultant de l'interaction entre le champ rotorique et un champ statorique pulsant, caractérisé par une direction fixe et une amplitude sinusoïdale [3]. Ce champ est obtenu en n'alimentant qu'une phase statorique, câblée avec un bobinage à pas diamétral, avec un générateur basse fréquence externe. Au cours de cette expérience, dans laquelle la fréquence d'alimentation est ajustée indépendamment de la fréquence de rotation, les étudiants recherchent les conditions nécessaires à l'existence d'un couple à valeur moyenne non nulle.

La direction du champ statorique étant visualisée à l'aide des diodes électroluminescentes (Fig. 3), les étudiants testent différentes positions relatives du champ statorique et de l'aimantation rotorique afin de montrer que l'amplitude du couple dépend de l'angle formé par les directions des champs [4].

Fig. 3. Visualisation du champ statorique pulsant (ici, aimantation dans l'axe polaire).



L'utilisation d'un GBF externe permet de montrer que, pour obtenir un couple à valeur moyenne non nulle, les deux champs doivent être synchrones, c'est-à-dire :

$$\omega = p\Omega \quad (1)$$

où ω est la pulsation électrique du champ statorique, p le nombre de paires de pôles de la machine et Ω la vitesse de rotation du rotor [4].

Le couple pulsant présenté sur la figure 4, correspond à un réglage où le couple moyen est maximum. Dans ce cas particulier, le taux d'ondulation du couple est alors de 100 %. L'expression théorique du couple, établie dans [4], est validée par l'analyse de cet oscillogramme : en effet, la fréquence du couple est le double de celle du champ statorique et sa valeur minimale (respectivement maximale) correspond au cas où l'aimantation est dans l'axe polaire (respectivement interpolaire) du champ statorique.

3.2. Champ statorique tournant

La seconde interaction mise en oeuvre par les étudiants de première année a lieu entre le champ rotorique et un champ statorique tournant, d'amplitude constante et de direction variable [3]. Ce dernier est créé par un bobinage triphasé (à pas diamétral) alimenté par des courants sinusoïdaux, dont la pulsation électrique vérifie la relation (1) grâce à l'autopilotage de la machine synchrone. La maquette *OPTIMAG* étant pourvue d'un réglage de l'amplitude du courant statorique I et du déphasage Ψ entre courant et force électromotrice (f.e.m.), les étudiants montrent expérimentalement que la loi de variation de la valeur moyenne Γ du couple est [4] :

$$\Gamma = k I \cos(\Psi) \quad (2)$$

où k est un coefficient indépendant de la vitesse.

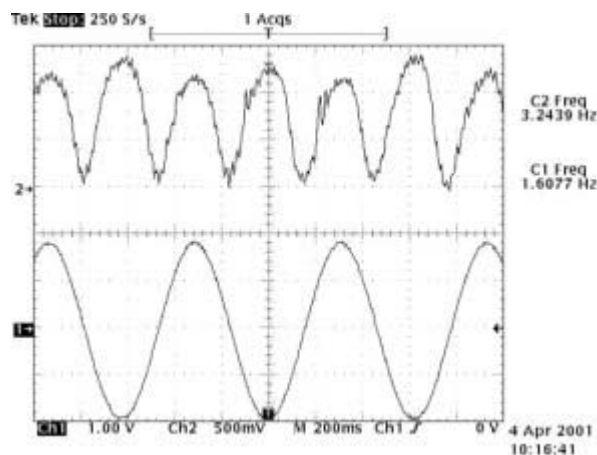


Fig. 4. Forme d'onde du couple pulsant (Ch 2) et du courant statorique (Ch 1).

4. Réduction de l'ondulation de couple

Grâce à la maquette *OPTIMAG*, la réduction de l'ondulation du couple est réalisée en modifiant la nature du champ statorique : soit en changeant le nombre de phases, soit en utilisant différents modèles de bobinages, soit en alimentant avec des courants créneaux ou sinusoïdaux (non abordé par les étudiants) [4].

4.1. Influence de l'alimentation

Dans un premier temps, les étudiants de deuxième année s'intéressent à l'influence des grandeurs d'alimentation sur l'ondulation de couple, en alimentant les bobinages statoriques avec un système de courants diphasés, créant ainsi un champ elliptique [3]. Les réglages à effectuer sur la maquette *OPTIMAG* pour obtenir un couple à valeur

moyenne non nulle et à faible taux d'ondulation sont les suivants: établir d'abord un déphasage égal à $\pi/2$ entre les deux courants d'alimentation, puis égaux leur amplitude. Le champ statorique ainsi obtenu est tournant circulaire et maximise le rapport valeur moyenne / ondulation du couple [4].

4.2. Influence du bobinage

Dans une seconde partie, différents modèles de bobinages sont testés afin de modifier la répartition spatiale des sources de champ : cette étude est réalisée pour un système de courants triphasés sinusoïdaux, en analysant la forme d'onde de la force électromotrice et sa transformée de Fourier aux bornes d'une phase statorique [3]. Les allures temporelle et spectrale de la f.e.m pour un bobinage à pas diamétral sont présentées sur la figure 5. L'oscillogramme est identique avec un modèle concentrique ou imbriqué.

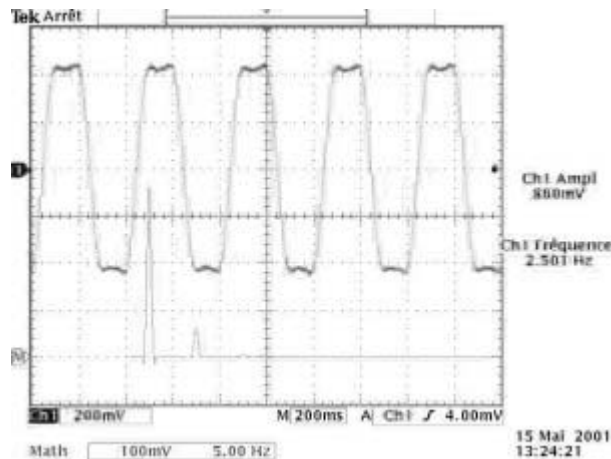


Fig. 5. F.e.m. et FFT (pas diamétral).

Ainsi, ces trois modèles de bobinage sont équivalents en termes de répartition spatiale des sources de champ mais restent distincts dans la mesure où ils correspondent à des techniques de réalisation différentes.

En outre, la mise en oeuvre d'un bobinage à pas raccourci sur deux couches, réalisable grâce au caractère modulaire de l'induit de la maquette *OPTIMAG*, montre que la f.e.m. est parfaitement sinusoïdale (l'harmonique de rang 3 a disparu). Ce modèle de bobinage conduit donc à une répartition spatiale sinusoïdale des sources du champ statorique, permettant ainsi de réduire les ondulations du couple [2, 4].

5. Conclusion

Les élèves ingénieurs de l'ENSEEIH ont donc l'opportunité de réaliser des travaux pratiques sur la maquette *OPTIMAG*, qui permet de mettre en évidence, à la fois de manière qualitative et quantitative, la création du couple électromagnétique dans une machine à aimants permanents.

En effet, les diodes électroluminescentes aident à visualiser (de manière *optique*) et à représenter dans l'espace le champ magnétique statorique, ce qui permet une approche qualitative de la création du couple.

De plus, l'influence du bobinage statorique sur l'*optimisation* de la forme d'onde du couple est mise en évidence de manière quantitative par les différentes possibilités de câblage offertes par la console de manipulation.

Finalement, cette maquette très didactique rend l'approche des machines magnétiques tournantes, non seulement attractive et ludique, mais elle permet également de mieux maîtriser les principes physiques de la conversion électromécanique de l'énergie.

Références bibliographiques

- [1] B. Nogarede, Techniques de l'Ingénieur, **D3410** (2000), **D3411** (2001).
- [2] B. Nogarede, *Étude de moteurs sans encoches à aimants permanents de forte puissance à basse vitesse*, Thèse de doctorat, INP Toulouse (1990).
- [3] *Textes de TP de première et deuxième années de l'ENSEEIH*T (2000-2001).
- [4] V. Monturet, B. Nogarede et D. Harribey, *Maquette de T.P. OPTIMAG : des concepts élémentaires d'interactions électromagnétiques à la réduction des ondulations de couple dans une machine synchrone*, La Revue 3EI, **25**, (2001).