

RAPPORT DE SYNTHESE

présenté à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

en vue d'obtenir

L'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

par

Michel HECQUET

Docteur en Génie Electrique de l'USTL
Maître de Conférences (IUT-A de Lille / dept. GEII)

**CONTRIBUTION A L'INSTRUMENTATION
DE LA DEMARCHE DE CONCEPTION
DES MACHINES ELECTRIQUES**

Soutenue le 13 décembre 2006 devant le jury composé de :

Président :	JP. HAUTIER	Professeur à l'ENSAM de Lille.
Rapporteurs :	B. NOGAREDE	Professeur à l'INP de Toulouse
	G. FRIEDRICH	Professeur à l'UT de Compiègne
	M. GABSI	MdC – HDR à l'ENS de Cachan
Examineurs :	G. SEGUIER	Professeur Emérite à l'U.S.T. de Lille
	JF. BRUDNY	Professeur à l'Univ. d'Artois, Béthune
	S. HARMAND	Professeur à l'ENSIAME de Valenciennes
	M. BENREJEB	Professeur à l'ENIT de Tunis.
Directeur de recherche :	P. BROCHET	Professeur à l'Ecole Centrale de Lille

TITRE :

CONTRIBUTION A L'INSTRUMENTATION DE LA DEMARCHE DE CONCEPTION DES
MACHINES ELECTRIQUES

RESUME :

La conception d'un produit électrotechnique est une étape clé de son cycle de vie dont dépendent nombre de ses propriétés : valeur d'usage, coût, empreinte environnementale, fiabilité, etc.... La démarche de conception traditionnelle, « business as usual », est celle de l'approche progressive constituée d'essais et d'erreurs.

L'objectif principal de l'équipe Conception et Optimisation des Machines Electriques (C.O.M.E.), qui reste à l'heure actuelle utopique, est de substituer à ce processus long et coûteux une démarche entièrement virtuelle utilisant uniquement des procédés numériques. Pour l'atteindre, nous nous proposons dans un premier temps de dégager des méthodes de conception s'appuyant sur des outils logiciels adaptés, ce qui peut se résumer par « l'instrumentation de la démarche de conception ».

Un de nos *objectifs* au cours de ces 10 dernières années de recherche a été de trouver des solutions de représentations des machines électriques de façon à éviter le coût d'un prototype. L'approche par *réseaux de perméances*, qui offre un bon compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul, a été privilégiée. Ainsi, à chacun des systèmes réels étudiés s'est vu correspondre un équivalent virtuel infiniment plus avantageux. Celui-ci peut être modifié à volonté, au gré de l'expérimentateur. Cette démarche est typiquement appliquée lors d'optimisations pendant lesquelles les caractéristiques des modèles sont modifiées afin d'améliorer certaines performances. En ce qui concerne l'optimisation, la *Méthode des Plans d'Expériences* a été privilégiée. Dans ces développements, nous nous sommes efforcés *d'assurer une bonne adéquation entre le modèle et la méthode d'optimisation choisie*. Enfin, la confrontation avec l'expérience menée le plus souvent avec l'appui de nos partenaires industriels a permis de valider nos approches.

Les différents exemples traités sont naturellement couplés et répondent à un besoin important en *recherche technologique* notamment dans le cadre du CNRT (Centre National de Recherche Technologique) Génie Electrique intitulé 'Réseaux et Machines du Futur'.

Le rapport est divisé en trois parties qui décrivent et situent mes travaux. La première partie constitue un résumé détaillé des activités pédagogique, administrative et recherche. La deuxième partie présente mes activités de recherche : du prototypage virtuel à l'optimisation par plans d'expériences et est illustrée par des exemples d'applications. Enfin, la dernière partie dresse un bilan ainsi qu'une présentation des perspectives à court et à long terme.

Soutenu le : 13 / 12 / 06

A l'Université des Sciences et Technologies de Lille / Batiment des Thèses

*A mon épouse, Patricia,
pour son soutien permanent, son réconfort et sa grande patience,
A mes enfants, Maxime, Clément et Alexis.*

A mes parents.

Remerciements

L'ensemble des activités présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP) de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, dirigé par le Professeur Jean-Paul HAUTIER, que je tiens tout d'abord à remercier pour avoir accepté de présider mon jury mais aussi pour son soutien lors de ces dernières années.

Je remercie également MM Guy FRIEDRICH, professeur à l'U.T.C, Bertrand NOGAREDE, professeur à l'INP de Toulouse, et Mohamed GABSI, maître de conférences HDR à l'ENS Cachan, qui ont accepté de rapporter sur ce mémoire malgré leurs nombreuses responsabilités.

Je tiens à remercier Jean François BRUDNY, professeur à l'Univ. d'Artois, pour avoir examiné ce travail mais aussi Souad HARMAND, professeur à l'ENSIAME de Valenciennes, pour nos collaborations actuelles et futures ainsi que nos différentes discussions dans le cadre du programme 'Futurelec3'. Que Mohamed BENREJEB, professeur à l'ENIT de Tunis, soit remercié pour son soutien et ses conseils pour la rédaction de mon HDR.

Mes remerciements s'adressent particulièrement à M. Guy SEGUIER, Professeur Emérite de l'USTL, pour avoir accepté d'examiner ce travail mais aussi le remercier pour toutes ces années l'ayant eu comme enseignant et président de jury lors de ma thèse.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à Pascal BROCHET, professeur à l'Ecole Centrale de Lille (E.C.L.), responsable de notre équipe 'Conception et Optimisation des Machines Electriques' (COME). J'ai eu la chance de faire partie de son équipe il y a une quinzaine d'années. Son ouverture d'esprit, ses qualités et compétences scientifiques mais surtout ses qualités humaines sont remarquables et intarissables. La reconnaissance et la force de cette équipe sont aussi liées aux activités de mes collègues et amis Frédéric GILLON et Stéphane BRISSET, tous les deux maîtres de conférences à E.C.L. (et bientôt HDR). Soyez assurés de ma profonde reconnaissance et de toute mon amitié.

Enfin, je tiens à remercier mes collègues qui ont participé au développement de ces travaux et plus particulièrement : M. GOUEYGOU, maître de conférences à E.C.L. au dept. Electronique - Vibro-Acoustique, ainsi qu'O. BARRE, agrégé à G. Eiffel - Armentières, et A. CASTELAIN, maître de conférences à E.C.L. pour leurs différents apports.

Merci à S. Vivier, A. Ait-Hammouda, B. Napame, D. Petrichenko, S. Bujzac, A. Fasquelle ainsi que J. Le Besnerais, ces encadrements furent et sont des sources de satisfaction, de plaisir mais aussi sources de difficultés et de contraintes liées à toutes activités de recherche.

Je n'oublie pas mes collègues enseignants, nos secrétaires du L2EP et de l'IUT ainsi que les techniciens qui ont contribué à la réussite de ces travaux.

Que mon épouse Patricia, et mes enfants, Maxime, Clément et Alexis soient à nouveau remerciés pour le peu de disponibilité que je leurs ai accordé.

Table des matières

AVANT PROPOS

Partie I Résumé Activités pédagogique, administrative et recherche.

CURRICULUM VITAE RESUME	5
CURRICULUM VITAE DETAILLE	6
État civil	
Formation	
Déroulement de Carrière	
ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUE ET ADMINISTRATIVE	8
Fonctions Pédagogiques	
Fonctions Administratives et Autres	
Bilan et Perspectives sur l'Enseignement en Electrotechnique	
ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES	12
Présentation du L2EP et de l'Équipe COME	
Positionnement et Thématique de Recherche	
Encadrement (Thèses-DEA/Post-Doc/...)	
Activités Contractuelles	
Rayonnement et Collaborations Scientifiques	
Liste des publications / Communications internationales et nationales	30
Revue [R..]	
Communications Internationales avec actes [CI..]	
Communication Nationales avec actes [CN]	
Bilan (revues / CI & CN)	

Partie II Activités de Recherche

1 INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	40
2 LE « PROTOTYPAGE VIRTUEL »	43
2.1 Objectifs et intérêts du prototypage virtuel	
2.1.1 Intérêt d'un prototype virtuel	
2.1.2 Difficultés rencontrées	
2.1.3 Domaines physiques à considérer	
2.1.4 Choix d'un niveau de granularité	
2.2 Approche « Réseau de Perméances	49
2.2.1 Historique	
2.2.2 Objectifs	
2.2.3 Difficultés rencontrées	
2.2.4 Niveau de discrétisation choisi et méthode de déterminations des perméances	
2.2.5 Prise en compte du circuit électrique	
2.2.6 Prise en compte de la saturation	
2.2.7 Prise en compte des effets 3D	
2.2.8 Conclusion	

2.3	Couplage avec des modèles vibro-acoustique et/ou thermique	65
2.3.1	Couplage vibro-acoustique	
2.3.2	Couplage thermique	
2.3.3	Conclusion	
2.4	Développement d'outils dédiés par « réseau de perméances »	75
2.4.1	Outils exploitant l'approche des Réseaux de Perméances « Turbo TCM »	
2.4.2	Outils exploitant le couplage multi-physiques « DIVA »	
2.5	Conclusion sur les prototypes virtuels	79
3	Optimisation par plans d'expériences	80
3.1	Introduction	
3.2	Méthode des plans d'expériences	83
	Intérêt & historique.	
3.2.1	Application des plans d'expériences au L2EP	
3.2.1.1	Technique du criblage ou screening	
3.2.1.2	Technique du criblage global ou screening 'multizones'	
3.2.1.3	Méthodologie des surfaces de réponse	
3.3	Optimisation par plans d'expériences	102
3.3.1	Stratégie de glissements de plans	
3.3.2	Stratégie de resserrement de plans ou zoom	
3.3.3	Stratégie « exhaustive »	
3.4	Conclusion	111
4	Applications (modélisation par Réseau de Perméances 2D et 3D)	112

Partie III Bilan et Perspectives

1	Bilan de mes activités de recherche	124
2	Perspectives court terme	127
2.1	Modélisation multi-physiques	
2.1.1	Aspect 'aéro-thermique'	
2.1.2	Aspect 'acoustique et vibratoire'	
2.1.3	Aspect 'modélisation par réseau de perméance (RdP)'	
2.2	Optimisation par plans d'expériences	
2	Conclusion sur le bilan et les perspectives court terme	133
3	Perspectives long terme	134

<u>Références</u>	135
--------------------------------	------------

Annexes

Annexe I : Exemples d'applications et articles	
Annexe II : Plaquette de l'équipe COME	
Annexe III : Résumé programme 'Futurelec3' du CNRT	
Annexe IV : Outil SOPHEMIS	

Avant-Propos

La conception d'un produit électrotechnique est une étape clé de son cycle de vie dont dépendent nombre de ses propriétés :

- valeur d'usage,
- coût,
- empreinte environnementale,
- fiabilité,
- etc....

La démarche de conception traditionnelle appelée « business as usual » est celle de l'approche progressive constituée d'essais et d'erreurs.

L'objectif principal de l'équipe Conception et Optimisation des Machines Electriques (C.O.M.E.), qui reste à l'heure actuelle utopique, est de substituer à ce processus long et couteux une démarche rationnelle utilisant des méthodes numériques. Pour l'atteindre, nous nous proposons dans un premier temps de dégager des méthodes de conception s'appuyant sur des outils logiciels adaptés, ce qui peut se résumer par « l'instrumentation de la démarche de conception ».

Cette instrumentation se décline sur trois axes de progrès :

- la recherche de solutions de représentation autrement dit le prototypage virtuel,
- les travaux d'aide à la production de solutions de conception dans l'univers du modèle : méthode, logiciel, méthodologie,
- enfin, la confrontation des résultats théoriques obtenus aux réalités de la production industrielle.

Ces 3 axes sont couplés et permettent de répondre à un besoin important concernant la conception optimale de dispositifs électrotechniques. Ils présentent un intérêt au niveau de la *recherche fondamentale* mais aussi au niveau de la *recherche technologique*. Cet intérêt est démontré par la forte participation au sein du CNRT (Centre National de Recherche Technologique) intitulé 'Machines et Réseaux du Futur, programme Futurelec2' et plus particulièrement dans le programme 'Futurelec3' présenté en annexe I.3.

L'avantage de ces collaborations industrielles est de renforcer le troisième axe en disposant et en réalisant de nombreux prototypes permettant de valider nos modèles mais aussi permettant de définir de nouvelles machines.

Ces partenaires industriels interviennent essentiellement dans le domaine du transport automobile et ferroviaire, un des pôles d'excellence de la région Nord-Pas-De-Calais (pôle « I-Trans »).

Afin de vous faire connaître mes différentes activités, la présentation de mon HDR est décomposée en trois parties :

- partie 1 : un résumé détaillé des activités pédagogique, administrative et recherche.

Dans la partie 'recherche', nous rappelons brièvement les activités du L2EP et le positionnement de l'équipe COME permettant d'introduire mes axes de recherche. Un bilan « quantitatif » est apporté ainsi que les collaborations et le rayonnement scientifique liés à mes activités.

- partie 2 : une présentation des activités de recherche.

Deux aspects sont abordés :

- la modélisation et plus particulièrement des solutions de représentation d'un dispositif électrotechnique ce que nous appelons « le prototypage virtuel ». Nous présentons aussi le développement d'outils dédiés.

- l'optimisation par plans d'expériences.

Des exemples sont ensuite fournis permettant d'illustrer et de renforcer les développements cités. Les articles concernés sont donnés en annexe.

- partie 3 : En conclusion, un bilan est dressé ainsi qu'une présentation des perspectives court et long terme.

Enfin, ce travail n'aurait pu être présenté sans l'aide de mes collègues de l'équipe COME, et plus particulièrement F. Gillon et S. Brisset dont les thèmes 'Conception et Optimisation' font aussi partie de leur préoccupation quotidienne. Il faut aussi associer les collaborations universitaires et industrielles, les doctorants, étudiants et stagiaires, que j'ai eu à encadrer, et qui m'ont permis d'élargir ma vision sur la conception 'optimale' d'un système électrotechnique.

PARTIE I

C.V. détaillé

***Résumé d'activités pédagogique,
administrative et recherche.***

SOMMAIRE (partie I)

1)	<u>CURRICULUM VITAE RESUME</u>	- 5 -
2)	<u>CURRICULUM VITAE DETAILLE</u>	- 6 -
	ETAT CIVIL	- 6 -
	FORMATION	- 6 -
	DEROULEMENT DE CARRIERE	- 7 -
3)	<u>ACTIVITES PEDAGOGIQUE ET ADMINISTRATIVE</u>	- 8 -
	FONCTIONS PEDAGOGIQUES	- 8 -
	FONCTIONS ADMINISTRATIVES ET AUTRES	- 9 -
	BILAN ET PERSPECTIVES SUR L'ENSEIGNEMENT EN ELECTROTECHNIQUE	- 11 -
4)	<u>ACTIVITES SCIENTIFIQUES</u>	- 12 -
	PRESENTATION DU L2EP ET DE L'EQUIPE COME	- 12 -
	POSITIONNEMENT ET THEMATIQUE DE RECHERCHE	- 15 -
	ENCADREMENT (THESES – DEA / POST-DOC / ...)	- 16 -
	ACTIVITES CONTRACTUELLES	- 22 -
	RAYONNEMENT ET COLLABORATIONS SCIENTIFIQUES	- 27 -
	LISTE DES PUBLICATIONS [R..] / COMMUNICATIONS INTERNATIONALES [CI..] ET NATIONALES [CN..]	- 30 -
	REVUES [R..]	- 30 -
	COMMUNICATIONS INTERNATIONALES AVEC ACTES [CI..]	- 31 -
	COMMUNICATIONS NATIONALES AVEC ACTES [CN..]	- 35 -
	BILAN (REVUES / CI & CN)	- 36 -

Ci-dessous et avant de détailler mes différentes activités, un résumé sur une page dresse un premier bilan quantitatif.

1) Curriculum Vitae Résumé

Activités pédagogique et administrative:

- 200h (équivalent TD) en électrotechnique en licence professionnelle 'Maintenance des transports guidés M.T.G.', en formation initiale (2^{ème} année), en formations continue et à distance (ou multimédia) à l'IUT dont 8h en MASTER-recherche et en G3 – dernière année Ecole Centrale de Lille.
- Encadrement de projets tuteurés (1^{ère} année) et de stages de 2^{ème} année à l'IUT.
- **Responsable de la licence professionnelle** 'Maintenance des transports guidés' : projet déposé en septembre 2005 – habilité depuis février 2006 - ouverture septembre 2006.
- **Responsable des dossiers d'admission** 1^{ère} année / licence pro. 'MTG' à l'IUT.

Activités scientifiques :

- *Thèmes de recherche* : (Equipe C.O.M.E. : Conception et Optimisation des Machines Electriques)

Conception optimale des machines électriques en vue de réduire le bruit d'origine électromagnétique, **Stratégies d'optimisation** utilisant la **technique des plans d'expériences**, **optimisation multi-physiques** : électro-vibro-acoustique, modélisation par **réseaux de perméances** : bon compromis temps de calcul - précision, et **développement d'outils** concernant le **prototypage virtuel**.

(Titulaire d'une P.E.D.R. depuis 1/10/2001).

- *Encadrements et Publications* :

Encadrement de **4** thésards (2 soutenues) + **1** cotutelle + **2** thésard à 20% (1 soutenue),
8 DEA, **3** Post-doc.

16 Revues, **40** Communications internationales (CI), **10** Communications nationales (CN)

- *Animations scientifiques* :

Coordinateur du projet 'Futurelec3' dans le cadre du CNRT 'Réseaux et Machines Electriques du Futur' [CR10]; **Collaboration** avec le MPEI (Moscow Power Engineering Institute) : Co-encadrement d'une thèse de D. Petrichenko ; **Collaboration** avec l'université TUG de Gdansk : cotutelle de thèse de Mr S. Bujacz. **Collaboration** avec l'U.T.Compiègne (V. Lanfranchi – G. Friedrich) : co-encadrement de la thèse de J. Le Besnerais.

Participation à quatre jurys de thèse de Xavier MININGER (SATIE-ENS Cachan) comme examinateur et trois en tant que co-encadrant ;

Participation à un projet européen 'EPOCH' [CR3]

Montage et participation à deux projets 'PREDIT II: 'Onix du Futur' [CR5], et 'PREDIT III : PROSODIE' [CR11].

Membre de la 'commission mixte IUT' concernant le recrutement des MdC à l'IUT (jusqu'en 2002) ; **Membre** de la commission des spécialistes de l'ENSAM (depuis 2005) ; **Membre** nommé au conseil du laboratoire de 2002 à Juin 2005(L2EP) ; **Participation** au pôle I-Trans 'pôle formation'.

- *Réalisations de contrats industriels* :

11 Contrats & projets PREDIT et européen [96-06] : 845 k€ de budget total

Partenaires : Alstom-Transport d'Ornans, Tarbes & Charleroi, Petite-Forêt.

Bosch, Valéo, Jeumont-Framatome, Moteurs FOX (réalisation de quelques prototypes).

2) Curriculum Vitae Détaillé

ETAT CIVIL

HECQUET Michel,
38 ans, marié, 3 enfants
Nationalité : française.

Maître de Conférences à l'I.U.T.A de Lille au dépt. Génie Electrique et Informatique Industrielle (GEII), nommé en sept.95 et titularisé en sept.96.

Discipline : Electrotechnique (63^{ème} section)

FORMATION

Janv. 95 : **Doctorat en Génie Electrique**, mention Très honorable avec les félicitations
Titre de la thèse : "Contribution à la modélisation des systèmes électrotechniques par la méthode des schémas équivalents magnétiques. Application à l'alternateur automobile" Université des Sciences et Techniques de Lille (USTL), encadré par le Professeur P. BROCHET. (L2EP)

Jury :

Mr Séguier G., Professeur Emérite à l'U.S.T.Lille (président)

Rapporteurs :

Mr Crappe M., Professeur à la Faculté Polytechnique de Mons,

Mr Jufer M., Professeur à l'Ecole Polytechnique de Lausanne,

Examineurs :

Mr Léger, Valéo-alternateur et Mr Nakhle, Cisi-ingénierie.

Mr Brochet P., Professeur à l'Ecole Centrale de Lille-L2EP.

Mr Rombaut C., Professeur à l'Ecole Centrale de Lille-L2EP.

Juin 91 : **D.E.A. Génie Electrique** au L.2.E.P. de Lille.
Sujet : Moteur Asynchrone alimenté en courant (encadrant : JF Brudny)

Juin 90 : **Maîtrise E.E.A.** option Electronique de Puissance à l'USTL.

Juin 89 : **Licence E.E.A.** à l'USTL

Juin 88 : **D.U.T. Génie Electrique** à l'I.U.T. de Béthune

Juin 86 : **Bac F3 (Electrotechnique)** au Lycée Blaise Pascal à Longuenesse

DEROULEMENT DE CARRIERES

- 1995-... : ***Maître de Conférences*** à l'I.U.T.A de Lille et membre du laboratoire L2EP dans l'équipe C.O.M.E. (Conception et Optimisation des Machines Electriques)
 Charge : 200h TD en électrotechnique
 Cours, TD et TP d'électrotechnique au 2^{ème} année de la formation initiale, en formations continue et à distance ou multimédia.
 Encadrement de projets tuteurés et de stages de fin de promotion.
- 1994-1995: ***Vacataire*** à l'Institut de Génie Informatique et Industrielle I.G.2I.
 150h TP en électronique et en logique
 50h TP en électrotechnique et en électronique de puissance
 30h TP en capteurs
- 1993-1994: ***Vacataire*** à l'Ecole Centrale de Lille (20h cours et TD sur la modélisation des systèmes électrotechniques),
 à l'U.S.T.L.-Licence EEA (20h TP électrotechnique),
 à l'E.I.P.C. (54h TP d'électronique),
 à l'Ecole Universitaire Des Ingénieurs de Lille-EUDIL (24h TD d'électrotechnique)
- 1992-1993: ***Attaché Temporaire à l'Enseignement et à la Recherche (A.T.E.R.)*** à l'Université des Sciences et Techniques de Lille (USTL)
 192h équivalent T.D. en électrotechnique et électronique de puissance en licence EEA et maîtrise EEA.
- 1991-1992: ***Vacataire*** à l' I.U.T. de Béthune
 80h de TP et TD en informatique
- 1990-1991: ***Vacataire*** à l' I.U.T. A de Lille I
 75h de TP en électrotechnique.

3) Activités Pédagogique et Administrative

Trois parties y sont présentées :

- mes fonctions pédagogiques,
- mes fonctions administratives et autres,
- mes perspectives sur ces activités.

FONCTIONS PEDAGOGIQUES

Nommé à l'*I.U.T. A de Lille* en septembre 1995 au département Génie Electrique, il m'a été confié l'enseignement d'électrotechnique en 2^{ème} année formation initiale, en formations continue et à distance ou sur mesure. Ces enseignements en électrotechnique concernent surtout les machines électriques : de la machine à courant continu (MCC) jusqu'à la machine asynchrone (MAS) en passant par la machine synchrone (MS) et le moteur pas à pas. Le nombre d'heures par groupe d'élèves étant relativement faible (12h de cours magistraux et 14h de TD), les points essentiels sont présentés tels que comprendre les principes de base sur le fonctionnement des machines tournantes, définir un modèle équivalent avec ces hypothèses.

Pour les enseignements en *formation continue*, l'approche est différente. En effet, les notions de cours et TD sont abandonnées au profit d'un enseignement global permettant une approche pédagogique différente. De plus, la qualité humaine des contacts avec l'auditoire m'a apporté énormément, me permettant d'améliorer et d'enrichir mes cours.

Durant mes premières années, je me suis particulièrement impliqué pour la remise aux normes de la salle TP (achat de nouveaux bancs didactiques et remise aux normes des tables) mais aussi pour l'amélioration et l'évolution des TP. Ainsi, de nouvelles manipulations ont été introduites sur les sujets suivants :

- association d'une MAS, d'un frein à poudre et de son simulateur de charges mécaniques. Le but de ce TP est d'étudier les différentes caractéristiques du couple utile d'une MAS en fonction de l'allure du couple résistant.
- association d'un variateur MLI (modulation de largeurs d'impulsions) à tension V sur la fréquence f égale constante avec une MAS et une dynamo-balance. L'étude du variateur, formes d'ondes envoyées sur le moteur et la programmation des paramètres, ainsi que l'évolution du couple utile en fonction de différentes fréquences sont à étudier.
- association d'un variateur monophasé avec deux ponts tout thyristors reliés tête-bêche et d'une MCC. L'intérêt est de montrer la possibilité de travailler dans les 4 quadrants et donc de contrôler la décélération. L'utilisation d'un capteur de puissance instantanée relié à un oscilloscope nous permet de montrer le sens de transfert de l'énergie.

Depuis quelques années, j'interviens aussi en travaux dirigés de 1^{ère} année sur les réseaux monophasés et triphasés, les circuits magnétiques et les transformateurs, sur la machine à courant continu (MCC) et les redresseurs.

Ces trois dernières années, *un CD-ROM* a été réalisé reprenant mon cours avec de nombreuses illustrations contrairement à un polycopié, ainsi qu'un nombre important de photos et d'animations, par exemple sur les champs tournants. Celui-ci est disponible dans un centre de ressources pour une consultation sur place.

Depuis 2 ans, après de nombreuses discussions avec mes collègues du département, je me suis intéressé à l'apport *d'un outil éléments finis* (achat de FLUX-2D Studio) au sein de l'IUT. La mise en place d'une formation en interne fut nécessaire avec la présentation des différents modules, de la thermique à l'électrocinétique en passant bien évidemment par l'électromagnétisme. L'outil sert actuellement en salle de travaux dirigés comme illustration de cours mais aussi pour des vérifications de calculs analytiques comme par exemple le calcul de l'induction dans un circuit magnétique ou le calcul de la force d'attraction sur un contacteur.

Enfin, le suivi des stages de fin d'année et l'encadrement de projets tuteurés en 1^{ère} année font également partie de ma tâche. Les relations industrielles nouées grâce à mes activités de recherches m'ont permis de proposer régulièrement aux élèves des stages de fin d'année (1 à 2 sujets par an) chez l'industriel ou au sein du L2EP dans les locaux de l'Ecole Centrale de Lille.

Enseignement à l'Ecole Centrale de Lille :

Depuis 4 années, j'interviens en dernière année pour l'option 'Génie Electrique' sur les '*bruits & vibrations dans les machines électriques*' mais aussi dans l'encadrement de projets liés à mes activités de recherche.

Enseignement en Master E2D2 (Energie Electrique et Développement Durable) à l'USTLille :

Depuis 2 années, mon implication en master 'recherche' se traduit par une intervention sur '*l'optimisation par plans d'expériences*'. Cette activité est décrite dans mon dossier 'recherche'.

FONCTIONS ADMINISTRATIVES ET AUTRES

Outre mes activités d'enseignement, après 10 ans d'activités à l'IUT.A de Lille au dépt. GEII, plusieurs responsabilités me furent confiées :

- **Membre de la 'commission mixte IUT'** concernant le recrutement des MdC à l'IUT (1998 - 2002)

Examens de dossiers de candidatures pour un poste de maître de conférences et ATER.

- ***Membre de la commission de pilotage*** en vue de la reconstruction de l'IUT (réalisation pour Sept. 2006).
Suivi, coordination et mutualisation des futurs salles du pôle 'Génie Electrique'
Achat de nouveaux bancs pour le pôle (bancs d'électrotechnique, bancs pour le module 'énergies renouvelables')

- ***Responsable des dossiers d'admission*** à l'IUT – département GEII depuis 2004.
Suivi, coordination et examen des dossiers d'admission 1^{ère} année.
En 2006, suivi, coordination et examen des dossiers d'admission en licence professionnelle 'MTG'

- ***Encadrement de projets*** tuteurés (1ère année) et de stages de 2ème année à l'IUT.

- ***Organisation de la Journée 'Portes Ouvertes'*** :
Organisation de la journée avec des étudiants et d'autres collègues. Je me suis particulièrement impliqué à la réalisation des journées « portes ouvertes » de l'IUT depuis ces dernières années. Je participe aussi régulièrement à des activités de représentation de l'I.U.T., notamment au salon de l'étudiant, dans les forums d'orientation lycéens régionaux et aux tremplins-jeunes.

- ***Responsabilité de la licence professionnelle (habilitée depuis février 2006)***
En collaboration avec le lycée Colbert de Tourcoing qui avait établi de nombreux contacts avec des industriels (RATP, SNCF, Transpole...) dans le cadre de leur DNTS, j'ai pris la ***responsabilité du montage du dossier d'habilitation et la responsabilité pédagogique d'une licence professionnelle*** intitulée 'Maintenance des transports guidés' : ouverture depuis Septembre 2006 (dossier déposé en octobre 2005 – habilité en février 2006).
En effet, ce projet présente un lien fort entre mes activités de recherche : Projet « CNRT-FUTURELEC3 » détaillé dans la partie 'recherche' avec un soutien industriel (Alstom). Nous espérons inscrire cette formation au travers du pôle « I-Trans » (<http://www.i-trans.org>): pôle de compétitivité 'transport ferroviaire' reconnue par le ministère depuis Juillet 2005 (dépôt de dossier le 15 avril 2006 à « I-Trans » en vue de la labellisation de la formation).

Autres responsabilités en dehors de l'IUT :

- ***Participation au développement du serveur L2EP*** (98-99).

- ***Membre de la commission des spécialistes*** de l'ENSAM depuis décembre 2004.

- ***Membre nommé au conseil du laboratoire (L2EP)*** (2002-2005)

- ***Participation au pôle I-Trans « aspect formation »***. (2006-...)

BILAN & PERSPECTIVES SUR L'ENSEIGNEMENT EN ELECTROTECHNIQUE

L'enseignement de l'électrotechnique devient une tâche difficile à l'heure actuelle. En effet, de plus en plus, il est nécessaire d'intégrer les aspects 'systèmes'. Par conséquent, de nombreux phénomènes physiques (électrique, thermique, acoustique...) peuvent intervenir et de nombreuses composantes du génie électrique apparaissent comme l'électronique de puissance, l'automatique, l'informatique, la métrologie, voire d'autres sciences comme la thermique ou la mécanique.

Il deviendra donc de plus en plus important dans les années à venir de maîtriser ces notions nous permettant d'intégrer par exemple le composant 'moteur + convertisseur' dans une chaîne de traction quelconque, en ayant connaissance des différentes contraintes existantes.

Ce caractère multi-physiques correspond parfaitement aux différents projets 'recherche' de notre équipe COME, permettant ainsi de renforcer les transferts pédagogiques.

Les différentes responsabilités prises au sein de mon établissement me paraissent en bonne adéquation avec mon activité de recherche. Ainsi, mes perspectives sur la partie pédagogique sont les suivantes:

- Etendre l'utilisation d'outils comme Flux2d-Studio pour la physique, la thermique...
- Améliorer le CD-Rom reprenant mes différents cours afin de pouvoir le transposer à l'utilisation pour IUT en Ligne.
- Assurer le développement de la licence professionnelle « M.T.G. » et les liens avec nos partenaires industriels et le pôle « I-Trans ». *Ouvrir la formation par apprentissage* dès la rentrée 2007.
- Renforcer les transferts pédagogiques : lien entre mes différents projets « recherche » et mon enseignement.

4) Activités Scientifiques

L'objectif de cette partie est de présenter sous la forme d'un résumé, mes activités de recherches, celles-ci étant détaillées dans le dossier « recherche ».

Elle permet de plus de positionner mes activités de recherches par rapport à celle de notre laboratoire, le L2EP : Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille dirigé par le professeur JP. HAUTIER.

PRESENTATION DU L2EP ET DE L'EQUIPE COME

Une rapide présentation du L2EP extraite du rapport d'activités est faite, permettant ensuite d'introduire notre équipe et plus particulièrement mes travaux.

Les travaux du laboratoire s'inscrivent dans les grandes thématiques du Génie Electrique, le Traitement de l'Energie Electrique et la Conversion ElectroMécanique, allant des outils et des formalismes, pour la modélisation et la conception, aux aspects technologiques de la matérialisation et de la mise en œuvre.

Cinq équipes, présentées ci-dessous, forment le L2EP dont les dénominateurs communs sont bien inscrits en terme de Modélisation et Conception autour de deux grands thèmes :

- **Thème 1 : L'étude des systèmes électrotechniques dans leur environnement**
- **Thème 2 : L'étude des composants de conversion électrique et électromécanique**

Les équipes de recherche sont :

- Equipe Commande des Electromécanismes et Systèmes Couplés (CEMASYC)
- Equipe Réseaux Electriques et Systèmes Energétiques (RESE)
- Equipe Modélisation Etude Conception de Systèmes Electromagnétiques (MECOSYEL)
- **Equipe Conception et Optimisation des machines Electriques (COME)**
- Equipe Electronique de Puissance (EP)

Rattachée à l'équipe CEMASYC:

- Equipe de Recherche Technologique (ERT Int 1022) Commande et Entraînements des Machines Outils à Dynamique Elevée, en collaboration avec le Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal et le Laboratoire de Mécanique de Lille et en partenariat avec le CETIM et la société NUM.

Ces équipes constituent ainsi un ensemble de 70 personnes :

- 30 enseignants chercheurs, soit 11 professeurs dont 1 professeur émérite, 18 maîtres de conférences et enseignants chercheurs assimilés, 1 professeur agrégé,
- 26 doctorants,
- 12 ingénieurs, techniciens et personnels administratifs,
- 2 à 3 attachés temporaires d'enseignement et de recherche.

Mes activités de recherche sont réalisées au sein de l'équipe C.O.M.E. « Conception et Optimisation des Machines Electriques » dirigée par le professeur Pascal BROCHET.

L'équipe est constituée d'1 professeur, de 4 maîtres de conférences (Aymeric ANSEL (50%) Stéphane BRISSET, Frédéric GILLON et Michel HECQUET), et de 9 doctorants (oct. 2005).



Photo : octobre 2004

(Equipe COME)

Au sein de l'équipe, trois axes peuvent être identifiés et conditionnent la maîtrise de la démarche de conception. Il faut les explorer simultanément : l'axe modélisation, l'axe méthodologie, l'axe caractérisation. Nous avons choisi d'explorer et d'occuper ces axes avec une grande amplitude dans le but de rechercher la bonne adéquation entre les modèles et les méthodes développées.

Ainsi, nos travaux se déploient dans trois directions :

- ☐ Le prototypage virtuel, c'est à dire la modélisation la plus fidèle des machines électriques et des phénomènes physiques qui s'y produisent.
- ☐ La conception optimale, intégrant les aspects 'optimisation de dispositifs électrotechniques' mais aussi le 'développement d'outils'.
- ☐ La réalisation et la caractérisation de prototypes réels pour le calage des modèles.

(voir plaquette de l'équipe en annexe 2)

Ces axes de progrès sont indissociables les uns des autres. Les modèles des machines et les méthodes d'optimisation doivent être en bonne adéquation afin de sécuriser et fiabiliser le processus de conception optimale. Quant à la vérification expérimentale, elle reste incontournable pour l'évaluation de l'intérêt des démarches proposées.

La figure 1 montre que pour l'équipe, mais aussi pour le L2EP, les termes '**Modélisation et Conception**' apparaissent comme des liens vectoriels entre le domaine des systèmes énergétiques réels et celui des modèles associés. Selon le thème abordé, modélisation et conception ne sont ni de même finesse, ni de même nature.

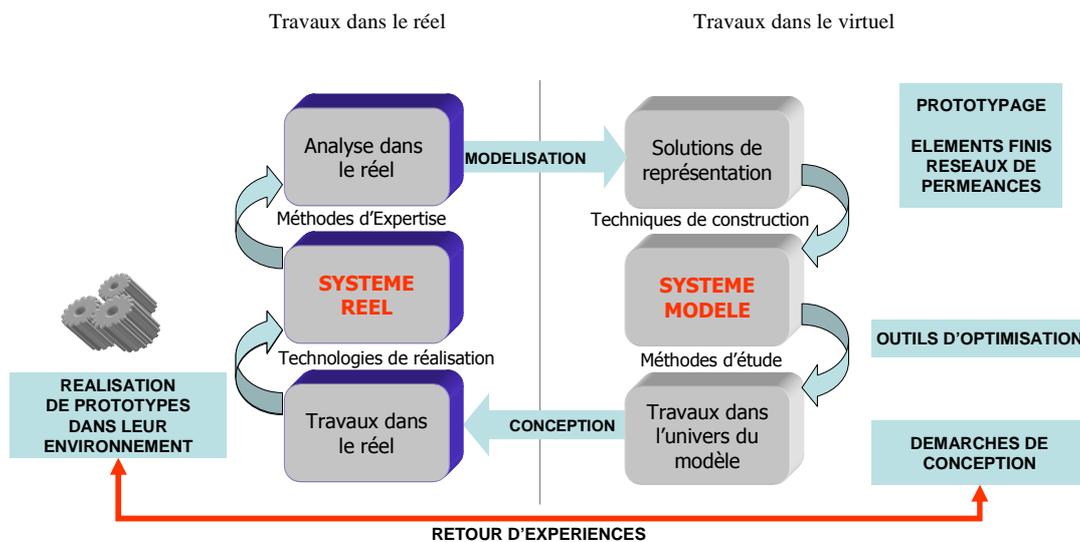


Figure 1 : Modéliser et concevoir.

Mes activités reprennent ces idées, apportant une contribution à la démarche de conception des machines électriques détaillée dans le point suivant.

POSITIONNEMENT ET THEMATIQUE DE RECHERCHE

Mes activités de recherche se sont déployées sur ces 3 axes, avec pour chacun d'eux un apport original permettant de contribuer à ce que nous avons appelé : « l'instrumentation de la démarche de conception des machines électriques »

- Le « prototypage virtuel » :
 - *Modélisation par 'Réseau de Perméances',*
 - *Modélisation multi-physiques.*
- La conception optimale et le développement d'outils associés :
 - *Méthodologie des plans d'expériences et stratégies d'optimisation,*
 - *Développement d'outils : logiciels DIVA, TURBO-TCM, SOPHEMIS.*
- La caractérisation et la réalisation de bancs expérimentaux :
 - *Mesures électriques et vibro-acoustiques (Analyse Modale Expérimentale : A.M.E. et l'Analyse Modale Opérationnelle : A.M.O.)*
 - *Le développement de prototypes : banc test pour alternateur à griffes, machines asynchrones et synchrones à aimants pour la traction ferroviaire, machine synchrone à rotor bobiné (turbo-alternateur)*

Ces activités m'ont amené à travailler avec de nombreux partenaires industriels comme :

- Valéo Alternateur (Créteil),
- Alstom-Transport (Petite-Forêt, Ornans, Tarbes & Charleroi),
- Jeumont Framatome (Jeumont),
- Moteurs FOX (Tourcoing),

notamment dans le cadre du CNRT (Centre National de Recherche Technologique) Génie Electrique intitulé 'Réseaux et Machines du Futur'.

Ces relations fortes et nos différents travaux ont permis de définir le programme FUTURELEC2 intitulé « *architecture des machines électriques et développements (ARCHIMED)* » et FUTURELEC3 intitulé « *Machines Electriques à Faible Impact Environnemental pour les Transports du Futur* » qui regroupent plusieurs projets et partenaires (<http://www.univ-lille1.fr/l2ep/cnrt/cnrt.htm>), dont je suis le coordinateur.

Ces différentes activités ont contribué à la reconnaissance de l'équipe COME au niveau national et international : participation au GDR, nombreuses collaborations internationales et projet européen EPOCH.

Elles ont donné lieu à *différentes thèses et stages de master ainsi qu'à différents contrats industriels*. Ces différents points sont développés dans la partie II.

ENCADREMENT (THESES – DEA / POST-DOC / ...)

Thèses soutenues:

[Th.1] **VIVIER Stéphane** – ‘*Stratégies d’optimisation par la technique des plans d’expériences et Application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis*’,
Oct.98 à Juillet 2002 (dont 1 an de service militaire),

Bourse MESR

Encadrement : **50%** avec Prof. BROCHET Pascal (50%)

5 Revues [R8,R9,R11,R12,R13] + 7 conférences internationales + 1 nationale.

Résumé :

Cette thèse portait sur l’application de la Méthode des Plans d’Expériences (MPE) à l’étude et à l’optimisation de dispositifs électrotechniques. La modélisation éléments finis est l’outil d’analyse privilégié, fournissant les prototypes virtuels des dispositifs étudiés.

La MPE est un ensemble d’outils et de méthodes algébro-statistiques visant à établir et analyser les relations existant entre les grandeurs étudiées (*réponses*) et leurs sources de variations supposées (*facteurs*).

Cette analyse peut être qualitative : *étude de screening* (détermination des facteurs influents) ou quantitative : *méthodologie des surfaces de réponses* (variation des réponses en fonction des facteurs influents). Dans tous les cas, elle a pour but la détermination de modèles mathématiques approchés des réponses exprimées en fonction des facteurs. Ces modélisations sont déduites des valeurs obtenues à l’issue de séries de simulations : les *plans d’expériences*.

Les multiples facettes de la Méthode des Plans d’Expériences servent alors de fondement au développement de stratégies d’optimisation. Plusieurs algorithmes utilisent les plans d’expériences de façon exclusive pour la modélisation des réponses ainsi que pour la recherche des conditions optimales. L’utilisation de la MPE fait alors apparaître des aspects particuliers, comme par exemple la réutilisation d’expériences entre plusieurs plans, dans le but de minimiser le nombre total de simulations.

Enfin, un outil (SOPHEMIS) rassemblant ces différentes stratégies a été réalisé et testé sur différents dispositifs : un moteur brushless à aimants permanents, deux bobines supraconductrices (cas test 22 du T.E.A.M. Workshop) et un frein linéaire à courants de Foucault à usage ferroviaire.

[Th2] **AIT-HAMMOUDA Amine** – ‘*Prédimensionnement et étude de sensibilité vibro-acoustique des machines à courants alternatifs et à vitesse variable*’,

Février 2002 à Mars 2005,

Thèse CIFRE avec ALSTOM-TRANSPORT Ornans.

Encadrement : **33%** avec Prof. BROCHET Pascal (33%)

et Marc GOUEYGOU – **IEMN** groupe vibro-acoustique (33%)

4 revues [R10,R11,R13,R14] + 7 conférences internationales + 2 nationales.

Résumé :

Le fonctionnement des moteurs pour la traction ferroviaire, à vitesse variable, s'accompagne d'une production inévitable de vibrations et de bruit. Ceux-ci peuvent être gênants pour la machine elle-même, mais aussi pour son environnement. Il est donc nécessaire pour le constructeur d'en tenir compte dès la phase de conception.

Pour cela, l'objectif fut la définition d'un modèle multi-physiques paramétré de type analytique, prenant en considération des phénomènes électromagnétiques mais aussi vibro-acoustiques. Des validations par des calculs éléments finis électromagnétiques et mécaniques ainsi que des comparaisons expérimentales confirment la prédiction du modèle.

Enfin, pour atteindre l'objectif de concevoir une machine sous contrainte de réduction du niveau acoustique, la technique des Plans d'Expériences est employée. L'intérêt est de pouvoir traiter un nombre important de facteurs et d'en déduire par la phase de Screening les facteurs influents. Un prototype a été réalisé de puissance 250kW par la société Alstom-Transport présentant un bon compromis entre performance et bruit rayonné d'origine électromagnétique.

Thèses en cours:

[Th3] **PETRICHENKO Dmitry** – ‘*Contribution à la modélisation et conception optimale des turbo-alternateurs en utilisant les réseaux de perméances*’,

Déc.2002 à Juin 2006,

Thèse CNRT en relation avec JEUMONT-FRAMATOME.

Encadrement : **50%** avec Prof. BROCHET Pascal (50%)

1 revue [R15], 5 conférences internationales.

Résumé :

Cette thèse concerne la mise au point d'un outil de conception optimale électromagnétique de machine synchrone à rotor lisse feuilleté, du modèle numérique d'une part, d'un progiciel sur PC d'autre part. L'outil de CAO développé concerne des turboalternateurs de 10 à 100 MW et utilise un modèle 'réseau de perméances' paramétré.

La méthodologie employée repose sur la 'Tooth Contour Method' encore appelée 'Méthode de contours de dents' permettant d'obtenir de façon précise et rapide les perméances d'entrefer. Le réseau de perméances complet est déterminé à partir des données géométriques.

L'outil réalisé, nommé Turbo-TCM, permet de prendre en considération différents phénomènes : la prise en compte des événements, les têtes de bobines, le bobinage (prise en compte des isolants et des cales entre plans), la présence ou non de cales d'encoche magnétiques ou semi-magnétiques, les effets de saturation importante, le mouvement de rotor et le couplage électrique-magnétique-mécanique.

Enfin, les originalités de l'outil sont l'obtention d'un réseau de perméances *complètement automatisé* à partir de la fiche signalétique de la machine et des dimensions extérieures, la possibilité de prendre en considération *des formes complexes* (différentes formes d'encoches par exemple), d'apporter un *bon compromis temps de calcul –précisions*, la possibilité d'intégrer les *variations de la géométrie* et

par conséquent d'envisager *une étude de sensibilité*, voire une optimisation. Enfin, la topologie du réseau est à *discrétisation variable*, permettant de renforcer par exemple le réseau dans les zones saturées.

Des simulations en statique pour un point de fonctionnement peuvent être effectuées, mais aussi en dynamique, afin de fournir les harmoniques des grandeurs de sortie comme la f.e.m.. L'outil a pu être validé sur un premier prototype de puissance réduite (3kW), puis sur des machines 2 pôles et 4 pôles à vide. Des simulations en charge ont été présentées apportant un bon compromis temps de calcul – précision.

[Th4] **BUJACZ Slawomir** – ‘*Modélisation vibratoire et acoustique des machines synchrones à aimants permanents alimentée par MLI. Application à la conception optimale sous contrainte de réduction du bruit et des vibrations d'origine électromagnétique*’,

Oct. 2004 à Oct. 2007,

Thèse en cotutelle, relation avec l'Université T.U.G de Gdansk, Pologne.

Financement Pologne + Bourse EIFFEL sur 1 an

Encadrement : **33%** avec Marc GOUEYGOU – **IEMN** (33%)

avec Prof. PIWAKOWSKI Bogdan – **IEMN** (33%)

2 conférences internationales

Résumé :

Application à une machine synchrone à aimants de surface et/ou enterrés ;

Alimentation MLI pris en considération ;

Modèle vibro-acoustique amélioré [ref. Thèse d'Ait-Hammouda] par l'utilisation d'un code E.F.

Couplage du modèle multi-physiques avec un superviseur d'optimisation,

Optimisation vibro-acoustique de ces 2 types de machines synchrones à aimants.

[Th5] **LE BESNERAIS Jean** – ‘*Optimisation vibro-acoustique d'une chaîne de traction ferroviaire*’,

Dec.2005 à Dec.2008,

Thèse PREDIT III en relation avec Alstom-La Rochelle & Charleroi.

Encadrement : **33 %** avec Pascal BROCHET (33 %)

et avec Vincent LANFRANCHI – **UTC Compiègne – L.E.C.** (33 %)

2 conférences internationales et 1 nationale

Résumé :

Etude vibro-acoustique d'une chaîne de traction ferroviaire,

Etude de l'ensemble ‘*convertisseurs + dispositifs électrotechniques*’ : Transformateur + convertisseurs + moteurs + réducteurs (par exemple).

Participation à l'encadrement de thèses :

[Th6] **BARRE Olivier** – ‘*Contribution à l'étude des formulations de calcul de la force magnétique en magnétostatique, approche numérique et validation expérimentale*’,

Soutenance en décembre 2003, (Agrégé)

Encadrement : P.BROCHET (Prof. –L2EP)

Participation aux calculs de forces sous OPERA,

1 revue [R16], 1 conférence ORALE au congrès COMPUMAG'2005.[CI.10]

[Th7] **FASQUELLE Aurélie** – ‘*Optimisation vibro-acoustique, thermique et aéraulique des machines de traction ferroviaire utilisées à vitesse variable*’,

Oct. 2004 à Oct. 2007,

Thèse CNRT en relation avec ALSTOM-TRANSPORT.

Encadrement : **20%** avec P.BROCHET (Prof. –L2EP) / S.HARMAND (Prof. – **LME Valenciennes**) / S. BRISSET (MdC – L2EP) & A. ANSEL (Enseignant-Chercheur à HEI)

2 conférences internationales

DEA [D..] / Post-docs [P...] / Elèves ingénieurs (projets significatifs) [E...]:

- [D 1] VEYNE Stéphane. (élève ingénieur ECL, élève DEA)
Etude de l'évolution des perméances d'entrefer d'une machine tridimensionnelle.
Soutenance en juin 94.
- [D 2] DAHEL Sahnoun (ingénieur Algérien)
Etude d'une machine à griffes par réseau de perméances
DEA effectué à l'Université Libre de Bruxelles, stage de 3 mois au L2EP.
Soutenance en juin 98.
- [D 3] REANT Denis (maîtrise EEA, élève DEA)
Optimisation d'un frein linéaire à courant de Foucault par la méthode des plans d'expériences.
Soutenance en juin 99.
- [D 4] DAHEL Sahnoun (ingénieur algérien, élève DEA)
Optimisation de la forme des griffes d'un alternateur automobile en vue de réduire les Vibrations d'origine électromagnétiques.
Etude en relation avec Valéo-Alternateur (Appel d'offres régional)
Soutenance en juin 99.
- [D 5] VANDEN HENDE François (ingénieur ENSAM, élève DEA)
Optimisation d'un dispositif de frein linéaire à courant de Foucault en vue d'une application au T.E.R. NG.
Soutenance en juin 2000.
- [D 6] AIT HAMMOUDA Amine (ingénieur algérien, élève DEA)
Etude vibratoire d'une machine synchrone à griffes. Corrélation forces-vibrations et bruit.
Soutenance en juin 2001.
- [D 7] LINIER Stéphane (Maître EEA, élève DEA)
Etude par réseaux de perméances d'un démarreur automobile.
Soutenance en juin 2002.
- [D 8] HAMZA Bessai (Ingénieur algérien, élève DEA)
Etude de sensibilité vibro-acoustique d'une machine asynchrone à vitesse variable.
Soutenance en juin 2004.
- [E 1] D.YAO & D. BORNAREL (ingénieurs HEI)
Corrélation 2D-3D d'un frein linéaire à courant de Foucault.
Soutenance en mars 2001.
- [E 2] JOUGUET Arnaud (Elève Ingénieur Ecole Centrale de Lille)
Modeling of a DC-machine with the method of the magnetic equivalent circuit,
Stage chez Bosch-Gmbh sur les démarreurs automobiles,
Soutenance en septembre 2003.
- [E 3] BONNET David (Elève Ingénieur ENSIL - Limoges)
Contribution à la réalisation d'un outil de conception de turboalternateurs 4 pôles
Stage chez Jeumont-Framatome sur les turbo-alternateurs,

Soutenance en septembre 2005.

[P 1] LEE Sang-Jin. (post-doc Coréen) : **durée 1 an**

Etude d'un frein linéaire à courant de Foucault par la méthode des éléments finis 3D.

Etude en relation avec Alstom-Transport.

Année 96-97.

[P 2] NAPAME Bellemain. (post-doc Russe) : **durée 1 an**

Analyse modale expérimentale avec PULSE et validation par ANSYS sur des machines de traction : machines synchrones à aimants et machines asynchrones.

Etude en relation avec Alstom-Transport (projet 'ONIX du Futur')

Année 2003-2004.

[P 3] AIT-HAMMOUDA Amine. (post-doc) : **durée 7 mois**

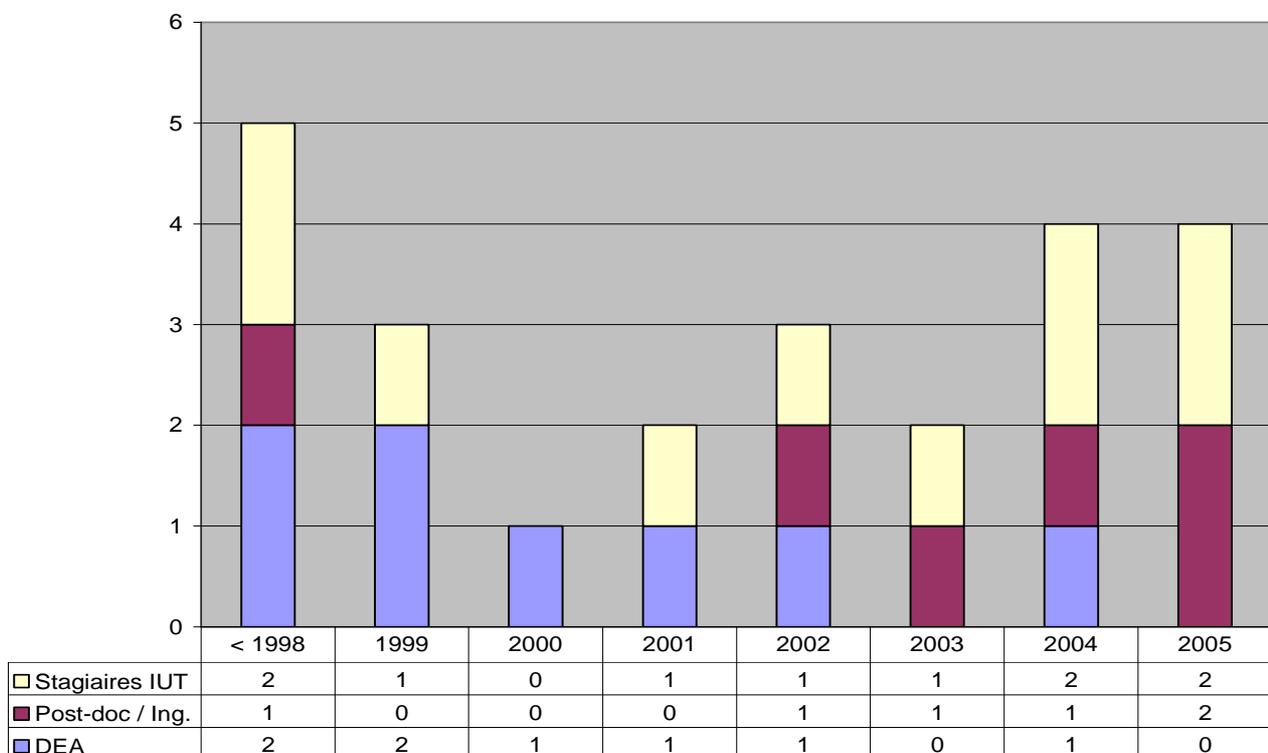
Exploitation de l'outil DIVA (Dimensionnement Vibro-Acoustique de machines électriques) pour différentes gammes de machines de traction : du TER au TGV.

Etude en relation avec Alstom-Transport (projet 'Futurelec3-opération1')

Année 2005.

Bilan sur l'encadrement: Ci-dessous, un graphe par année des personnes encadrées en y ajoutant *les stagiaires IUT Génie Electrique – Mesures Physiques ou Informatique* en fonction des projets à réaliser.

Ces stagiaires IUT ont permis d'assurer la partie 'mesures expérimentales' sur des bancs spécifiques ou alors le développement d'outils informatiques concernant le pré ou post-processing.



Bilan des encadrements (ajouts des stagiaires IUT)

ACTIVITES CONTRACTUELLES

Responsabilités de contrats industriels :

[CR.1] « Définition d'un frein linéaire à courant de Foucault. Application au TGV »

ALSTOM TRANSPORT, Ornans, Période : 1996-1997.

Appel d'offres Nord-Pas-de-Calais

Budget : 250 kF (38 k€)

M. HECQUET, P. BROCHET

S.J LEE (POST-DOC)

P. DELSALLE (Alstom- Ornans)

Objectif : Etude de faisabilité sur les freins linéaires à courant de Foucault appliqués au TGV. Définition d'un modèle éléments finis 2D équivalent et définition d'un modèle 3D statique, simulations et comparaisons avec un banc 'test'.

[CR.2] « Optimisation de la forme des griffes d'un alternateur automobile »

VALEO, Créteil, Période : 97 à 2000

2 contrats dont un financé par la région Nord-Pas-de-Calais et un par Valéo.

Budget : 270 kF (41 k€)

M. HECQUET, P. BROCHET

S. DAHEL (DEA à U.L.Bruxelles + DEA au L2EP)

E. PELLE (Valéo- Créteil)

Objectif : Simulation de plusieurs gammes d'alternateurs par un réseau de perméances 3D (suite de ma thèse), réalisation d'un banc permettant de changer aisément le rotor à griffes.

Plans d'expériences réels et numériques afin de valider une forme de griffes permettant de réduire le niveau acoustique.

[CR.3] « EPOCH : Electromagnetic Product Optimisation using Computers with High Performance »

Projet **E.P.O.C.H., programme ESPRIT**, Période : 1998-1999.

C. FURMANIAK (CDD 1 AN),

F. GILLON, M. HECQUET, P. BROCHET

Partenaires : Philips (NL), Ansaldo Energia (I), Moulinex (F), Vector Fields (GB), Oxford Parallel (GB), University of Genova (I), Labein (E), L2EP (F).

Objectif : Développement d'outils pour l'optimisation de dispositifs électrotechniques. Application au frein linéaire à courant de Foucault.

[CR.4] « Optimisation d'un frein linéaire à courant de Foucault pour les TER NG »

ALSTOM TRANSPORT , Petite-Forêt, Période : 1999-2001.

Appel d'offres Nord-Pas-de-Calais

Budget : 350 kF (53 k€)

M. HECQUET, P. BROCHET

D. REANT (DEA)

INGÉNIEUR HEI...

F. VANDEN HENDE (DEA)

C. BONEILL (Alstom- Petite-Forêt)

Objectif : Définition d'un modèle éléments finis magnétodynamique 3D paramétré, optimisation par plans d'expériences : Utilisation de l'outil SOPHEMIS couplé à Opera-2D et 3D.

[CR.5] « Prédétermination du comportement vibro-acoustique d'une machine asynchrone et d'une machine synchrone à aimants permanents»

ALSTOM Transport, ORNANS, Convention CIFRE (thèse de Mr Ait-Hammouda),

Période : Fév. 2002-2005,

Convention Alstom – EC lille

Budget : 250 kF (38 k€)

M. GOUEYGOU (IEMN), M. HECQUET, P. BROCHET,

A. AÏT HAMMOUDA (**THESE**)

H. BESSAI (DEA)

A. RANDRIA – G. TRIPOT (Alstom-Ornans)

Objectif : Définition d'un modèle multi-physiques : électro-vibro-acoustique des machines de traction. Développement de l'outil DIVA.

Optimisation par plans d'expériences 'SOPHEMIS'.

[CR.6] « Identification de perméances d'entrefer dans les machines tournantes »

CONVENTION RECHERCHE BOSCH GMBH, Période : 2002-2003

M. HECQUET, P. BROCHET

S. LINIER (DEA),

A. JOUGUET (Ingénieur E.C.L.)

Objectif : Loi d'évolution des perméances d'entrefer pour un démarreur automobile.

Simulations et comparaisons avec des essais expérimentaux.

[CR.7] « Etude et réduction du bruit rayonné d'une machine synchrone de traction»

PROJET PREDIT II 'ONIX DU FUTUR', ALSTOM-TRANSPORT, TARBES – ORNANS

Période : Juin 2003 - 2005

Budget : 150 k€

M. GOUEYGOU (IEMN), M. HECQUET, P. BROCHET,

B. NAPAME (CDD – 1an)

Objectif : Optimisation vibro-acoustique d'une MS à aimants pour une application A.G.V..

Utilisation de l'outil PULSE (AME – AMO) de chez Bruel&Kjaer.

Analyse modale expérimentale d'une machine de traction.

Partenaires : LEEI (Toulouse), LEG (Grenoble), SUPELEC (Gif sur Yvette), LGP de l'ENIT (Tarbes), IERSET (Institut européen de recherche sur les systèmes électroniques pour les transports).

PROJET EN COURS :

[CR.8] « Contribution à la modélisation et à la conception optimale des turboalternateurs»
**PROJET ARCHIMED, CNRT ‘Réseaux et Machines Electriques du Futur’,
FUTURELEC2 -- JEUMONT-FRAMATOME**, Période : Déc. 2002 - 2006

Budget : 80 k€

M. HECQUET, P. BROCHET,

D. PETRICHENKO (**THESE**)

D. BONNET (Ingénieur Limoges)

D. LALOY – P. BRUTSAERT – JL. COUDERT (Jeumont – Framatome)

Objectif : Définition d’un modèle ‘réseau de perméances’ : utilisation de la Tooth Contour Method. Définition d’un outil de CAO des turboalternateurs de 10 à 100MW.

Couplage avec SOPHEMIS

[CR.9] « Conception et Optimisation multi-objectif : Electro-vibro-acoustique et thermique de machines électriques de traction»

PROJET FUTURELEC3 – OPERATION 1

CNRT ‘Réseaux et Machines Electriques du Futur’,

‘Machines Electriques à Faible Impact Environnemental pour les Transports du Futur’

Coordinateur : M. HECQUET.

ALSTOM-TRANSPORT, ORNANS

Période : Oct. 2004 - 2007

Budget : 92 k€

S. BRISSET, S. HARMAND (LME), M. HECQUET, P. BROCHET,

A. FASQUELLE (**THESE**)

2 CDD. : A. AIT-HAMMOUDA (7 mois) et D. SAURY (1 an).

Objectif : Etude thermique et aéraulique d’une MAS de traction. Définition d’un modèle multi-physiques : électro-vibroacoustique (lien avec la thèse de Mr Ait-Hammouda Amine) et thermique (LME). Optimisation multi-objectifs et multi-critères.

[CR.10] « Conception optimale systémique de chaines de traction ferroviaire»

PROJET FUTURELEC3 – OPERATION 2 (CNRT),

Coordinateur *: M. HECQUET.

ALSTOM-TRANSPORT, ORNANS

Période : Oct. 2004 - 2007

Budget : 175 k€ (203k€ avec Fonds propres) **2 thèses**

Thèse 1 : F. GILLON / A. ANSEL (HEI) / P. BROCHET / S. HARMAND

Thèse 2 : S. BRISSET / M. HECQUET / P. BROCHET

S. KREAWAN (**THESE 1**)

F. MOUSSOUNI (**THESE 2**)

2 CDD (1 an) : XX

Objectif : Deux sujets complémentaires sont proposés. Le premier s’intéresse aux développements de modèles adaptés à la démarche globale d’optimisation de la chaîne de traction et à la modélisation systémique tandis que le deuxième sujet approfondit les outils d’optimisation et méthodes nécessaires pour gérer des

problèmes de grandes dimensions avec des facteurs de types discrets et continus.

* La coordination de ces 2 projets [CR8, CR9] correspond à l'organisation de réunions régulières permettant *le suivi et la cohérence* des projets. De plus, le montage des dossiers : région pour les bourses des doctorants, FEDER / FRT ou ANR depuis sept.2005 m'ont permis d'acquérir une certaine expérience pour le financement de projets.

Sur ces 2 projets [CR9, CR10], 3 thèses ont été financées à 50% par la région NPDC et par l'industriel à 50%. Le co-encadrant direct est la personne en première position, c'est-à-dire, F.Gillon et S. Brisset qui sont aussi intervenus dans la définition du programme.

[CR.11] « PROSODIE : PROpulsion Silencieuse Optimisée Dimensionnée pour l'Environnement »
PROJET PREDIT III, ALSTOM-TRANSPORT, CHARLEROI – TARBES -LA ROCHELLE

Période : Oct.2005 – Oct.2008

Budget : 100 k€

M. HECQUET, O. BARRE, P. BROCHET,

V. LANFRANCHI (UTC – Compiègne - Equipe L.E.C. resp. GUY FRIEDRICH)

A. AIT-HAMMOUDA (ATER à L' UTC – Compiègne)

J. LE BESNERAIS (**THESE - CIFRE**)

Objectif : L'objectif global est d'aboutir au développement d'une chaîne de traction plus silencieuse grâce à la mise en œuvre d'outils d'ingénierie simultanée multi-métiers.

Ainsi, le développement de codes de simulations performants qui puissent s'intégrer dans une démarche globale de conception est nécessaire. Ce point requiert la participation de nombreux partenaires dont plusieurs branches d'Alstom.

Projet réalisé en collaboration avec l'équipe L.E.C. de l'U.T. Compiègne.

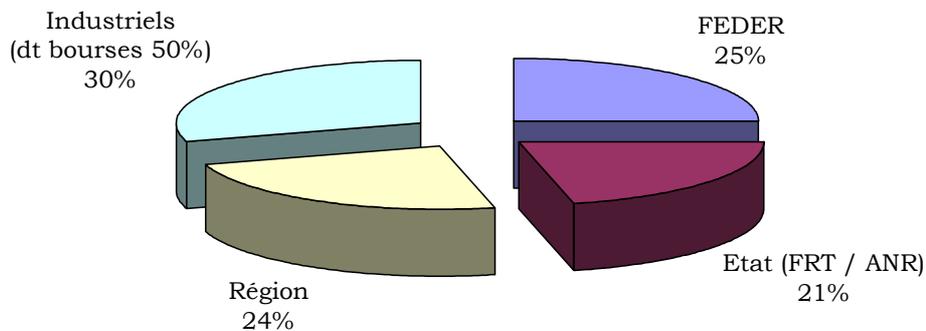
Partenaires : VIBRATEC (Lyon), EUROXA (Paris), l'UMPC (Laboratoire de Modélisation en Mécanique de Paris VI), L2EP, Alstom-Transport La Rochelle – Tarbes – Charleroi

Bilans financiers et humains :

	<i>contrats</i>	<i>budget total</i>	<i>DEA / ing. /post-doc.</i>	<i>Thésards</i>
Terminé	7	330 k€	8 DEA / 2 Ing. / 2 post-doc	2
En cours	2	172 k€	1 Ing. / 1 post-doc	2
Oct. 2005	2	345 k€	1 DEA	1
		total : 847 k€		

Sur ce budget total, il est intéressant de montrer la part fournie par les industriels en y ajoutant les 50% de financement des thèses (sur ce graphe, la bourse CIFRE de Mr Ait-Hammouda n'est pas comptabilisée).

Budget total : 847 k€ + 190k€ (bourses financées à 50% industriels)



RAYONNEMENT ET COLLABORATIONS SCIENTIFIQUES

AU NIVEAU NATIONAL :

[2000-2001] : Participation au GDR ‘Sûreté et Disponibilité des systèmes électrotechniques’ :
Calculs des efforts (forces radiales et tangentielles) appliqués à différentes parties du stator ou rotor d’une machine électrique. Mesures vibratoires et développement d’un banc expérimental : liens forces-vibrations-bruit. [CN 5, CN7]

[2001-....] : Collaboration avec IEMN – dépt. Vibro-Acoustique (M. GOUEYGOU) dans le cadre de la thèse de Mr Ait-Hammouda et de S. Bujacz.

[2003-2005] : Participation au projet ‘ONIX du FUTUR’ dans le cadre du PREDIT II
Collaboration avec 4 laboratoires universitaires : LEEI, LEG, SUPELEC, LGP (Tarbes)
Etude et réduction du bruit rayonné sur une machine synchrone à aimants [2003-2005]

[2004-2008] : Coordinateur du projet Futurelec3 dans le cadre du CNRT ‘Réseaux et Machines Electriques du Futur’ :
Objet : ‘Machines Electriques à Faible Impact Environnemental pour les transports du futur’.
Démarrage depuis Octobre 2004.
Montage des projets Futurelec3-op1 et op2 (LME / L2EP-COME)
3 Thèses, 5 CDD.
(1 résumé des 2 programmes est donné en annexe)

[2004-....] : Collaboration avec le LME dans le cadre de Futurelec3. Etudes thermiques et aérauliques des machines électriques de traction.
Thèse en commun d’Aurélie Fasquelle et participation aux contrats [CR9 - CR10]

[2005-2008] : Participation au projet ‘PROSODIE’ (PREDIT III)
‘PROSODIE : PROpulsion Silencieuse Optimisée Dimensionnée pour l’Environnement

Collaboration avec 1 laboratoire universitaire : LMMP (Laboratoire de Modélisation en Mécanique de Paris VI) + société VIBRATEC (Lyon)
Etude et réduction du bruit rayonné sur une chaîne de traction ferroviaire

[2005-...]: Collaboration avec l'UTC de Compiègne, équipe L.E.C., dans le cadre du programme 'PREDIT III' équipe L.E.C. (V. Lanfranchi – G. Friedrich),

Participation à quatre jurys de thèse :

- Xavier MININGER (SATIE-ENS Cachan) comme examinateur ;
- S. VIVIER, A. AIT-HAMMOUDA et Olivier BARRE en tant que co-encadrant ;

AU NIVEAU INTERNATIONAL :

[1998-1999] Participation à un projet européen 'EPOCH' :

Electromagnetic Product Optimisation using Computers with High Performance »
Projet E.P.O.C.H., programme ESPRIT, Période : 1998-1999.

Partenaires : Philips (NL), Ansaldo Energia (I), Moulinex (F), Vector Fields (GB),
Oxford Parallel (GB), University of Genova (I), Labein (E), L2EP (F).

Objectif : Développement d'outils pour l'optimisation de dispositifs électrotechniques.
Application au frein linéaire à courants de Foucault.

[2002-....] Collaboration avec le Moscow Power Engineering Institute (M.P.E.I.):

- Collaboration avec le MPEI de Moscou depuis 2002, service d'Electromécanique des Professeurs SMOLENKSY et KUZNETSOV.
- Accueil en thèse de M. Dmitry PETRICHENKO (Co-encadrement de la thèse débutée en décembre 2002)
- et de M. NAPAME sur l'étude 'ONIX du Futur', tous deux étudiants de MPEI.
- Accueil de A. MATEEV sur l'étude en relation avec CNRT 'Futurelec3-op1 BIS' (Octobre 2006)
- Visite régulière du prof. S. Kuznetsov. (E.C. Lille) : 2 mois / an

[2003-....] Collaboration avec le Technical University of Gdansk (T.U.G.) –Pologne

- Collaboration avec le TUG. de GDANSK, Professeur J. NIEZNANSKI. depuis 2003.
- Accueil en thèse (Cotutelle) de M. BUJACZ Slawomir débutée en oct. 2004, Obtention d'une bourse EIFFEL pour l'année 2005-2006.
- Accueil d'étudiants en Master (lien avec le professeur B. Piwakoswki, dept Electronique de l'Ecole Centrale de Lille)
- Visite du laboratoire d'Electrotechnique de l'Université de Gdansk.
- Invitation régulière (1 à 2 mois par an) du Prof. J. NIEZNANSKI à E.C.L. en collaboration avec l'équipe du Prof. B. Piwakoswki.
- Participation au congrès CESURA à Gdansk

[2005] Chairman d'une session 'Bruit & vibrations' au congrès Electrimacs'2005
Hammamet, Tunisie, avril 2005 (session Oral)

**LISTE DES PUBLICATIONS [R..] / COMMUNICATIONS
INTERNATIONALES [CI..] ET NATIONALES [CN..]**

REVUES [R..]

- [R1] IEEE Transaction on Magnetic, 1995**
‘Modeling of a claw-pole alternator using permeance network coupled with electric circuit’,
M. Hecquet, P. Brochet,
Mai 1995, Vol.31, N°3, pp. 2131-2134, (article présenté à CEFC’94).
- [R2] Journal de Physique III, 1996**
‘Modélisation de l’alternateur automobile par un réseau de perméances couplé à des circuits
électriques’,
M. Hecquet, P. Brochet,
Août 1996, pp. 1099-1116, **17 pages**.
- [R3] Magnet Technology – 15, 1997**, published by Science Press, Pékin, Chine.
Éditeurs : Lin Liangzhen, Shen Guoliao, Yan Luguang.
‘Computation of a linear eddy current braking System using the finite element method’,
S.J. Lee, M. Hecquet, P. Brochet, P. Delsalle, pp. 1538-1541,
(article présenté à MT-15 en Oct.97).
- [R4] IEEE Transaction on Magnetic, 1998**
‘Time variation of forces in a synchronous machine using electric coupled network model’,
M. Hecquet, P. Brochet,
Sept. 1998, Vol.34, N°5, pp 3214-3217, (article présenté à Compumag’97).
- [R5] IEEE Transaction on Magnetic, 1998**
‘Simulations of synchronous machines using a electric-magnetic coupled network model’,
H. Roisse, M. Hecquet, P. Brochet,
Sept. 1998, Vol.34, N°5, pp 3656-3659, (article présenté à Compumag’97).
- [R6] IEEE Transaction On Magnetic, 1999**
‘A linear eddy current braking system defined by finite element computation’,
M. Hecquet, P. Brochet,
May 1999, Vol.35, N°3, pp 1841-1844, (article présenté à CEFC’98).
- [R7] COMPEL International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and
Electronic Engineering, 2001**
‘Thermal modelling of a car alternator with claw-poles using 2D finite element software’
S. Brisset, M.Hecquet, P. Brochet,
Vol.20, N°1, Jan. 2001, pp 205-215, **10 pages**.
- [R8] IOS Press, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, 2002**
‘A study of a 3D linear brake design using the experimental design’,
M.Hecquet, S. Vivier, P. Brochet,
Vol.22, pp 419- 422, Sept. 2002, **6 pages**. (article présenté à ISEF’2001)
- [R9] KLUWER Press, Optimization and Inverse Problem in Electromagnetism, 2003**
‘S.M.E.S. optimization using the Experimental Design Method’,
S. Vivier, M.Hecquet, F.Gillon, P. Brochet,
ISBN 1-4020-1506-2, **12 pages**, Sept. 2003. (article présenté à OIPE’2002)

- [R10] **SPRINGER, Computer Engineering in Applied Electromagnetism, 2004**
'Analytical approach to study noise and vibration of a synchronous permanent magnet machine',
A. Ait-Hammouda, M.Hecquet, M. Goueygou (IEMN), P. Brochet, A.Randria (Alstom-Transport),
ISBN 1-4020-3168-8, post-conference monograph, Electronics & Electrical Engineering,
8 pages, Dec. 2004. (article présenté à ISEF'2003)
- [R11] **COMPEL International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2005**
'Experimental design method applied to a multiphysical model : treillis designs for a multidimensional screening study',
S. Vivier, M.Hecquet, A. Ait-Hammouda, M. Goueygou (IEMN) , P. Brochet, A.Randria (Alstom-Transport),
Special Issue Vol.24, **15 pages**, N°3, 2005. (article présenté à OIPE'2004)
- [R12] **RIGE, Revue Internationale de Génie Electrique, 2005**
'Stratégies d'optimisation basées sur la méthode des plans d'expériences pour la conception de dispositifs électrotechniques,
S. Vivier, M. Hecquet, P. Brochet
23 pages, Vol. 5-6, 2005.
- [R13] **Springer Monograph 'Recent Developments of Electrical Drives', 2006**
'Vibro-Acoustic Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Machine Using the Experimental Design Method'
S. Vivier, A. Ait-Hammouda, M. Hecquet, B. Napame, P. Brochet, A. Randria (Alstom-Transport),
14 pages, Springer, pp 101-114, 2006. (article présenté à ICEM'2004)
- [R14] **'Mathematics and Computers in Simulation',2006**
'Prediction of the electromagnetic noise of an asynchronous machine using experimental designs'
M.Hecquet, A. Ait-Hammouda, M.Goueygou (IEMN) , P.Brochet, A.Randria (Alstom-Transport),
11 pages, suite Electrimac'05, Elsevier, 2006, volume 71, issues 4-6, pages 409-419.
- [R15] **IEEE Transaction on Magnetic, 2006**
'Design and simulation of turboalternators using coupled permeance network model,
D. Petrichenko, M. Hecquet, P.Brochet, Vyacheslav Kuznetsov (MPEI), D. Laloy (Jeumont-Framatome)
Vol. 42, pp. 1259-1262, April 2006.
(article présenté à COMPUMAG'2005, Shenyang, CHINE, juin 2005)
- [R16] **IEEE Transaction On Magnetic, 2006,**
'Experimental validation of magnetic and electric local force formulations. Associated to energy principle'
O. Barre, P.Brochet, M. Hecquet
Vol. 42, pp. 1475-1478, April 2006.
(article présenté en Session Orale à COMPUMAG'2005, Shenyang, CHINE, juin 2005)

2006:

- [CI.1] 'Factor influence study of turbo-alternators using coupled permeance network model'
D. PETRICHENKO, M. HECQUET, P.BROCHET, VYACHESLAV KUZNETSOV (MPEI), D. LALOY (JEUMONT-FRAMATOME)
EMF'2006, Aussois, France, 21-23 Juin 2006.
- [CI.2] 'Multi-physical model of P.M. synchronous machine'
S. BUJACZ, M.HECQUET, M.GOUUEYGOU (IEMN) , P.BROCHET, J. NIEZNANSKI
EMF'2006, Aussois, France, 21-23 Juin 2006.
- [CI.3] 'Permeance network method coupling with experimental design in order to optimize turbogenerators'
D. PETRICHENKO, M.HECQUET, P.BROCHET,
ICEM'2006, Crète, 2-5 Septembre 2006
- [CI.4] '3D permanent magnet synchronous machine simulations in order to predict electromagnetic noise'
S. BUJACZ, M.HECQUET, M.GOUUEYGOU (IEMN) , P.BROCHET, J. NIEZNANSKI
ICEM'2006, Crète, 2-5 Septembre 2006
- [CI.5] 'A Fast Noise-Predictive Multiphysical Model of the PWM-controlled Induction Machine'
J. LE BESNERAIS, A. FASQUELLE, M.HECQUET, V. LANFRANCHI, P. BROCHET, A.RANDRIA,
ICEM'2006, Crète, 2-5 Septembre 2006
- [CI.6] 'Iron losses distribution in a railway traction induction motor'
A. FASQUELLE, A. ANSEL, S. BRISSET, M.HECQUET, P. BROCHET, A. RANDRIA
ICEM'2006, Crète, 2-5 Septembre 2006
- [CI.7] 'Vibratory and acoustic behavior of induction traction motors, vibration reduction with design machine'
V. LANFRANCHI, A. AIT-HAMMOUDA, M. HECQUET, G. FRIEDRICH, A. RANDRIA
IAS'2006, Octobre 2006, USA.
- [CI.8] 'Multidisciplinary Optimal Design of Electric Machines Using Multimodeling Approach'
V. MESTER, F. GILLON, M.HECQUET, P.BROCHET,
CEFC'2006, Miami, Mai 2006

2005:

- [CI.9] Tooth contours method applied to design of turboalternators : developpement of CAD Software,
D. PETRICHENKO, M. HECQUET, P.BROCHET, VYACHESLAV KUZNETSOV (MPEI), D. LALOY (JEUMONT-FRAMATOME)
ISEF'2005, Baiona, Espagne, 15-17Septembre 2005.
- [CI.10] Multiphysical modelling and optimisation of induction traction motors,
A.AIT-HAMMOUDA, M.HECQUET, M.GOUUEYGOU (IEMN) , P.BROCHET, A.RANDRIA (ALSTOM-TRANSPORT),
COMPUMAG'2005, Shenyang, CHINE, juin 2005.
- [CI.11] Experimental validation of magnetic and electric local force formulations. Associated to energy principle.
O. BARRE, P.BROCHET, M. HECQUET,
COMPUMAG'2005, Shenyang, CHINE, juin 2005.
Session Oral (Workshop :cas test)
- [CI.12] Development of the turboalternator simulation sotfware,
D. PETRICHENKO, M. HECQUET, P.BROCHET, VYACHESLAV KUZNETSOV (MPEI), D. LALOY (JEUMONT-FRAMATOME),
ELECTRIMACS'2005, Hammamet, Tunisie, avril 2005 (session Oral)

2004:

[CI.13] Numerical modelling of a turboalternator using Tooth Contours Method: CAD application,
D. PETRICHENKO, M. HECQUET, P. BROCHET,
ICEM'2004, CD, Cracovie, Septembre 2004

[CI.14] Vibroacoustic behaviour of the asynchronous machine,
A. AIT-HAMMOUDA, M. HECQUET, M. GOUEYGOU, P. BROCHET, A. RANDRIA,
ICEM'2004, CD, Cracovie, Septembre 2004

2003:

[CI.15] Comportement vibro-acoustique d'une machine synchrone à aimants permanents : développement de modèles multi-physiques,
A. AIT-HAMMOUDA, M. HECQUET, M. GOUEYGOU (IEMN), S. VIVIER, P. BROCHET.

ELECTROTECHNIQUE DU FUTUR, décembre 2003

[CI.16] Vibroacoustic behaviour of the synchronous permanent magnet machine.
A. AIT-HAMMOUDA, M. HECQUET, M. GOUEYGOU, P. BROCHET, A. RANDRIA (ALSTOM-TRANSPORT)

Electric and Magnetic Fields (EMF), Octobre 2003 (Oral)

[CI.17] Error estimation in the context of numerical optimization of electromagnetic systems,
S. VIVIER, M. HECQUET, P. BROCHET

COMPUMAG'2003, IEEE Conference, Saratoga, USA, 13-17 juillet 2003

[CI.18] 3D optimization of a linear eddy current brake using the experimental design method,
M. HECQUET, S. VIVIER, P. BROCHET

CESURA'2003, Gdansk, Pologne, 4-6 juillet 2003

[CI.19] Prediction and reduction of magnetic noise in electrical machines used in transportation systems',
M. HECQUET, M. GOUEYGOU, P. BROCHET

CESURA'2003, Gdansk, Pologne, 4-6 juillet 2003

2002:

[CI.20] 'Influence on the Dynamics of an Alternator : Experimental Measurement'
AIT-HAMMOUDA, M. HECQUET, M. GOUEYGOU, P. BROCHET

VANEM 2002, Lodz, 17-18 octobre 2002, Poland (Oral)

[CI.21] 'Experimental Design Method applied to the optimization of a linear current brake'
M. HECQUET, S. VIVIER, P. BROCHET

MAGLEV, Proceedings CD, Lausanne, Switzerland, 2-5 septembre 02 (Oral)

[CI.22] 'Design of a linear eddy current brake, 3D modeling and optimization'
M. HECQUET, S. VIVIER, P. BROCHET

CEFC, 16-19 juin 2002, pp50

2001:

[CI.23] Numerical and Experimental Study of the Pole Shape Influence on the Dynamic of an Alternator
M. HECQUET, M. GOUEYGOU (IEMN), P. BROCHET

COMPUMAG'2001, IEEE Conference, Evian, France, 2-5 July, 2001

[CI.24] A Design Optimization Manager
S. VIVIER, F. GILLON, M. HECQUET, P. BROCHET

COMPUMAG'2001, IEEE Conference, Evian, France, 2-5 July, 2001

2000:

[CI.25] 'Optimisation of a linear eddy current braking system using experimental design method'
S. VIVIER, M. HECQUET, P. BROCHET,

EMF'2000, Electric and magnetic fields, Mai 2000, Gent, Belgique. (Oral)

[CI.26] Numerical computation of pole shape influence on radial forces in an automotive alternator
M. HECQUET, S. DAHEL, M. GOUEYGOU (IEMN), P. BROCHET,

Vibrations and Acoustic Noise of electric Machinery, June 2000, Lodz, Pologne (Oral)

[CI.27] Applying the design of experiments to the optimisation of a linear eddy current brake
S. VIVIER, M. HECQUET, P. BROCHET

ICEM'2000, Août 2000 Helsinki university of technology, Finland, 28-30 août 2000.

1999:

- [CI.28] Etude de la forme des griffes d'un alternateur automobile par un réseau de perméances couplé à des circuits électriques
M. HECQUET, P. BROCHET,
EF'99, Electrotechnique du Futur, LILLE, Mars 99, proceedings pp 181-186 (Oral)
- [CI.29] Pole shape study of an automotive alternator using permeance network model coupled with electric circuits
M. HECQUET, P. BROCHET)
Vibration, Noise and Structural Dynamics'99, Avril 99, Venise, Italie, pp285-293.
- [CI.30] Claw-pole optimisation of an automotive alternator using permeance network coupled with electric circuits
S. DAHEL, M. HECQUET, P. BROCHET,
ELECTRIMACS'99, Sept.99, Lisbonne, Portugal, vol. 2, pp227-232.
- [CI.31] Pole shape influence on braking force calculation of a linear eddy current braking system
M. HECQUET, P. BROCHET, S. VIVIER
COMPUMAG'99, Oct.99 Proceedings Vol.2, pp 510-511, 25-28 Oct., Sapporo, Japan,

1998:

- [CI.32] Development a general model to simulate electrical machines based on electric magnetic coupled networks
H. ROISSE, M. HECQUET, P. BROCHET
CESA'98, Avril 98 Hammamet, Tunisie, pp.83. (oral)
- [CI.33] A linear eddy current braking system defined by finite element computation
S.J. LEE, M. HECQUET, P. BROCHET, P. DELSALLE (ALSTOM)
CEFC'98, Juin 98, Tucson, Arizona, pp. 424
- [CI.34] The 3D finite element computation used to a linear eddy current braking system
M. HECQUET, P. BROCHET
JEF'98, European Conference on Braking, Dec.98 Lille, pp.187-194. (oral)

< 1997:

- [CI.35] Validation of coupled electric permeance network model on a claw-pole alternator
M. HECQUET, P. BROCHET
ICEM'96, Sept.96 Vigo, Espagne, pp.60-66.
- [CI.36] Force calculations on a claw-pole alternator using permeance network coupled wit electric circuits
M. HECQUET, P. BROCHET
ELECTRIMACS'96, Sept.96 St Nazaire, pp.157-162.
- [CI.37] Modeling of a claw-pole alternator using permeance network coupled with electric circuits
M. HECQUET, P. BROCHET
IEEE CEFC'94, Juil.94 Aix-les-Bains, pp.143
- [CI.38] Simulation of rotating synchronous machines by mean of coupled network models
M. HECQUET, P. BROCHET, B. LEMAIRE-SEMAIL
IMACS'TC1, Juin 93, Montréal, Canada.
- [CI.39] Bond-graph method applied to coupled electric and magnetic model of electrical devices
C. DELFORGE, M. HECQUET, P. BROCHET
IEEE System Man and Cybernetics, Oct.93 Le Touquet. (oral)
- [CI.40] A model for coupled magnetic-electric circuits calculation in electromagnetic systems using permeance network', présentation orale,
P. BROCHET, M. HECQUET, B. LEMAIRE-SEMAIL, C. ROMBAUT.
International Workshop on Electric and Magnetic Fields, Liège, Belgique, Sept.92

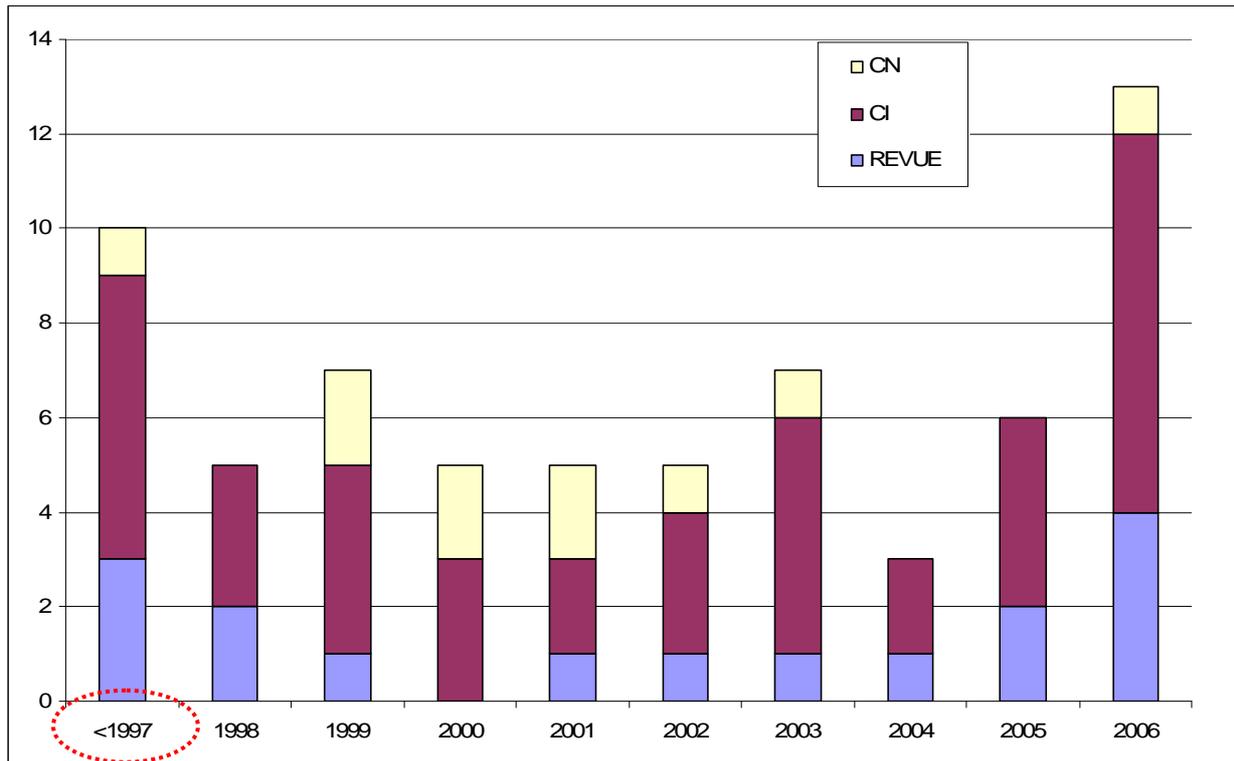
COMMUNICATIONS NATIONALES AVEC ACTES [CN..]

- [CN.1] ‘Optimisation multicritère du moteur asynchrone avec minimisation du bruit d’origine magnétique’
J. LE BESNERAIS, M.HECQUET, V. LANFRANCHI, P..BROCHET,
NUMELEC’2006, Lille, Décembre 2006, papier accepté
- [CN.2] ‘Etude analytique du bruit et des vibrations d’une machine synchrone à aimant permanent’,
A.AIT-HAMMOUDA, M.HECQUET, M. GOUEYGOU (IEMN), P. BROCHET, A. RANDRIA (Alstom-Transport),
AVE’2003, Analyse Vibratoire Expérimentale, Blois, Nov. 2003.
- [CN.3] ‘Design Of A Linear Eddy Current Brake, 3d Modeling and Optimization’
M.HECQUET, P. BROCHET, P. DELSALLE, C. BONEILL
JEF 2002, Lille, 13-14 mars 2002
- [CN.4] ‘Optimisation d’un frein linéaire à courants de Foucault. Utilisation de la technique des Plans d’Expériences’
M. HECQUET, S.VIVIER, P.BROCHET,
JER’2001, Journée d’étude & recherche, Lille, Décembre 2001.
- [CN.5] ‘Modèles simplifiés des effets électromagnétiques, thermiques et mécaniques dus à la fréquence’
Y. Lefèvre, A. Tounzi, P. Bidan, P. Lagonotte, G. Friedrich, J. Faucher, M. Hecquet, T. Lebey, T. Kharapapong, M. Broussely, A. Hubert, B. Lemaire-Semail, C. da Silva,
Journée GDR SDSE ‘Sûreté et Disponibilité des Systèmes Électrotechniques’, Lyon, 14 Décembre 2001.
- [CN.6] ‘Thermal modelling of a car alternator with claw-poles using 2D finite element software’
S. BRISSET, M. HECQUET, P.BROCHET,
European User Meeting of Vector Fields, Sept.2000, Lille, Proceedings N°1.
- [CN.7] ‘Caractérisation et modélisation des effets électromagnétiques, thermiques et mécaniques dus à la haute fréquence dans les dispositifs électromagnétiques’
Y.Lefèvre, T.Lebey, A.Tounzi, P.Lagonotte, G.Friedrich, H.Kabbaj, P.Bidan, M.Hecquet, Y.Bertin, A.Hubert, B.Lemaire-Semail,P.Castelain, J-B.Saulnier, J.Faucher, M.Broussely, J.P.Vilain,
GDR ‘Sûreté et Disponibilité des Systèmes Electrotechniques’, Janv. 2000, Lyon.
- [CN.8] ‘Calculs de forces sur un alternateur automobile par un réseau de perméances couplé à des circuits électriques’
M. HECQUET, E. PELLE (VALEO), S. DAHEL, P. BROCHET
Journée INNOVELECT’99, Nov. 99, Mons, Belgique, pp121-128.
- [CN.9] ‘Optimisation of a 2D Eddy Current Brake using Experimental Design Method’
P.BROCHET, M.HECQUET,
Projet EPOCH, European User Meeting of Vector Fields, Oct. 99, Eindhoven, Proceedings N°1.
- [CN.10] ‘Calculs de forces sur un alternateur automobile par un réseau de perméances couplé à des circuits électriques’
P.BROCHET, M.HECQUET,
Journée d’Etudes sur les vibrations et le bruit acoustique des machines électriques, Avril 97, ENS Cachan, pp14-23 (Oral)

BILAN (revues / CI & CN)

Ci-dessous, un tableau de synthèse de la production scientifique et le graphique correspondant :

	<1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	total
CN	1		2	2	2	1	1			1	10
CI	6	3	4	3	2	3	5	2	4	9	40
REVUE	3	2	1		1	1	1	1	2	4	16



PARTIE II

Activités de recherche.

Sommaire (partie II)

I] Introduction générale	- 39 -
II] Le ‘ Prototypage Virtuel ’	- 42 -
II.1. Objectifs et intérêt du prototypage virtuel	- 44 -
II.1.1. Intérêt d’un prototype virtuel	- 44 -
II.1.2. Difficultés rencontrées	- 44 -
II.1.3. Domaines physiques à considérer	- 45 -
II.1.4. Choix d’un niveau de granularité ou de complexité	- 46 -
II.2. Approche ‘Réseau de Perméances’	- 48 -
II.2.1. Historique	- 48 -
II.2.2. Objectifs	- 50 -
II.2.3. Difficultés rencontrés	- 50 -
II.2.4. Niveau de discrétisation choisie et méthode de déterminations des perméances	- 51 -
II.1.4.1. Utilisation de la méthode des éléments finis (M.E.F.) afin de déduire le RdP	- 52 -
a) Evolution de la perméance d’entrefer (prise en compte du mouvement)	- 53 -
b) Avantages et Inconvénients de cette démarche	- 55 -
II.1.4.2. Utilisation de relations analytiques afin de déduire le RdP	- 55 -
a) Définition d’une perméance d’entrefer globale	- 55 -
b) Evolution de la perméance d’entrefer d’une dent stator / à la denture rotor	- 56 -
II.2.5. Prise en compte du circuit électrique	- 59 -
II.2.6. Prise en compte de la saturation (perméance du circuit magnétique)	- 61 -
II.2.7. Prise en compte des effets 3D	- 62 -
II.2.8. Conclusion sur l’approche « RdP »	- 64 -
II.3. Couplage avec des modèles vibro-acoustique et / ou thermique	- 65 -
II.3.1. Couplage vibro-acoustique	- 65 -
II.3.1.1. Modèle vibratoire	- 67 -
II.3.1.2. Modèle acoustique	- 70 -
II.3.1.3. Validation du modèle vibro-acoustique	- 70 -
II.3.2. Couplage avec la thermique	- 72 -
II.3.3. Conclusion sur la notion de couplage multi-physique	- 74 -
II.4. Développement d’outils dédiés	- 75 -
II.4.1. Outils exploitant l’approche des Réseaux de Perméances :	- 76 -
L’outil « TurboTCM » :	- 76 -
II.4.2. Outils exploitant le couplage vibro-acoustique (outil DIVA):	- 78 -
II.5. Conclusion sur les prototypes virtuels	- 79 -
III] Optimisation par plans d’expériences	- 80 -
III.1. Introduction	- 80 -
III.2. La méthode des Plans d’Expériences (PdE)	- 82 -
Historique	- 82 -
Intérêt de l’approche (pourquoi les PdE) ?	- 82 -
Rappel sur les PdE	- 83 -
III.2.1 Applications des Plans d’Expériences au L2EP :	- 84 -
III.2.1.1. Technique du criblage (Screening)	- 84 -
Application à l’étude du frein linéaire à Courants de Foucault	- 85 -
III.2.1.2. Technique du screening multidimensionnels ou multizones	- 89 -
Application au cas d’une machine synchrone à aimants et une machine asynchrone	- 90 -
III.2.1.3 Méthodologie des surfaces de réponse	- 95 -

Application à l'étude du frein linéaire à Courants de Foucault	- 96 -
Application au cas d'une machine synchrone à aimants	- 98 -
III.3. L'optimisation par 'PdE':	- 99 -
III.3.1. Stratégie de glissement de plans	- 101 -
III.3.2. Stratégie de resserrement de plans ou zoom.	- 102 -
III.3.3. Stratégie « exhaustive »	- 104 -
Application au cas d'une bobine supraconductrice	- 106 -
III.4 Conclusion	- 110 -
<i>IV] APPLICATIONS</i>	- 111 -
Modélisation par réseau de perméances 2D et 3D	- 111 -
Cas de l'alternateur à griffes	- 111 -
Cas du turbo-alternateur (RdP à topologie variable)	- 111 -
a) Contexte de l'étude et objectif	- 111 -
b) Choix de l'approche	- 112 -
c) Rappel sur le turbo	- 112 -
d) Modélisation par RdP	- 113 -
e) Validation du prototype virtuel	- 115 -
f) Méthodologie des Surfaces de Réponse	- 117 -
g) Conclusion sur le cas du turbo-alternateur	- 120 -
Cas d'une machine asynchrone appliquée à la traction ferroviaire	- 120 -

IJ INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les systèmes électriques envahissent notre quotidien. Leur omniprésence ne peut que s'accroître car ils nous remplacent fidèlement ou amplifient nos capacités d'action. Leur conception est donc une étape obligée dans l'élaboration d'un produit ou d'un service nouveau.

Quelque soit l'application envisagée, il est naturel de planifier une étude de conception de machines en espérant obtenir la solution parfaite ou optimale.

Mais qu'est-ce qu'une 'solution parfaite'?

De nombreux travaux concernant l'optimisation de machines électriques se limitent aux caractéristiques électriques et magnétiques de la machine. Ces études se justifient par la prise en compte de nombreux phénomènes, comme par exemple les courants induits avec une modélisation 3D ou l'intégration du phénomène d'hystérésis. Mais peut-on encore à l'heure actuelle effectuer une optimisation de la structure sans se préoccuper de son niveau de bruit émis ou encore du niveau de température ? Peut-on se contenter par exemple, d'obtenir une puissance massique 'optimale' sans se préoccuper de la mise en résonance de la structure ou d'un problème d'échauffement ? Les aspects économiques mais aussi la trace environnementale (ex. : le recyclage des machines) deviennent des points fondamentaux. Les programmes européens (FP6 et FP7) sur les transports y font référence et les études à venir devront obligatoirement intégrer ces aspects.

Deux exemples donnés permettent d'illustrer ces aspects :

- dans le premier cas, l'optimisation d'un turboalternateur : Il faut être capable d'intégrer les effets thermiques et aérodynamiques des machines car même si les rendements des machines tendent vers les 99% pour un turboalternateur, par exemple de 100MW, il reste tout de même un 1MW à évacuer !

- le deuxième cas concerne une chaîne de traction ferroviaire : est-il suffisant de concevoir une machine optimale en termes de couple, rendement et échauffement si celle-ci est excessivement bruyante ? On pourrait croire que le moteur électrique n'apporte qu'une petite partie du bruit global et pourtant (source Alstom-Transport) :

- A pleine vitesse train, le bruit de certains types de moteurs de traction peut être du même niveau sonore que celui du contact roue-rail, voisin de 110 dBA.
- A l'arrêt en gare, un train peut générer des niveaux de bruits non négligeables. Par exemple, le convertisseur d'auxiliaire, la climatisation, le transformateur, peuvent générer jusqu'à 85 dBA.
- En phase de freinage électrique, l'utilisation du rhéostat de freinage peut générer un bruit très gênant.

La tendance actuelle des équipements électriques est la concentration de matériels dans des volumes de plus en plus faibles et pour des puissances de plus en plus élevées. Il en résulte le

besoin de dissiper plus de pertes thermiques tout en gardant des niveaux de bruit identiques et si possible plus faibles pour les échangeurs thermiques. Par ailleurs, les convertisseurs de puissance électrique utilisent des composants d'électroniques de puissance qui génèrent des pertes harmoniques se traduisant par des bruits à forte tonalité particulièrement gênants (bruits proches de fréquences pures).

En conséquence, une conception optimale de machines électriques demande tout d'abord une approche 'multi-domaines, encore appelée '*multi-physiques*'. Les 2 exemples précédents montrent clairement la nécessité d'ajouter aux phénomènes électromagnétiques, des phénomènes acoustiques et thermiques.

De plus, les entreprises doivent innover, améliorer leurs produits, et éviter une optimisation indépendante de chaque composant en ayant une approche « globale ». Ainsi, faut-il considérer le système dans sa globalité avec une approche « très macroscopique » puis affiner les modèles au risque de négliger certains effets (démarche TOP DOWN) ou bien faut-il à l'inverse partir de phénomènes « microscopiques » et remonter au problème dans sa globalité (BOTTOM UP) ?

Il est primordial d'être capable de définir des modèles adaptés et couplés afin d'éviter une optimisation d'un aspect isolé qui rendrait le dispositif inadapté dans son ensemble.

Pour cela, *le niveau de granularité ou de complexité* des modèles doit être adapté : utilisation de la méthode des éléments finis (M.E.F.) couplée à la fois à un réseau de perméances (ou de résistances équivalentes pour la partie thermique) et à des méthodes analytiques pour insérer par exemple les effets d'extrémités.

Nos objectifs dans ce rapport sont donc d'apporter des éléments de réponse à la démarche de « *conception optimale* ». Deux mots ou phrases 'clefs' seront employés au cours de cette synthèse : la modélisation multi-physiques et l'optimisation par plans d'expériences.

La représentation ci-dessous reprend ces deux points couplés et donne les orientations choisies (couleur foncée) :

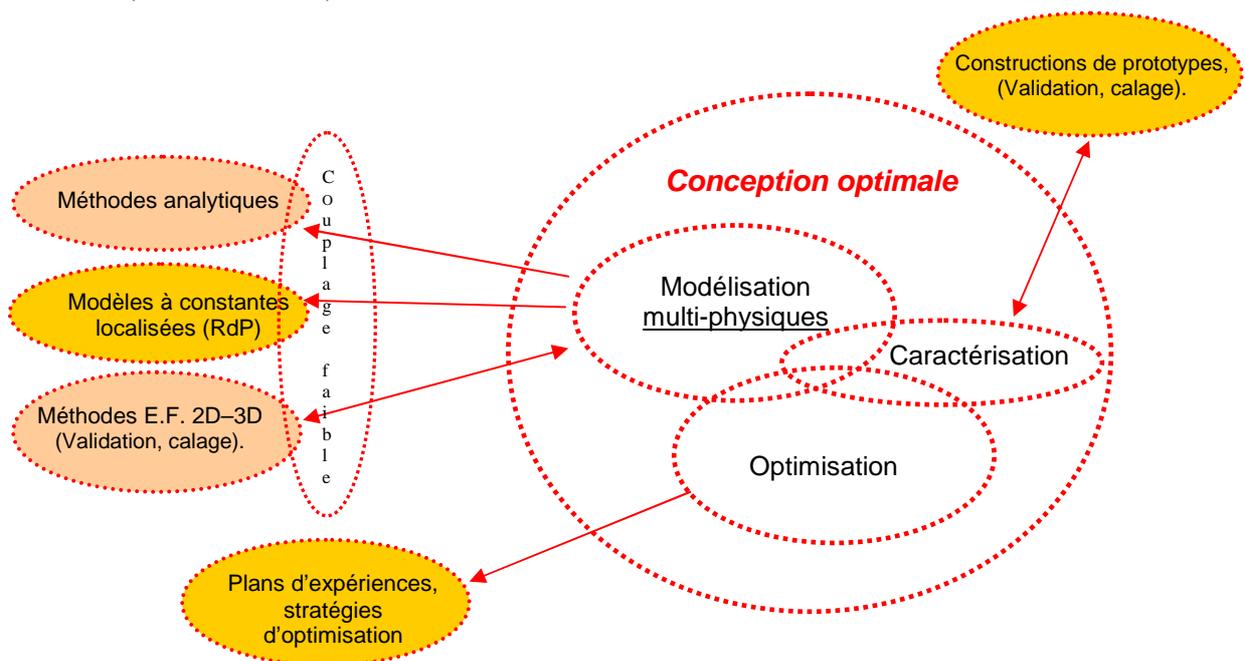


Figure I.1 : Synthèse des différentes activités

Cette représentation fait ressortir les points suivants :

- Utilisation de modèles à constantes localisées (Utilisation de l'approche Réseau de perméances : RdP)
- Utilisation de la technique des Plans d'Expériences (PdE) et de stratégies d'optimisation,
- Caractérisations et confrontation expérimentale ;

trois domaines sur lesquels nos travaux se sont portés.

Il faut souligner la possibilité de coupler différentes approches.

Par exemple, une résolution éléments finis couplée à des méthodes analytiques ou bien les RdP associés aux méthodes analytiques. Le couplage est dit 'faible', ne nécessitant pas de résolutions simultanées des équations. Le développement de solutions de représentations passe par des étapes de calage et validation. Deux démarches ont été employées : l'approche éléments finis combinée la plupart du temps avec la réalisation de prototypes.

Les deux premiers chapitres de ce mémoire reprennent ces deux points :

- Solutions de représentations ou de modélisations des systèmes réels
 - o Rappel de différentes méthodes et orientation privilégiée vers l'approche 'réseaux de perméances',
 - o Couplage multi-physiques afin de prendre en considération les différents phénomènes physiques comme la thermique, les vibrations, le bruit...
 - o Présentation des outils logiciels développés.
- Optimisation par plans d'expériences
 - o Présentation de la technique des plans d'expériences (Plan de Criblage : screening et méthode des surfaces de réponse : response surface method R.S.M.)
 - o Stratégies d'optimisation par plans d'expérience
 - o Présentation de l'outil logiciel développé.

Le chapitre suivant illustre avec un exemple les développements théoriques. De nombreux cas traités sont ajoutés en annexe ainsi que quelques articles qui y sont référencés. Ces différents exemples et articles montrent une certaine continuité en termes de modélisation et couplage multi-physiques mais aussi en optimisation par plans d'expériences (*Etude de criblage ou Screening : détermination des facteurs influents d'un système et étude des zones optimales*).

III] LE 'PROTOTYPAGE VIRTUEL'

Dans ce chapitre, le choix d'une modélisation d'un dispositif multi-physiques est détaillé ainsi que la définition d'un prototype virtuel. La première partie aborde les problèmes rencontrés, le niveau de granularité à choisir et les différentes approches possibles. En seconde partie, une des originalités de nos travaux concerne l'utilisation de méthodes semi-numériques : modèles à constantes localisées apportant un bon compromis temps de calcul – précision.

Comment modéliser un système multi-physiques (ou méthodologie retenue) ?

A l'heure actuelle, compte tenu des pressions et contraintes économiques importantes, les délais de conception et de réalisation de systèmes électrotechniques sont réduits afin d'être compétitif. Il faut également intégrer :

- l'accroissement de l'efficacité énergétique,
- la réduction des encombrements et des masses,
- la réduction des coûts, de la maintenance et de la fiabilité,

La disponibilité et la puissance de calculs toujours plus grandes des moyens informatiques favorisent le recours à la simulation et génèrent d'importants besoins en modélisation.

Il existe de nombreuses possibilités de représentation ou de modélisation d'un système. Des modèles de « pré-dimensionnement » permettent de définir un prototype quelconque [Liw-67], [Juf-79], [Nog-90], [Kon-93], [Mer-93], [Mul-93], [Seg-94] soit à partir d'abaques et familles de courbes ou soit avec des modèles analytiques plus ou moins sophistiqués. En effet, dans ce cadre, les *méthodes analytiques* présentent de nombreux avantages comme la facilité de manipulation. Il est important de rappeler toutes les hypothèses considérées afin de connaître les limites du modèle. On peut citer de nombreux exemples de conception de machines n'utilisant que des méthodes analytiques mais aussi reposant sur un retour d'expériences comme cela est le cas chez nos partenaires Alstom-Transport et Jeumont-Framatome.

Il est ensuite possible de coupler des phénomènes comme la thermique des machines ainsi que l'électronique associé [Bie-98], [Bie-99], [Mes-98], [Lap-02], [Bri-03], [Tou-04] afin de déduire une conception optimale.

La seconde approche de représentation d'un système réel, à l'opposé de la première, permet de limiter le nombre d'hypothèses en intégrant de nombreux phénomènes.

Les *méthodes numériques* de calculs sont la réponse à ce besoin. Parmi ces outils mathématiques, figurent entre autres la méthode des éléments finis (M.E.F.) et toutes les techniques voisines (différences finies, méthode des éléments de frontières, etc.).

Elles sont couramment utilisées pour des études magnétiques, mécaniques, thermiques, aérauliques, mais indépendamment les unes des autres dans la plupart des cas. Ceci peut d'ailleurs se justifier dans le cas d'une étude électrothermique où les constantes de temps sont complètement différentes. Mais peut-on assurer que la caractéristique du matériau reste identique ? Pour une étude mécanique des machines, peut-on s'assurer que les déformations de la structure induites par les efforts électromagnétiques n'ont pas d'influence sur la valeur de l'induction ? Etc.... Il faut pour cela un couplage 'direct' ou 'fort' entre les différents domaines liant par exemple les équations électriques aux équations de la mécanique [Pir-88], [Tsu-93], [Clé-03], [Bri-94], [Dre-94].

Deux situations :

- le cas où les temps de calcul deviennent considérables : couplage mécanique et couplage circuit ; On utilisera alors cette approche pour valider un point de fonctionnement uniquement.
- le cas où le fonctionnement de la machine repose sur l'intégration de phénomènes comme les courants induits ou l'hystérésis, il est alors nécessaire de définir un modèle éléments finis (*cas du frein à courants de Foucault présenté en annexe*).

Enfin, une approche intermédiaire, l'utilisation des **méthodes semi-numériques ou approche à constantes localisées** (ex.: les réseaux de perméances ou de réluctances), offre un bon compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul. Cette approche peut permettre d'intégrer de nombreux phénomènes comme l'effet de saturation, la prise en compte du mouvement, le couplage circuit et les couplages 'autres', avec par exemple d'autres réseaux à constantes localisées (comme des réseaux thermiques). Cette approche a retenu notre attention en vue de la modélisation de dispositifs électrotechniques. Elle est présentée et détaillée au § II.2, illustrée au § IV.

Enfin, on peut aussi préciser qu'il n'existe pas de *méthode meilleure que l'autre* ; le choix de l'étude de celle-ci reposant sur les objectifs visés et sur la *définition du cahier des charges de l'étude*. Par contre, ces différentes approches peuvent être complémentaires.

II.1. Objectifs et intérêt du prototypage virtuel

Notre objectif concerne la mise au point de modèles multi-physiques couplés de machines électriques et leur exploitation dans un processus d'optimisation. Pour cela, il sera nécessaire de créer des simulateurs spécifiques ou dédiés permettant d'envisager une conception optimale de machines électriques dans son environnement.

La « construction » d'un *prototype virtuel* permettra d'obtenir un simulateur de la machine étudiée, avec une prise en compte des différents phénomènes physiques à étudier, ceux-ci étant imposés dans le cahier des charges.

II.1.1. Intérêt d'un prototype virtuel

Les contraintes pratiques et financière incitent fortement à recourir au prototypage virtuel pour la conception optimisée de nouveaux dispositifs électrotechniques, l'objectif conceptuel étant d'obtenir un produit réel satisfaisant à des critères dès le premier exemplaire fabriqué. Le recours aux outils informatiques s'inscrit dans la volonté de limiter le plus possible les contraintes financières et temporelles attachées à la conception et à l'optimisation sur exemplaires réels.

Ainsi, à chaque système réel correspond un équivalent virtuel dont les qualités intrinsèques sont infiniment plus avantageuses dans la mesure où celui-ci peut être modifié à faible coût au gré de l'expérimentateur : La *malléabilité du prototype virtuel* est une qualité essentielle.

Cette démarche trouve son achèvement dans l'optimisation, afin d'améliorer les performances des produits existants ou nouveaux.

II.1.2. Difficultés rencontrées

Si la flexibilité des systèmes virtuels constitue un avantage, sa mise en œuvre présente néanmoins différentes difficultés. La première concerne la pertinence de la modélisation elle-même : celle-ci est limitée et ne reproduit que partiellement les phénomènes physiques réels entrant en jeu. La difficulté à prendre en compte le phénomène d'hystérésis en est un exemple. La seconde difficulté est relative à la construction du modèle. Celle-ci est dépendante de nombreux paramètres, notamment l'expertise du concepteur qui la réalise, les caractéristiques matérielles et logicielles de l'environnement de travail, etc.

Ces facteurs sont des sources d'incertitude et de variation des résultats fournis par les expériences virtuelles.

Enfin, afin d'enrichir la pertinence de la modélisation et surtout d'atteindre l'objectif de 'conception optimale', il sera peut-être nécessaire de considérer des modèles à « *granularité variable* », c'est à dire avec des niveaux de complexités différents et surtout d'adapter ceux-ci aux outils d'optimisations qui doivent être multicritères.

II.1.3. Domaines physiques à considérer

La conception d'un système électrotechnique demande à la fois de connaître différents domaines de la physique tels que la thermique, la mécanique, l'acoustique mais aussi, comme nous l'avons rappelé précédemment, d'intégrer les aspects économiques et environnementaux (voir figure II.1). Sur cette figure, un cercle en pointillés rappelle les phénomènes physiques régulièrement pris en considération. A cela vient s'ajouter la compatibilité électromagnétique (C.E.M.).

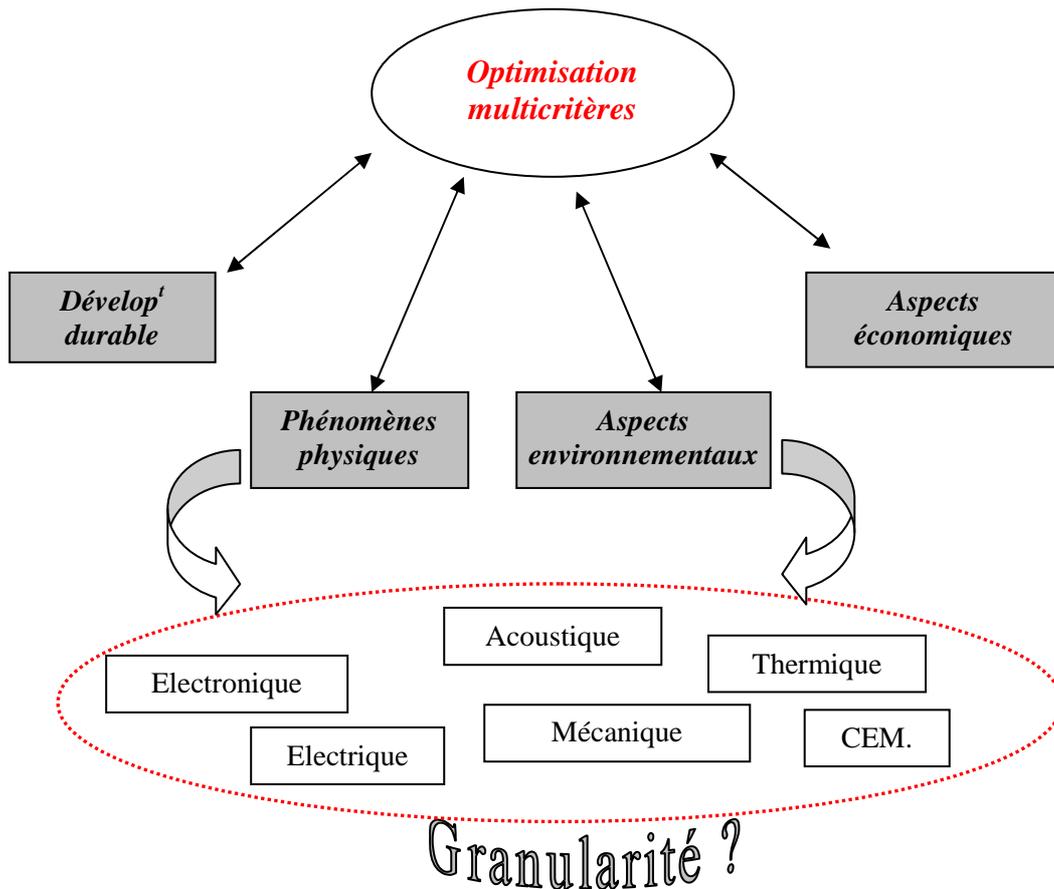


Figure II.1 : conception d'un système électrotechnique

En fonction du cahier des charges, on peut se limiter à la prise en compte de certains phénomènes physiques et choisir ensuite une méthode mathématique parmi les 3 citées précédemment : purement numérique, semi-numérique et / ou analytique. On peut aussi envisager de combiner les approches comme on le verra par la suite.

Quelque soit le domaine physique considéré, par exemple pour une étude thermique, on peut se reposer sur un modèle nodal ou alors utiliser la M.E.F., ou même combiner les deux. Il en est de même en mécanique.

II.1.4. Choix d'un niveau de granularité ou de complexité

La représentation donnée figure II.2 donne une illustration, pour le cas d'une étude magnétique de machines électriques, de ces niveaux de complexité de modélisation ou de granularité.

Les méthodes employées vont de la Méthode des Eléments Finis (MEF), laquelle constitue une référence à l'heure actuelle mais demande un temps de calculs plus important, jusqu'aux méthodes analytiques plus rapides, mais avec de nombreuses hypothèses.

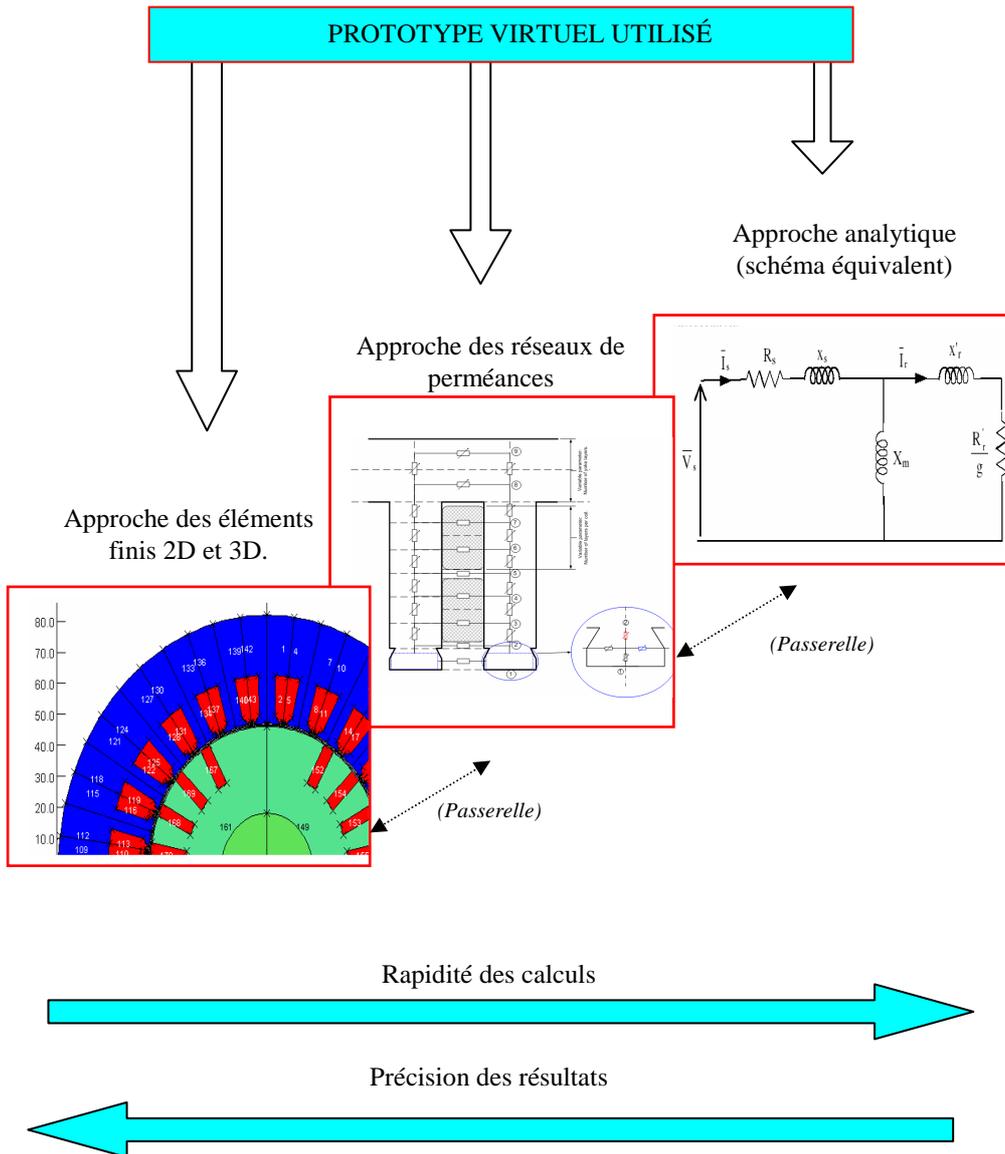


Figure II.2 : Niveau de granularité ou niveau de complexité (Représentation appliquée à un dispositif électrotechnique)

Bien évidemment, il existe de nombreux outils de simulation mais la difficulté réside principalement dans le choix du modèle approprié. Ce choix s'effectuera en fonction du cahier des charges défini pour une étude spécifique.

Il existe des possibilités de couplage entre modèles de granularité différente. On peut aussi ajouter à ce graphe un axe disciplinaire qui montrerait l'adaptabilité pour différents domaines : la thermique, la mécanique.... En effet, quelque soit le domaine physique considéré, par exemple pour une étude thermique, on peut se reposer sur un modèle nodal ou alors utiliser la M.E.F. ou même combiner les deux. Il en est de même en mécanique.

Ainsi, pour réaliser un bon compromis temps de calcul-précision, nous avons souvent privilégié l'approche des 'réseaux de perméances' que nous allons détailler dans le paragraphe suivant.

II.2. Approche 'Réseau de Perméances' (RdP)

L'intérêt de cette approche est de présenter un *bon compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats*, comme cela sera illustré dans les exemples suivants.

Dans ce paragraphe, différentes techniques sont présentées afin d'estimer au mieux le réseau équivalent. L'accent est mis sur la détermination de la *perméance d'entrefer* qui est déterminante pour la prise en compte du mouvement et la possibilité d'évaluer un réseau quelque soit le type de configuration. C'est là que réside toute la difficulté de l'approche : être capable de prendre en considération les différents parcours du flux quelque soit le point de fonctionnement de la machine et obtenir un réseau qui soit *paramétré et à discrétisation variable* pour une machine de type donnée.

Il faut aussi être capable d'intégrer les phénomènes suivants : la saturation, le couplage circuit et la possibilité de se coupler à d'autres réseaux comme des modèles thermiques ou à d'autres modèles de type éléments finis ou analytique.

L'apport de nos travaux a été de renforcer l'utilisation de cette approche en vue d'une conception optimale de machines. Pour cela, il fut nécessaire de minimiser le temps préparatoire d'obtention ou de construction du réseau de perméances mais surtout d'intégrer les différents paramètres à prendre en considération.

II.2.1. Historique

Cette approche « Réseau de Perméances (RdP) » a été utilisée depuis plusieurs décennies par [Rot-45] [Car-68], plus récemment par [Ost-89], [Lat-87], [Sle-90]. Au L2EP, depuis plus d'une dizaine d'années, différents travaux ont exploité cette technique en la couplant avec la méthode des éléments finis : lors de ma thèse appliquée à l'alternateur à griffes en 1995 et de celles de C. Delmotte-Delforge [Del-95] et de H. Roisse [Roi-98] sur des applications différentes : respectivement une machine asynchrone associée à sa commande et une machine synchrone à aimants.

Cette approche avait tout d'abord été testée avec succès sur un transformateur et son redresseur où les phénomènes non-linéaires tels que la saturation et l'hystérésis ou encore la commutation due aux composants électroniques jouent un rôle important [CI.40], puis sur une machine synchrone classique où le paramètre influent était le mouvement de rotation [CI.38] et sur une machine asynchrone [Del-95].

Dans la continuité de ces travaux et afin de montrer tout l'intérêt de celle-ci, la thèse de M. Derrhi [Der-00] en collaboration avec le CREA, montra la possibilité de simuler une machine asynchrone alimentée par un convertisseur MLI et sa source de tension, ainsi que la possibilité de faire du diagnostic des défauts internes à la machine [Del-03].

En parallèle et afin de renforcer notre idée d'utiliser les RdP pour une conception optimale de machines, l'application de cette approche couplée à la technique des plans d'expériences est proposé en vue d'une étude de sensibilité sur la forme des griffes d'un alternateur automobile [DEA de S. DAHEL : D4, DEA d'A. Ait-Hammouda : D5]. L'influence des facteurs sur le bruit et les vibrations est aussi fournie. Ce point est détaillé en annexe I. De plus, une autre gamme de machines (machine à courant continu) a été modélisée : un démarreur automobile [CR.6] réalisé par un DEA [D7] et un projet d'étude et recherche de fin d'année (6 mois) [E2]. Nous avons ainsi montré la possibilité de modéliser cette machine avec l'intégration du mouvement et la prise en compte du collecteur.

Plus récemment, notre choix s'est orienté vers une génération automatisée du RdP suite aux travaux sur l'alternateur à griffes et en collaboration avec le MPEI de Moscou [Th.3 - D. Petrichenko]. Une synthèse de ces différents travaux sur les RdP est présentée au § II.2.

Enfin, de nombreuses références nationales peuvent être citées sur l'utilisation de cette approche et plus particulièrement quelques thèses :

- au CEGELY, sur le développement de tubes de flux dynamiques intégrant la saturation mais aussi le cycle d'hystérésis en vue de l'estimation des pertes fer [Mar-95], [Duc-03], [Six-03] ;
- au LEEI [Dev-02], et au LEG [Jer-02] sur des travaux orientés 'diagnostic' utilisant l'approche des réseaux de perméances
- au LEG [Rak-96], [Alb-03], sur le développement d'un réseau de perméances adapté et couplé à différentes techniques d'optimisation, mais aussi sur la réalisation d'un outil orienté conception [Del-04] [Duf-06] par réseau de perméances en statique. Cette dernière thèse montre l'importance du modèle en fonction de l'objectif à atteindre. Elle montre aussi l'intérêt de l'utilisation de l'approche RdP et la possibilité de coupler ce réseau aux techniques d'optimisation. Un réseau permettant d'obtenir les caractéristiques en statique : la courbe de débit, la courbe de rendement sont obtenues très rapidement, permettant ainsi de trouver des surfaces de compromis (Front de Pareto) entre la masse et le rendement.

Ils existent aussi de nombreuses références internationales récentes montrant l'intérêt porté sur le sujet [Tur-96], [Ost-99], [Per-02], [Dem-03], [Nak-05], [Sra-05].

Si l'on se compare à ces différents travaux, *notre originalité est dans un premier temps, d'avoir développé des réseaux 'dynamiques' pour des structures complexes, tridimensionnelles* [Th. M. Hecquet -95], en intégrant le mouvement et les circuits électriques interne et externe au moyen de différentes techniques détaillées par la suite. L'intérêt est de pouvoir effectuer des études harmoniques sur l'induction, les forces et d'envisager une étude vibratoire et acoustique des machines ! Par contre, les courants induits dans les parties massives ne seront pas considérés.

Dans un second temps, nous essayons d'enrichir nos modèles, de diminuer le temps d'évaluation du réseau (voir détails ci-dessous) et de coupler ce réseau à des méthodes

analytiques pour le couplage circuit mais aussi mécanique (vibro-acoustique) et thermique. Enfin, ce modèle multi-physique doit être couplé à des méthodes d'optimisation en vue d'une conception optimale.

II.2.2. Objectifs

Ainsi, notre idée ne se limite pas à la modélisation ou à la simulation mais à la possibilité de concevoir et d'optimiser des dispositifs électrotechniques en utilisant l'approche des Réseaux de Perméances (RdP). Pour cela, nous avons envisagé différentes approches concernant l'identification des perméances mais aussi différents niveaux de discrétisations des réseaux, permettant ainsi de répondre au cahier des charges.

La réalisation d'outils dédiés ou spécifiques à un type de machines utilisant cette démarche, par exemple le turbo-alternateur, est particulièrement intéressante dans le cadre de la Conception Assisté par Ordinateur (C.A.O.) de machines électriques. Une présentation d'outils spécifiques est faite dans le §II.4.

De plus, une particularité de nos travaux fut de coupler cette technique à un superviseur d'optimisation utilisant les Plans d'Expériences (PdE) afin d'effectuer des études de sensibilité (études quantitatives), mais aussi des études qualitatives (surfaces de réponse). Cette partie sera détaillée dans le chapitre III.

II.2.3. Difficultés rencontrées

Plusieurs démarches d'obtention du RdP sont possibles et reposent sur différents critères qui sont :

- les hypothèses définies dans le cahier des charges de l'étude,
- la notion de granularité du réseau de perméances souhaité.

En effet, il est possible de choisir un niveau de discrétisation qui peut se limiter par exemple uniquement à la définition de la perméance d'entrefer (cas de l'application sur la machine asynchrone appliquée à la traction ferroviaire détaillé en annexe), jusqu'à la définition d'un maillage fin de plusieurs centaines d'éléments (application à l'étude des turbo-alternateurs : § IV et en annexe).

Comme cela a été précisé précédemment, on ne peut pas dire que cette dernière solution n'ait pas d'intérêt. Tout dépend à nouveau des objectifs visés qui reposent sur le cahier des charges.

Par contre, quelque soit le niveau de discrétisation du réseau de perméances, *on cherche à conserver un bon compromis « temps de calcul – précision ».*

L'intérêt concernant l'utilisation de cette approche RdP mais aussi le *choix de la discrétisation* du réseau est développé par la suite sur de nombreuses applications : alternateur automobile, turboalternateur, machines dédiées à la traction ferroviaire.

II.2.4. Niveau de discrétisation choisi et méthode de détermination des perméances

Trois possibilités ^(1 à 3) sont décrites et référencées par la suite en fonction des hypothèses choisies et du temps de détermination du RdP. Leur choix dépend d'**un compromis supplémentaire** entre la force des hypothèses et le temps d'évaluation des perméances ou temps préparatoire aux calculs.

Différentes techniques sont classées par ordre de complexité, sachant que le « temps préparatoire ou d'obtention du RdP » est inversement proportionnel. On supposera dans tous les cas une modélisation avec prise en compte du mouvement.

⁽¹⁾ Dans un premier temps, l'utilisation d'un code éléments finis en « magnétostatique » permet de déduire un RdP 'précis', surtout dans le cas de machines complexes comme l'alternateur à griffes des perméances. Cet outil s'avère indispensable pour l'étude de parcours typiquement tridimensionnelle et dans le cas de fortes saturations (exemple donné ci-dessous appliqué au cas de l'alternateur à griffes) [Thèse M. HECQUET] [DEA D7 – Projet E2] ;

⁽²⁾ Puis, une approche intermédiaire couplant l'utilisation de méthodes analytiques (dont les transformations conformes) et de la Tooth Contour Method [Kuz-03] permet d'obtenir rapidement le réseau de perméances avec un niveau de discrétisation « variable ou paramétrable » et en y insérant la prise en compte de l'effet de saturation [Th.3 - D. Petrichenko];

⁽³⁾ Enfin, l'utilisation d'une relation donnant la perméance d'entrefer, et par conséquent se limitant à la représentation de l'entrefer d'une machine, est aussi possible [Th.2 – A. Ait-Hammouda]. Dans ce cas, la prise en compte de la saturation n'est pas réalisée, par contre, le couplage avec différents domaines comme la mécanique ou la thermique est toujours possible, comme dans la thèse d'A. Fasquelle [Th.7] ;

L'idée générale est de définir un réseau de perméances, dans 2 voire 3 dimensions, limité à la périodicité de la machine et de le coupler aux circuits électriques. L'identification et le calcul des valeurs des perméances du circuit magnétique peuvent se faire de différentes façons :

- par un calcul E.F. magnétostatique (ex. : alternateur à griffes) ou,
- par des méthodes analytiques plus ou moins sophistiquées (cas des machines utilisées pour la traction ferroviaire [Th.2], et des turbo-alternateurs [Th.3]).

Le principe de ces approches est de fournir un réseau précis et facile à évaluer, au prix d'une injection de connaissance à priori. Plusieurs exemples sont référencés en annexe et au § IV : le cas d'un alternateur automobile, d'un turbo-alternateur et de machines de traction. Ces approches permettent aussi d'envisager une optimisation des machines étudiées.

II.1.4.1. Utilisation de la méthode des éléments finis (M.E.F.) afin de déduire le RdP

Ci-dessous, un exemple est donné sur la détermination du RdP par l'utilisation d'un code E.F. en magnétostatique. L'avantage de cette démarche est d'obtenir avec précision la valeur des perméances, et surtout dans le cas d'une structure complexe [R1], [R2] (partie I 'Résumé').

La première étape est de visualiser les tubes de flux pour différents points de fonctionnement de la machine. Cette étape peut s'avérer assez fastidieuse, comme pour l'exemple de l'alternateur automobile ou à griffes : machine typiquement tridimensionnelle, illustré sur la figure II.4.

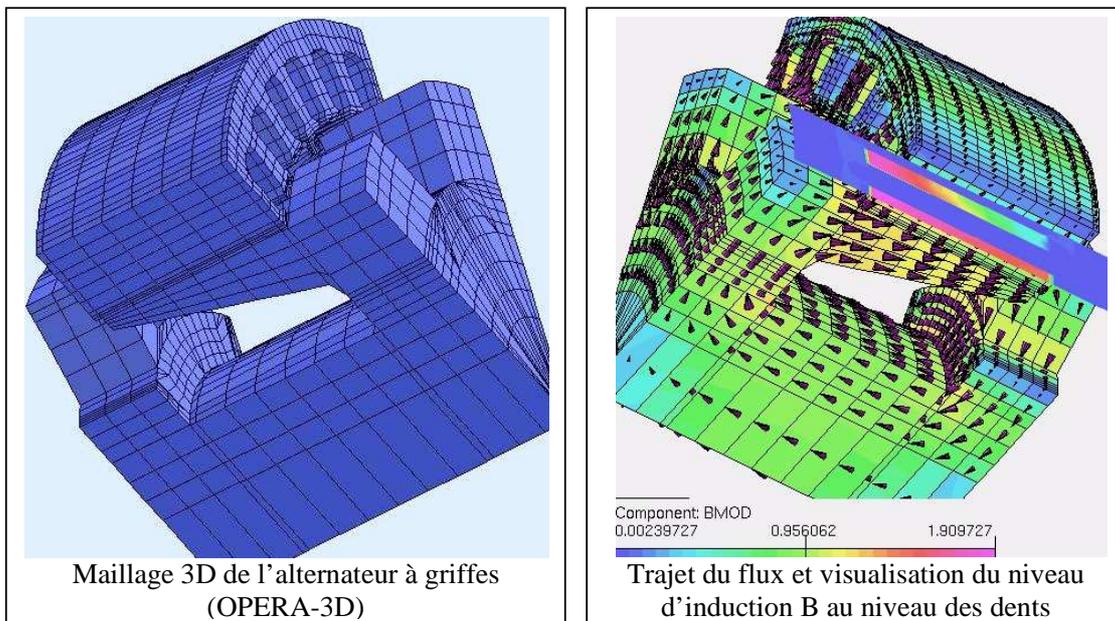


Figure II.4 : maillage et calcul de champ sur un alternateur à griffes.

Pour cela, une procédure automatisée assurant un découpage judicieux permet la position de cartes situées aux endroits 'stratégiques', en vérifiant les conditions de définition du tube de flux (appui sur des équipotentielles, conservation du flux). Ces cartes sont paramétrées et permettent d'évaluer rapidement la perméance (papier en annexe I.1.1).

Ainsi, pour déduire les valeurs des perméances, nous effectuons un calcul en linéaire et nous relevons le potentiel scalaire et le flux. Si le code E.F. emploie une formulation en potentiel scalaire, le calcul du flux se détermine par la relation suivante :

$$\phi = \int_S B^* ds \quad (1)$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_A - \mathcal{E}_B \quad (2)$$

Avec S_A , S_B , représenté sur la figure 2

ϵ_a , ϵ_B : les équipotentielles aux 2 surfaces considérées

Dans le cas d'une utilisation en potentiel vecteur 2D plan, la détermination de la perméance s'effectue de la façon suivante :

$$\phi = (A_1 - A_2) * L \quad (3)$$

$$\mathcal{E} = \int_C H^* dl \quad (4)$$

Avec : A_1 , A_2 : les potentiels vecteurs considérés par exemple au niveau de la section moyenne et aux 2 extrémités correspondant à la largeur du tube et L sa longueur.

Nous obtenons ainsi les perméances principales et celles de fuites par le rapport ϕ / \mathcal{E} . En ce qui concerne l'évaluation des fuites, celles-ci étant assez délicates à déterminer, différents outils existent et permettent de déterminer précisément celles-ci : avec l'utilisation par exemple de la Conformal-Mapping (Toolbox Schwarz-Christoffel Mapping) sous Matlab [Mar-04], [Has-05].

L'intérêt du calcul éléments finis intervient essentiellement pour la zone entrefer surtout dans le cas de structures complexes comme l'alternateur à griffes. En effet, quelque soit la méthode choisie pour la détermination du réseau de perméances, la perméance d'entrefer est un point clé de la modélisation.

a) Evolution de la perméance d'entrefer (prise en compte du mouvement)

La modélisation de l'entrefer pour une machine électrique tournante ou linéaire est l'une des parties les plus délicates. En effet, l'essentiel des échanges d'énergie ayant lieu dans l'entrefer, la validité des simulations dépend de la finesse avec laquelle cette partie est modélisée.

De plus, la qualité du calcul de ces perméances permet une étude précise du comportement mécanique, puisque le couple électromagnétique se calcule grâce aux dérivées de ces perméances par rapport à l'angle mécanique. Lors de la présentation des exemples qui suivent, la prise en compte de la rotation de la machine est, en effet, indispensable pour une étude vibro-acoustique : effet magnétique de la denture mais aussi, lors d'une étude thermique précise, l'effet aéraulique lié à la denture.

Pour leur détermination, il faut prendre en considération la modification des tubes de flux entre le stator et le rotor selon le passage des dents ou pôles rotoriques devant les dents statoriques. La première hypothèse est que la géométrie des tubes de flux ne dépend pas de

l'état de saturation des dents ou pôles rotoriques et des dents statoriques. On peut ainsi définir une perméance $P(i,j)$ reliant chaque dent ou pôle rotorique (j) à chaque dent statorique (i). Elle est fonction de la position relative entre le stator et le rotor θ , figure II.5.

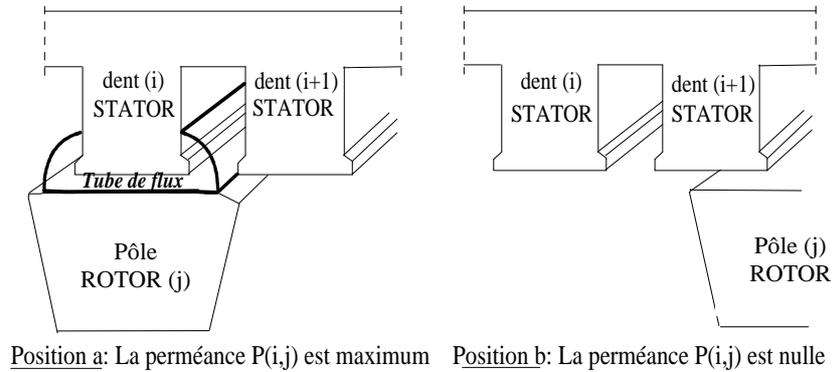


Figure II.5. Evolution du tube de flux entre les points (i) et (j)

L'utilisation d'un code éléments finis en *magnéto-statique* requiert de définir différentes positions stator / rotor. Afin de limiter le nombre de configurations stator / rotor, pour une position donnée, il est possible de déterminer plusieurs valeurs de perméances, par exemple : $Pe(i+1, j)$ ou $Pe(i, j+1)$. Dans ce cas, il suffit de prendre en considération le pas dentaire pour en déduire plusieurs points sur la caractéristique $Pe(\theta)$. Les valeurs discrètes sont interpolées pour obtenir une loi d'évolution continue à dérivée continue, figure II.6.

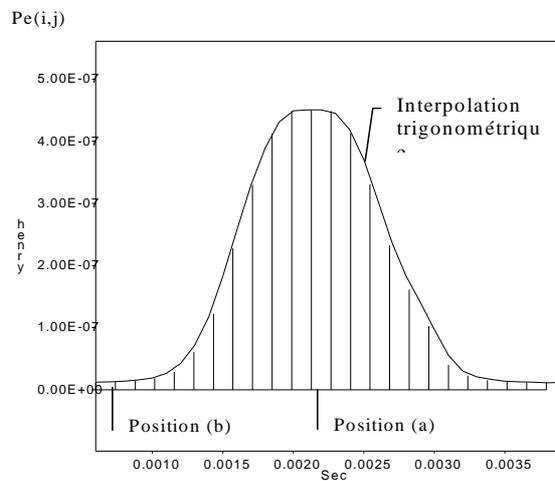


Figure II.6. Evolution de la perméance d'entrefer $Pe(i, j)$

Les deux positions a et b de la figure II.5 donnent dans le premier cas une valeur maximale de perméance et dans le second une valeur nulle. Par contre, sur l'évolution représentée figure II.6, il est préférable pour la position b de considérer une valeur quasi-nulle (par ex. 1/1000 du max) afin de faciliter l'interpolation trigonométrique. Enfin, une décomposition en série de Fourier permet d'en déduire une fonction sous la forme :

$$Pe_{(i,j)} = P_0 + \sum_{k=1}^n a_k * \cos k(\theta - \delta_{(i,j)}) \quad (5)$$

L'utilisation de cette relation pour la perméance d'entrefer est illustrée dans les références [R1], [R2]. Une comparaison à des résultats expérimentaux démontre l'intérêt de cette approche.

b) Avantages et Inconvénients de la démarche

Rappelons que l'avantage de l'approche est la précision sur l'allure $Pe(\theta)$ et la possibilité de traiter des cas complexes comme l'alternateur à griffes. On peut noter plusieurs inconvénients :

- le temps préparatoire est relativement important (temps de prédétermination du RdP) ce qui laisse envisager des difficultés lors d'une optimisation de la structure.
- le nombre de perméances d'entrefer à considérer pour intégrer l'effet de rotation de la machine : $Z_s * Z_r$ (nombre de dents stator * nombre de dents rotor) ; ce qui peut entraîner des problèmes de traitement des matrices !

Pour cela, il peut être intéressant de pouvoir déterminer ces perméances plus simplement. La deuxième solution présentée est d'utiliser des relations analytiques.

Ci-dessous, nous proposons deux possibilités et rappelons les références associées.

II.1.4.2. Utilisation de relations analytiques afin de déduire le RdP

a) Définition d'une perméance d'entrefer globale

La première possibilité est de se limiter au calcul de la perméance d'entrefer 'globale' [Th 2 – A. Ait-Hammouda], [Bru-91]. Celle-ci caractérise la représentation de la denture stator et rotor fonction de l'angle mécanique θ .

L'évolution de cette perméance d'entrefer est différente. Elle prend en considération les dentures Stator / Rotor. Ci-dessous, la représentation de l'allure de $Pe(\theta)$ pour une machine ayant 36 dents stator et 28 dents rotor.

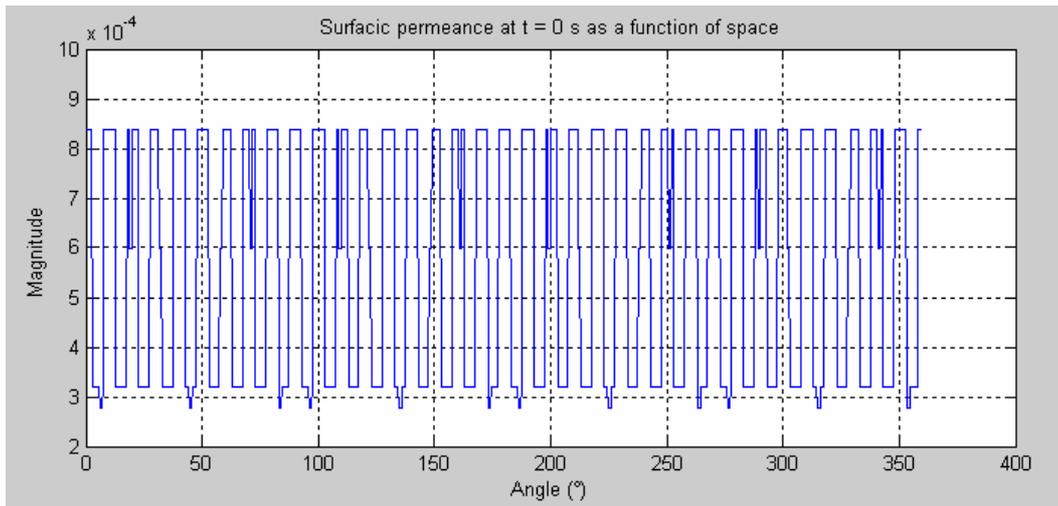


Figure II.7 : Effet de denture stator / rotor d'une MAS 36 / 28.

Quel est l'intérêt de considérer un modèle limité aux perméances d'entrefer ?

Il est intéressant dans certaines études de pouvoir coupler la mécanique et l'acoustique des machines. Dans le cas d'une étude multi-physiques et en fonction du cahier des charges, le temps de calcul peut être un point primordial au détriment de la précision des modèles. Ce modèle peut être considéré comme un modèle initial permettant de coupler différents phénomènes et fournir les tendances à respecter. Une approche complémentaire peut ensuite être utilisée afin de raffiner un point de fonctionnement.

Une application au cas de la MAS est détaillée en annexe (N° I.2).

Les avantages de cette démarche sont surtout la rapidité d'obtention des simulations prenant en compte les harmoniques de denture mais aussi la variation de la géométrie : variation du nombre de dents stator et rotor.

Les inconvénients sont de négliger certains phénomènes comme l'effet de la saturation, puisque la perméabilité du fer est considérée comme infinie, et le couplage circuit.

b) Evolution de la perméance d'entrefer d'une dent stator / à la denture rotor

La deuxième possibilité repose sur une méthode développée au M.P.E.I. (*Moscow Power Electrical Institute*) utilisant la méthode de contours de dents (ou Tooth contour method : T.C.M.) et appliquée lors de la thèse de D. Petrichenko [Th.3]. Cette thèse, commune L2EP – MPEI, laboratoire de Moscou en relation avec les professeurs Ivanov Smolensky et Vyacheslav Kuznetsov, concerne la mise au point d'un outil de conception électromagnétique des turboalternateurs construits par JEUMONT-FRAMATOME.

Notre objectif étant de pérenniser l'utilisation de l'approche RdP et surtout de l'adapter aux outils d'optimisation, il était important de développer un outil complètement 'automatisé' et appliqué dans un premier temps aux turbo-alternateurs de Jeumont. Ci-dessous, nous

présentons l'obtention de la perméance d'entrefer uniquement, l'application au cas du turbo est détaillé ainsi que le RdP équivalent au §IV ainsi qu'en annexe.

L'approche de modélisation proposée par le MPEI concernant l'identification des perméances repose sur des méthodes analytiques. Une méthode particulière pour la détermination de la perméance d'entrefer, la Méthode des Contours de Dents ou 'Tooth Contour Method : TCM', a été développée. Celle-ci peut être appliquée en utilisant un code E.F. ou par l'utilisation de relations détaillées ci-dessous. Une comparaison est donnée sur une géométrie simple.

La démarche :

La T.C.M. ou méthode de contour de dents est basée sur une représentation théorique du champ dans l'entrefer à partir de la somme des champs magnétiques obtenus par des éléments spéciaux que l'on appelle « contour de dent ». Sur l'exemple donné figure II.7, le 'contour de dent' stator concerne uniquement une dent stator entourée par des conducteurs disposés dans les encoches adjacentes. Au rotor, la discrétisation ou 'contour de dent' dépend de la géométrie, celle-ci imposant un réseau de perméances plus ou moins complexe.

La détermination du champ autour d'une dent est obtenue en utilisant des conditions limites particulières, en supposant que la perméabilité du fer stator et rotor est nettement supérieure à celle de l'air. Uniquement trois à quatre dents sont choisis pour la détermination des perméances en plaçant nos conditions limites directement sur les bords de la dent (fig. II.7). Ainsi, la détermination est très rapide et ne nécessite pas la machine complète.

L'allure présentée $\lambda_{sr}(b_{sr})$ de la perméance mutuelle entre le contour de dent stator s et le contour non alimentée du rotor r (potentiel scalaire égal à 0) est obtenue comme une fonction de la position relative $\lambda_{sr}(b_{sr})$ [Kut-03], [CI.13].

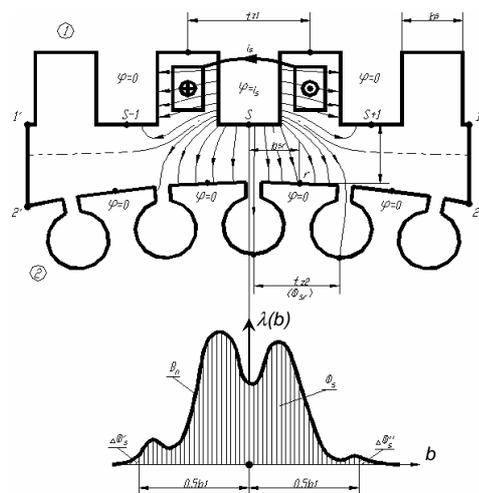


Figure II.7. Représentation de l'approche 'contour de dent'

Cette évolution de perméance d'entrefer utilise des fonctions d'approximation fonction de la position du rotor détaillée ci-dessous.

Dans un premier temps, l'entrefer curviligne est transformé en utilisant une transformation conforme. Les hypothèses suivantes sont appliquées :

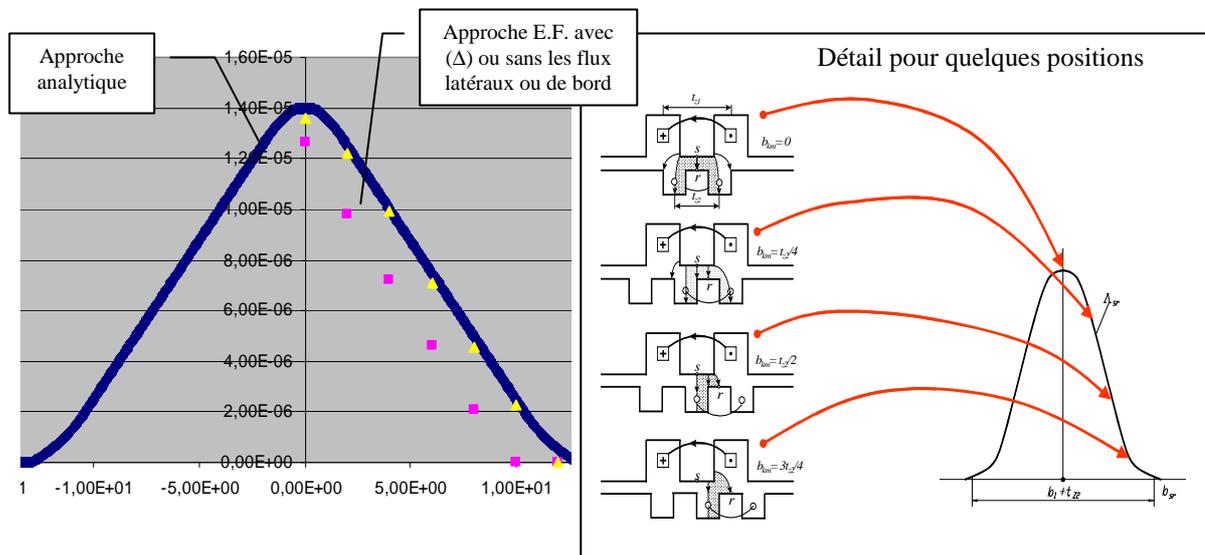
- la forme des encoches n'est pas prise en considération, elles sont considérées comme rectangulaires avec une largeur égale à la largeur du pied de dent ;
- le champ est considéré comme 2d;

De plus, on suppose que le champ dans la région d'une encoche ne peut influencer les encoches voisines de même noyau (stator ou rotor).

Le processus de calcul de la perméance d'entrefer est divisé en 2 parties :

- en premier, seulement l'effet saillant des dents stator est prise en considération, et la partie rotor est considérée comme lisse.
- en second, la saillance du rotor est ensuite insérée, en supposant maintenant le stator lisse.

Cette approche est détaillée en annexe N° I.1.2 (présentation de l'article [CI.13]). Elle a été validée sur un cas simple (3 dents stator dont 1 seule est 'alimentée' et 3 dents rotor) en utilisant un code éléments finis OPERA-2D [Vec-92]. La comparaison des résultats est donnée sur la figure II.9.



Superposition de $Pe(\theta)$ obtenu par l'approche analytique et par E.F. (détail de quelques points de calculs)

Figure II.9. Comparaisons de l'allure de $Pe(\theta)$

L'intérêt principal de cette approche est de nous permettre une obtention rapide du RdP avec une précision très satisfaisante. L'outil développé et présenté au § II.4 permet d'envisager la *CAO de machines électriques*.

En effet, le modèle RdP développé est *complètement paramétré*, avec de plus, la possibilité de gérer la densité d'éléments ou perméances. Les effets 3D et le couplage avec les circuits électriques interne et externe y sont ajoutés (§ II.2.7).

Nous avons donc vu de nombreuses façons de calculer la perméance d'entrefer, qui est un point délicat. Il est également intéressant de détailler la prise en compte du bobinage permettant le couplage circuit mais aussi la prise en compte de la charge mécanique.

II.2.5. Prise en compte du circuit électrique

Le couplage magnétique - électrique repose sur le lien entre les sources de forces magnétomotrices (fmm) placées au niveau du circuit magnétique et le courant d'alimentation, la tension d'alimentation étant liée au flux d'induction.

Pour ce développement, il faut intégrer le circuit magnétique. En effet, la démarche qui suit n'est réalisable que si l'on discrétise le réseau avec la nécessité de définir une perméance d'entrefer entre une dent stator et en dent rotor.

Différentes applications ont été testées : de l'alimentation d'un transformateur en tension associé à son convertisseur [CI.40], de l'alimentation d'une machine asynchrone alimentée par un convertisseur MLI et une source de tension [Der-99], à l'alimentation d'une machine synchrone à aimants [Roi-98] et d'un alternateur à griffes [Th M. Hecquet].

Plusieurs possibilités au niveau de l'insertion des sources de forces magnétomotrice :

- ces sources de forces magnétomotrices \mathcal{F}_i sont insérées devant chaque dent i et placées en série avec le réseau de perméances, figure II.11.

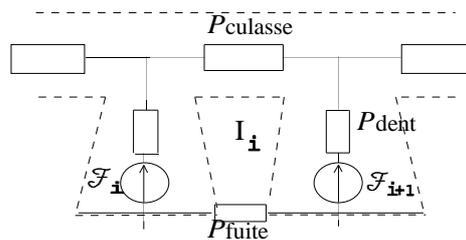


Figure II.11. Contour fermé autour d'une encoche

L'application du théorème d'Ampère à chaque contour fermé faisant le tour des encoches permet d'établir les relations entre courants d'encoches et sources de forces magnétomotrices :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N_s I_i = \sum_j \frac{\mathcal{F}_j}{P_j} \quad (6)$$

$$\text{or } \sum_j \frac{\mathcal{Q}_j}{P_j} - \mathfrak{F}_{(i)} + \mathfrak{F}_{(i+1)} = 0$$

$$\text{soit } \mathfrak{F}_{(i+1)} - \mathfrak{F}_{(i)} = -N_s I_i \quad i = 1, \text{ nbre d'encoches} \quad (7)$$

Il faut de plus imposer que la somme de forces magnétomotrices soit nulle :

$$\sum_{i=1}^{ne} \mathfrak{F}_{(i)} = 0 \quad (8)$$

On obtient alors un système d'équations indépendantes liant les courants dans les encoches, c'est à dire finalement les courants de phases, et les forces magnétomotrices appliquées aux dents statoriques.

Quelques résultats sont présentés par la suite : application au cas de l'alternateur à griffes (en annexe I.1)

Un inconvénient à ce positionnement des sources de forces magnétomotrices apparaît lors de la décomposition de la dent en plusieurs zones.

- Dans le deuxième cas, ces sources de forces magnétomotrices 'MMF' sont insérées au niveau des branches horizontales en série avec les perméances de fuites: figure II.12., sachant que sur cette exemple, les dents statoriques sont décomposées en 4 zones.

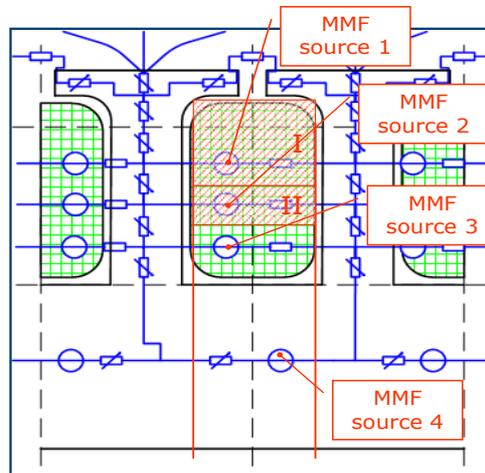


Figure II.12. Sources de force magnétomotrice

Pour exemple, la source MMF1 est déterminée à partir de la 'région' de bobinage 'I', puis la source MMF2 à partir de la région de bobinage 'I + II', etc.... [CI.13].

Des détails du circuit complet avec le couplage et la description du système d'équations sont placés en annexe et correspondent à la référence précédente. A cela, s'ajoute quelques résultats *appliqués au cas d'un turbo-alternateur.*

Remarque : dans le cas d'un bobinage à pas fractionnaire, la modélisation se fera sur une machine complète. Dans le cas contraire, notre réseau est construit sur une période électrique uniquement.

A partir de ce couplage circuit, il est possible de connecter un convertisseur : cas du redresseur associé à l'alternateur à griffes. Disposant des grandeurs externes, des calculs de puissances sont envisageables. Quant au couple, on se base sur la relation (9) permettant d'estimer le couple électromagnétique :

$$C_{EM} = \frac{1}{2} \cdot \sum U^T \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial \theta} \cdot U \quad (9)$$

Avec U – différence de potentiel magnétique, Λ - perméances, θ - angle du rotor

Celle-ci repose sur l'hypothèse suivante : seule la perméance d'entrefer évolue en fonction de l'angle mécanique θ sachant que ce milieu est linéaire [Th M.Hecquet], [Th.3] de D.Petrichenko.

Ceci nous permet d'obtenir les harmoniques de couple qui peuvent engendrer en fonction du type de charge connectée des vibrations et un niveau acoustique non négligeable. Disposant du couple électromagnétique, il est très facile d'ajouter le couplage mécanique en y insérant l'équation de la mécanique :

$$C_{EM} - C_r = J \cdot d\Omega/dt \quad (10)$$

En négligeant le couple de pertes ainsi que les frottements (une identification expérimentale peut être nécessaire pour identifier l'inertie de façon précise ainsi que les pertes mécaniques afin de corriger la relation).

Afin d'améliorer notre modèle et tendre vers le dispositif réel, les effets de saturation ainsi que les effets 3D sont ajoutés.

II.2.6. Prise en compte de la saturation (perméance du circuit magnétique)

Les perméances du circuit magnétique varient en fonction du flux qui les traverse (exemple figure II.10). La prise en compte de la saturation par des calculs E.F., correspondant au cas N°1 précédent, demanderait un temps de calculs considérable afin d'établir les différentes caractéristiques $P(\phi)$:

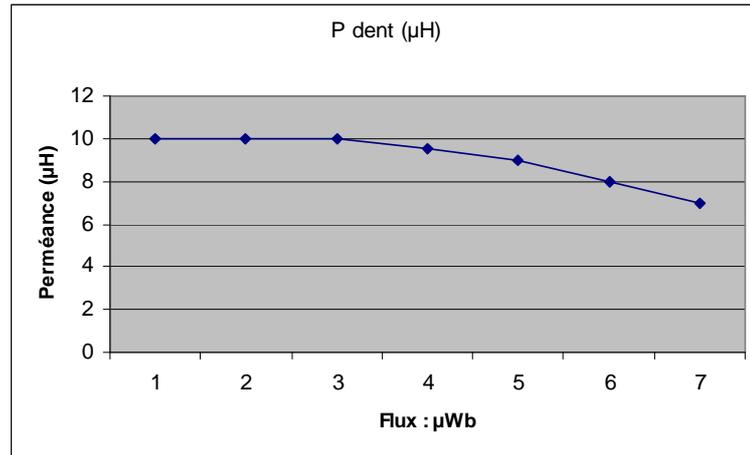


Figure II.10. Perméance en fonction du flux

Ainsi, une première démarche fut la suivante :

- on approxime la courbe de saturation moyenne $b(h)$ par la relation suivante [Mar-90] :

$$v_r = \frac{1}{\mu_r} = \varepsilon + (c - \varepsilon) \frac{B^{2\alpha}}{B^{2\alpha} + \tau} \quad (11)$$

Où B est la norme de l'induction, μ_r la perméabilité relative du matériau, ε , c , α et τ sont des coefficients déterminés par approximation au sens des moindres carrés.

- puis, on suppose que l'induction magnétique est constante dans chaque perméance ce qui permet alors d'écrire pour une induction donnée :

$$P_{nl} = P_l \frac{\mu_{rl}}{\mu_r} \quad (12)$$

Où P_l est la valeur de la perméance obtenu par le calcul E.F. en linéaire, μ_{rl} la perméabilité constante utilisée dans le calcul E.F. et μ_{ml} la perméabilité calculée à l'aide de la formule (11).

Cette démarche possède l'avantage de ne nécessiter aucun calcul de champ supplémentaire. Par contre, celle-ci peut s'avérer *assez restrictive dans les domaines où la saturation est très localisée*. Il faut alors décomposer le circuit magnétique plus finement dans ces zones sachant que le temps de calcul sera plus important. Pour cela, il est intéressant de disposer d'un *réseau à topologie variable* (exemple du turbo-alternateur au § IV).

II.2.7. Prise en compte des effets 3D

Plusieurs solutions peuvent être apportées en utilisant les réseaux de perméances :

- intégrer ce phénomène en définissant un réseau tridimensionnel,
- intégrer une longueur équivalente pour le calcul des perméances.

Deux exemples permettent d'illustrer ces 2 cas :

- l'alternateur à griffes : définition d'un réseau 3D afin de considérer le parcours tridimensionnel du flux (résumé en annexe I.1.1 et [R1]),
- le cas du turbo-alternateur : prise en compte des événements permettant le refroidissement de la machine et des effets d'extrémités : flux latéraux existant dans le cas d'entrefer important ! (Voir annexe I.1.2 & [R15]).

Dans cette dernière référence, nous avons détaillé le cas du calcul de la longueur effective pour l'entrefer :

$$L_{eff\delta} = (moy(L_s, L_r) + 2 \cdot \delta) \cdot K_{\delta}^{-1} \cdot K_{\delta'}^{-1} \quad (13)$$

(Cette relation est détaillée dans l'article [R15] placé en annexe I.1.2)

Elle prend en compte la longueur moyenne stator-rotor (qui peut être différent dans le cas des turbo), le flux d'extrémité ou latéraux limité à deux fois la hauteur de l'entrefer [R15], ainsi que les effets des canaux de ventilations ou événements statorique puis rotorique.

L'avantage dans ce cas est de conserver un modèle 2D et par conséquent de limiter les temps de calcul.

II.2.8. Conclusion sur l'approche « RdP »

L'approche « réseau de perméances » permet de réaliser un bon compromis temps de calcul – précision. Plusieurs exemples présentés au § IV et en annexe viendront valider ce point.

Sur le RdP, nous avons montré l'importance du calcul de la perméance d'entrefer mais aussi différentes méthodes de calcul permettant de retrouver un compromis entre le temps préparatoire concernant l'obtention du RdP et la précision de la loi d'évolution de $Pe(\theta)$. Nous rappelons ci-dessous les avantages et inconvénients de l'approche.

Avantages de l'approche :

En associant à la définition du réseau les paramètres de la géométrie et en ayant un outil permettant la génération automatisée du réseau, les avantages sont les suivants :

- possibilité de prendre en considération la modification de la géométrie avec une obtention rapide du RdP,
- bon compromis 'temps de calcul – précision',
- définition d'un réseau tridimensionnel si nécessaire,
- topologie paramétrée avec la possibilité d'affiner le maillage,
- mise au point d'un outil de CAO, voir de conception optimale.

Inconvénients de l'approche :

Les inconvénients sont :

- de travailler avec une topologie fixe ce qui pose le problème de disposer de données géométriques initiales,
- de considérer que les perméances de circuit ont une induction homogène dans le tube, cela pose problème au niveau des têtes de dents et au niveau des coudes !
- les perméances de fuites évoluent en fonction de l'état de saturation. Il est alors nécessaire de définir différentes zones au niveau des encoches.

Enfin, sur les différentes méthodes proposées pour le calcul des perméances soit par éléments finis ou par des méthodes analytiques, ces dernières sont les mieux adaptées aux problèmes de conception. Longtemps critiqués pour leurs hypothèses réductrices et simplificatrices, la problématique de la conception des machines leur redonne leur juste place permettant ainsi d'envisager une optimisation de structures à partir de RdP couplés.

II.3. Couplage avec des modèles vibro-acoustique et / ou thermique

Cette partie ‘couplage vibro-acoustique et thermique’ essentielle peut être distincte de l’approche RdP. En effet, il est possible d’intégrer ces phénomènes à partir d’une approche analytique. On retrouve les notions de granularité de modèles et de couplage de modèles de différents types.

La modélisation par « réseau de perméances » reste la base de représentation du dispositif.

II.3.1. Couplage vibro-acoustique

L’analyse du comportement vibratoire des machines électriques n’est pas un sujet récent. Des études ont été menées de manières importantes dès les années 40/50 [Tim-39], [Jor-50], [Har-60], mais aussi plus récemment [Yang-81], [Tima-89]. Ces ouvrages et de nombreux articles de référence [Bel-91], [Ver-94], [Jav-95], [Had-95], [Bru-91], [Bru-97] constituent une bonne base de départ pour l’étude du bruit dans les machines électriques. Ces travaux ont montré que les vibrations sont la conséquence de l’excitation d’un système mécanique par des efforts dont l’origine est électromagnétique. Il existe aussi d’autres sources, telles que les bruits aérodynamiques, les bruits de roulements... qui ne sont pas pris en compte dans cette étude.

Deux voies peuvent être adoptées pour réduire les vibrations : soit par action sur l’excitation [Cam-97], [Gab-99], soit par modification de la structure du système [Aya-00], [Cor-00], [Th.2 – Ait-Hammouda]. Il nous faut aussi regarder l’influence de l’association convertisseur-machine [Bel-91], [Hub-00], [Cor-00], [Hub-03], le convertisseur étant utilisé comme variateur de vitesse mais aussi en vue de limiter le niveau acoustique par un choix judicieux des fréquences de découpage. D’autres stratégies peuvent être employées afin de limiter le bruit d’origine électromagnétique par injection de courants en opposition de phase [Cas-96], par ajout d’enroulements [Col-97], [Lec-03] ou par des piézo-électriques placés judicieusement [Min-05].

Notre objectif et contribution concerne le développement d’un modèle électro-vibro-acoustique couplé afin de prédéterminer le bruit d’origine électromagnétique d’une machine électrique. Celui-ci est ensuite associé à une méthode d’optimisation en vue d’une conception optimale de machines avec comme contrainte le bruit. Un exemple est fourni en annexe I.2.

Définition du modèle électro-vibro-acoustique :

Le réseau de perméances fournit l’induction fonction du temps et de l’espace à partir de la relation (21) et ceci quelque soit la méthode de calculs de la perméance d’entrefer intégrant les effets de denture.

$$B(t, \alpha^s) = \Lambda(t, \alpha^s) (f_{mm}^r(t, \alpha^s) + f_{mm}^s(t, \alpha^s)) \quad (14)$$

Avec f_{mm} : forces magnétomotrices stator et rotor et Λ la perméance d’entrefer

Ce point est nécessaire afin d'identifier les harmoniques de force à l'origine du bruit d'origine électromagnétique. A ces harmoniques de denture viennent s'ajouter ceux liés aux forces magnétomotrices statorique et rotorique dus à discrétisation du bobinage.

Afin d'estimer les vibrations, il faut déterminer les forces appliquées sur la structure. De nombreux travaux sur le calcul des forces existent et ont posé le problème de la méthode choisie [Rey-87], [Ben-93], [Lef-97], et plus récemment O. Barré [th.6], [R16] sur un dispositif réel à faible perméabilité relative.

Dans notre cas, le calcul est, si l'on peut dire, global car on estime la force appliquée à une dent statorique et par conséquent, on définit la densité de force par la relation suivante. Une représentation est donnée figure II.11.

$$f(\alpha^s, t) = \frac{[B(t, \alpha^s)]^2}{2\mu_0} \quad (15)$$

Celle-ci peut s'écrire sous la forme suivante :

$$f(\alpha^s, t) = \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{\omega_i=1}^{+\infty} \hat{F} \cos(m \cdot \alpha^s + \omega t) \quad (16)$$

Où : $\omega_i = (u_1 \pm u_2) \omega_r$ est la pulsation de la force.
 $m = (v_1 \pm v_2)$ correspond à l'ordre du mode.

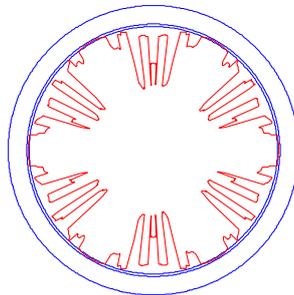


Figure II. 11 : allure de la force globale

Ces forces appliquées à la structure sont la cause des vibrations mécaniques en correspondance avec les *modes propres et leurs fréquences associées* [Jor-50], [Tima-89], [Jang-81]. En effet, le point indispensable pour la suite est de connaître les forces d'excitation agissant sur la structure ainsi que l'ordre du mode associé. Un exemple est donné ci-dessous permettant d'obtenir très rapidement le mode associé à une raie : la raie principale ou la plus importante est ci-dessous de mode 2 pour une fréquence de 579Hz

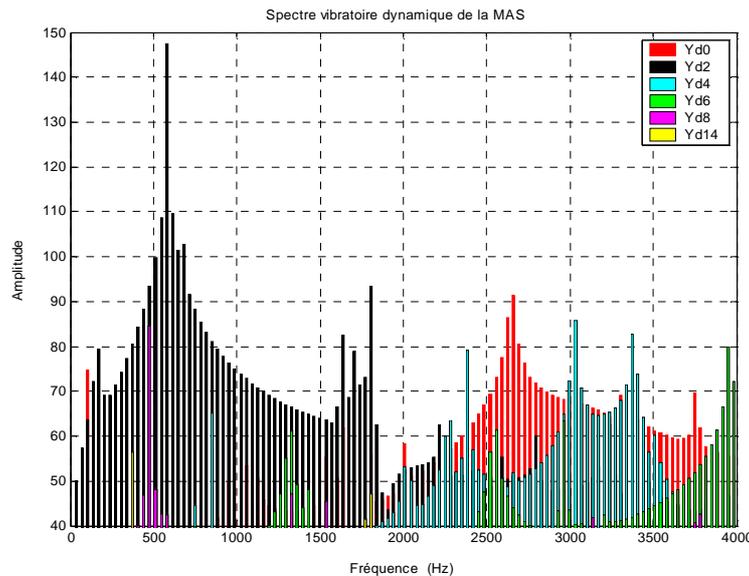


Figure II.12 : Spectre vibratoire & association des modes pour les différentes raies
(Présentation de l'article correspondant en annexe I.2)

La validation du calcul de forces radiale ainsi que tangentielle est donnée pour une application à l'alternateur à griffes [R4] ainsi que pour le cas des machines dédiées traction ferroviaire en utilisant un code éléments finis (détaillé en annexe I.2.).

Nous avons aussi montré l'importance des forces radiales par rapport aux forces tangentielles. Bien évidemment, les harmoniques de forces tangentielles se retrouvent au niveau des harmoniques du couple électromagnétique (relation 9)

Au niveau du bruit émis par une machine électrique liée à la déformation de la structure, seules les forces radiales appliquées aux dents statoriques sont prises en considération. Les vibrations du rotor sont négligées de même que l'effet des forces tangentielles sur les dents statoriques.

Notre démarche s'est concentrée sur la modification de la structure.

II.3.1.1. Modèle vibratoire

Notre modèle complet 'électro-vibro-acoustique' peut être décomposé en trois blocs. Le premier concerne la modélisation électromagnétique par réseaux de perméances (ou éléments finis), le second la modélisation mécanique vibratoire et le dernier la partie acoustique.

Ces trois modèles sont chaînés séquentiellement comme l'illustre la figure ci-dessous, les grandeurs d'entrée et de sortie des différents modèles étant rappelées. Ce couplage 'faible' permet de ne pas se limiter à la réduction des forces pour réduire le bruit, particulièrement dans le cas d'une application à vitesse variable.

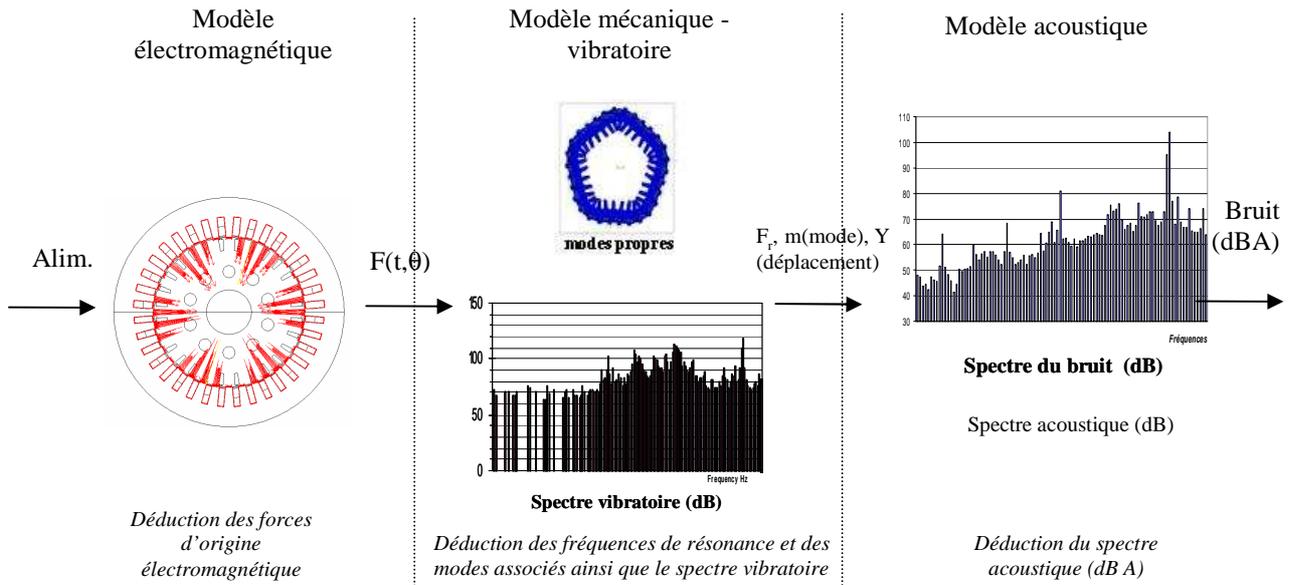


Figure II. 13 : Modèle électro-vibro-acoustique de la machine.

La transformation ou la propagation des vibrations et l’analyse modale de structures, requiert une expertise, en électrotechnique, en mécanique et acoustique. Pour cela, une *collaboration avec le dépt. Vibro-acoustique de l’IEMN* par l’intermédiaire de M. Goueygou a permis d’élargir nos connaissances.

Le modèle analytique vibratoire prend en compte la tôle constituant la culasse, la carcasse qui l’entoure, les dents et le bobinage. Nous pouvons remarquer sur la figure II.14, qu'en fonction de la valeur du mode, la déformation se présente sous différentes formes. Par exemple, l'onde de force responsable de la déformation ovale correspond au mode 2, triangulaire au mode 3.

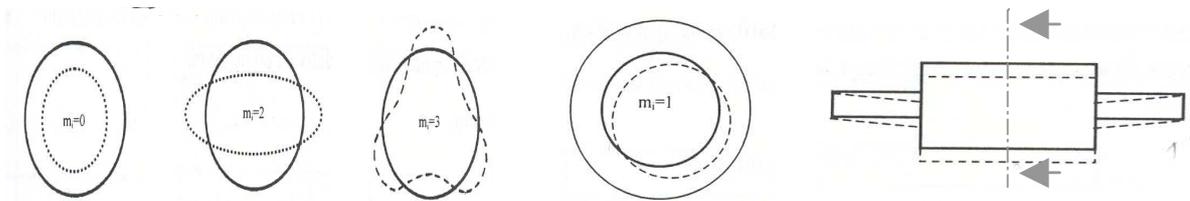


Figure II.14. Exemple de déformation du stator pour différents modes.

Différentes études ont montré que les modes m de rang faible sont les plus importants, et essentiellement le mode 2 qui peut être dangereux s’il est excité [Tima-89].

Il faut savoir que pour chaque déformation, on peut associer une fréquence de résonance mécanique. Les relations fournies par [Jor-50] permettent facilement de retrouver la fréquence de résonance de chaque mode d'un stator (culasse + dents). Ce modèle fut amélioré par Verma [Ver-02], en prenant en compte le bobinage et la culasse. Quelques papiers ont aussi montré

l'influence du montage et des flasques sur le calcul des fréquences de résonance pouvant apporter des variations de 25 à 40 % sur les valeurs [Zhu-99], [Cai-02].

Calcul des fréquences de résonance

Pour le mode $m=0$, un effort de traction de la culasse se produit, l'amplitude de la déformation statique du stator est donné par :

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot R_c^2 \cdot \Delta}} \quad (17)$$

Où :

$$\Delta = 1 + \frac{M_{te}}{M_{yo}} \quad \rho : \text{densité volumique du stator} ; \quad E : \text{module de d'élasticité.}$$

La prise en compte des dents statoriques intervient dans le coefficient Δ .

Dans le cas où le stator est bobiné, il est possible de prendre en compte le poids du bobinage en modifiant Δ de la manière suivante :

$$\Delta = 1 + \frac{M_{te} + M_{wi} + M_{ca}}{M_{yo}}$$

Dans le cas où $m=1$, il se produit plutôt une flexion de l'arbre du rotor.

$$F_m = F_0 \frac{h \cdot m \cdot (m^2 - 1)}{2\sqrt{3} \cdot R_c \cdot \sqrt{m^2 + 1}} \quad (18)$$

ξ_a : Coefficient d'amortissement ; f_r : Fréquence vibratoire ; F_m : Fréquence de résonance mécanique.

Les vibrations radiales du stator sont maximales quand les fréquences d'excitation harmonique de la force sont égales ou près des fréquences de résonances mécaniques, et ceci est possible quand nous avons une coïncidence des modes.

Calcul des déformations

Les forces électromagnétiques sont responsables des vibrations du stator. Elles sont caractérisées par des déformations Y_{md} dont il faudra calculer les amplitudes. Après avoir calculé les fréquences de résonance de la structure mécanique, nous définissons au-dessous les déformations dynamiques pour les modes $m > 1$.

$$Y_{md} = \frac{12 \cdot R_a \cdot R_c^3 \cdot \hat{F}}{E \cdot h^3 \cdot (m^2 - 1)^2 \sqrt{\left(1 - \left(\frac{f_r}{F_m}\right)^2\right)^2 + \left(2 \cdot \xi_a \cdot \frac{f_r}{F_m}\right)^2}} \quad (19)$$

Notons que le coefficient d'amortissement est choisi ξ_a ne peut être déterminé théoriquement. Cependant, différentes références [Tima-89] considère que pour une machine asynchrone celui-ci est compris entre 0,01 et 0,04. Cette valeur de coefficient d'amortissement a pu être

validée expérimentalement sur les machines étudiées [CR.7], [P2] afin de valider la plage de variation.

II.3.1.2. Modèle acoustique

L'intensité acoustique $I(x)$ peut s'écrire en fonction de la fréquence, de l'amplitude des vibrations, de l'ordre du mode et de la surface vibrante [Cor-00]:

$$I(x) = \frac{\sigma 8200 f_r^2 Y_{md}^2 S_e}{4 \pi x^2 (2m+1)} \quad (20)$$

Le coefficient σ , appelé facteur de rayonnement, celui-ci traduit la capacité d'une machine à être un bon haut-parleur et peut être calculé de deux façons différentes suivant que l'on assimile la machine à une sphère ou à un cylindre.

Dans le cas de l'étude des machines de traction, celles-ci seront assimilées à une sphère ayant un diamètre à peu près équivalent à leur longueur.

σ est un facteur qui évolue en fonction de λ (longueur d'onde) est du diamètre de la machine, dépend aussi du nombre de mode vibratoire [Tima-89] :

$$\sigma = f\left(\pi \frac{D}{\lambda}\right), \quad \lambda = \frac{c}{f_r} \quad (c: \text{Célérité du son de } 344\text{m/s}; f_r : \text{Fréquence de la vibration})$$

Il apparaît que $I(x)$ est inversement proportionnelle à l'ordre du mode, d'autre part l'intensité acoustique est proportionnelle au carré de l'amplitude de vibration. En général, nous définissons I , et W en décibels nous définissons ainsi le niveau de pression acoustique, l'intensité acoustique et la puissance acoustique :

$$L_p = 20 \log\left(\frac{P}{P_0}\right), \quad L_i = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right), \quad L_w = 10 \log\left(\frac{W}{W_0}\right).$$

Avec : $P_0 = 20 \mu\text{Pa}$, $I_0 = 10^{-12} \text{W/m}^2$, $W_0 = 10^{-12} \text{W}$

II.3.1.3. Validation du modèle vibro-acoustique

Validation de la partie vibratoire :

Le modèle analytique vibratoire est validé numériquement par ANSYS (calcul des modes propres de la structure statorique) dans différentes configurations: tôle-seule (culasse sans dents), tôle+dents, tôle+dents+carcasse et tôle+dents+bobinage+carcasse.

Des mesures sur de nombreuses structures furent également réalisées en vue de valider nos fréquences de résonances mais aussi le mode associé. Pour cela, nous nous sommes reposés sur l'outil 'PULSE' [Bru-83] de chez Bruel&Kjaer et plus particulièrement du module AME : analyse modale expérimentale.

Le calcul des fréquences de résonance s'effectue de la manière suivante :

- nous déterminons la fonction de transfert, accélération (mesurée par un accéléromètre) sur force (appliquée par un marteau de choc). L'outil 'Pulse-AME' permet d'obtenir une fonction de réponse en fréquence, au maximum des déformations correspondent les fréquences de résonances de la structure. Un maillage est défini (figure 17) afin de nous permettre d'identifier les modes associés à ces fréquences de résonances. L'inconvénient de l'approche est de placer les parties à tester en mode libre-libre, par exemple, suspendu.

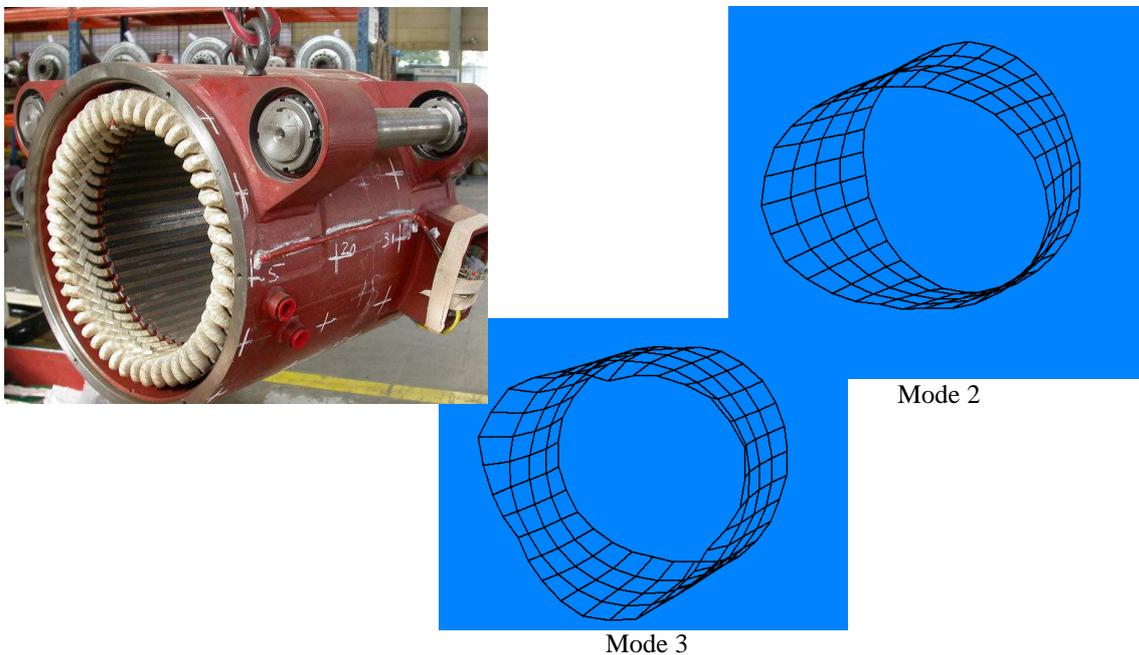


Figure II.15 : Outil 'PULSE'

Une des fonctionnalités importante de l'outil, nous avons la possibilité de déterminer la valeur *des coefficients d'amortissement*, mais aussi *du mode associé à chaque fréquence de résonance*.

De nombreux tests ont été effectués sur des stators de machines ayant des diamètres variant de 20 à 30cm jusqu'à 1m avec une validation sous ANSYS (analyse modale par E.F.) et par PULSE. Les résultats sont très satisfaisants jusqu'au mode 4, au-delà, des erreurs importantes apparaissent.

Notre modèle a été validé pour des modes de rang faible, et nous rappelons que les modes m les plus importants sont inférieurs à 4, essentiellement le mode 2 qui peut être dangereux si il est excité.

Par contre, il faut souligner le problème suivant : tous les effets longitudinaux sont négligés. En effet, le modèle analytique n'associe qu'une seule fréquence de résonance par mode. Cette fréquence est retrouvée dans le cas où le modèle est 2D. Nous avons pu valider ce point sur un tube avec différentes longueurs [Rapport B. Napame - P2].

Validation du modèle acoustique

Sur ce point, uniquement des comparaisons expérimentales furent réalisées. Une présentation de spectres vibratoire et acoustique appliquée au cas de la machine asynchrone est donnée afin de présenter les corrélations entre les différentes raies vibratoires et les raies de bruit (présenté en annexe).

Nos études étant plutôt qualitative, savoir quelle raie réduire ne nécessite pas de connaître précisément son amplitude. Sa fréquence, par contre, doit être parfaitement déterminée. Enfin, compte tenu de la complexité des phénomènes étudiés et les nombreuses étapes de calculs permettant d'aboutir aux résultats, nos résultats ont été très satisfaisants.

II.3.2. Couplage avec la thermique

Quelles sont les démarches possibles sur ces aspects thermiques ?

Nous retrouvons les 3 possibilités : utiliser la méthode des éléments finis ou un modèle à constantes localisées, ou enfin analytique [Bie-98], [Ber-99], [Bro-03], [Sou-06].

En vue de coupler le modèle retenu à notre modèle électromagnétique, notre choix s'est porté sur le modèle à constantes localisées apportant là aussi un bon compromis temps de calcul – précision.

Dans ce cas, le réseau de perméances fournit la valeur des pertes joules. On a la possibilité de déduire la valeur des pertes fer par l'intermédiaire de l'induction et la fréquence, relation de Steinmetz :

$$P_{\text{fer}} = P_{\text{(hystérésis)}} + P_{\text{(courant Foucault)}} = k_h f B^\alpha + k_e f^2 B^2 \quad (21)$$

avec α le coefficient de Steinmetz, K_h et K_e des constantes liées aux données constructeur des matériaux

On peut ensuite injecter ces pertes comme des sources au niveau du modèle thermique.

Une étude sur l'alternateur à griffes a montré la possibilité d'obtenir pour un point de fonctionnement les températures des différentes parties de la machine. Ce modèle à constantes localisées ou modèle de Kirchoff est présenté ci-dessous et détaillé référence [R7]. Cette étude en relation avec Valéo-Alternateur avait été proposée à des étudiants HEI en Travaux d'Etude et Recherche (T.E.R.) encadrés par S. Brisset.

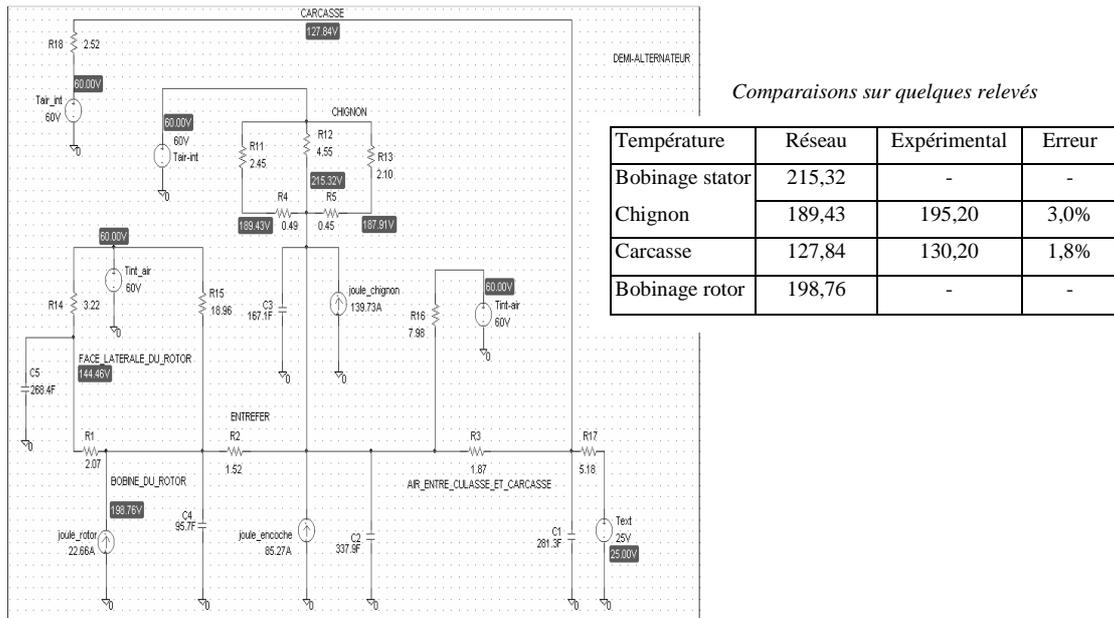


Figure II.16. Réseau de Kirchoff pour un point de fonctionnement de la machine.

Les résultats obtenus sur un point de fonctionnement ont montré la possibilité d'obtenir un réseau thermique d'une machine typiquement tridimensionnelle, cas de l'alternateur automobile. Une difficulté pour valider le modèle pour 'n' point de fonctionnement : être capable de déterminer la variation des coefficients d'échange sachant que la machine possédait une ventilation forcée (ventilateur interne) !

Dans la partie III de ce rapport 'perspectives à court et à long terme', un de nos premiers points concerne l'amélioration et la validité pour une application vitesse variable, de modèles multi-physiques. Pour cela et en partenariat avec le LME (Laboratoire de Mécanique et d'Énergétique) de Valenciennes, une étude aéro-thermique de machines 'auto-ventilées' appliquées à la traction ferroviaire, a débuté dans le cadre de la thèse d'Aurélié Fasquelle en 2005 [Th.7 - A. Fasquelle], [Fas-06], [Fas-06a].

L'idée est de pouvoir estimer au mieux ces coefficients d'échange quelque soit le point de fonctionnement et d'intégrer la prise en compte des pertes fer, un couplage entre la partie électrique et thermique devant être réalisé.

II.3.3. Conclusion sur la notion de couplage multi-physique

Ce couplage multi-physique est indispensable en vue d'une optimisation ou conception optimale de machines. Il faut bien entendu pour cela valider nos modèles pour une large plage de fonctionnement. Nous nous sommes reposés pour cela sur des calculs E.F. ou sur des mesures expérimentales.

En ce qui concerne le modèle électro-vibro-acoustique permettant la prédiction du bruit et des vibrations d'une machine électrique, nous avons testé la machine à différentes vitesses, cela nous a permis de mettre en évidence les raies les plus significatives, parmi lesquels l'harmonique de denture. Ce modèle prend en compte des paramètres de type géométriques, électriques mais aussi mécanique.

Un outil spécifique *DIVA (DIMensionnement Vibro-Acoustique)* a été développé sous Matlab lors de la thèse d'Amine Ait-Hammouda.

A cet outil, notre idée est de venir coupler un réseau nodal permettant d'ajouter le couplage thermique [Th.7 - A. Fasquelle].

Ainsi, on peut envisager une conception optimale de machines en vue de réduire par exemple le bruit d'origine électromagnétique dès la phase de conception.

II.4. Développement d'outils dédiés

Le développement d'outils permettant la modélisation de dispositifs électrotechniques est un point essentiel afin de répondre au mieux aux différents cahiers des charges rencontrés.

De plus, l'apport est de pouvoir concrétiser cette démarche des RdP sur différentes applications. Un autre avantage d'avoir un outil propre est de faciliter le couplage avec des outils d'optimisation.

Bien évidemment, le souci est la maintenance de ces outils. Pour cela, la stratégie proposée fut de développer nos différents outils sous le même « support », représenté sur le graphe ci-dessous.

En effet, ces dernières années, nous avons 'centralisé' nos différents développements sous Matlab : « outil support ». L'avantage est de pouvoir disposer de nombreuses 'toolboxes' prédéfinies que ce soit pour le calcul scientifique, pour le post-processing (visualisation des résultats) mais aussi pour l'optimisation (nombreuses fonctions proposées : SQP, GA).

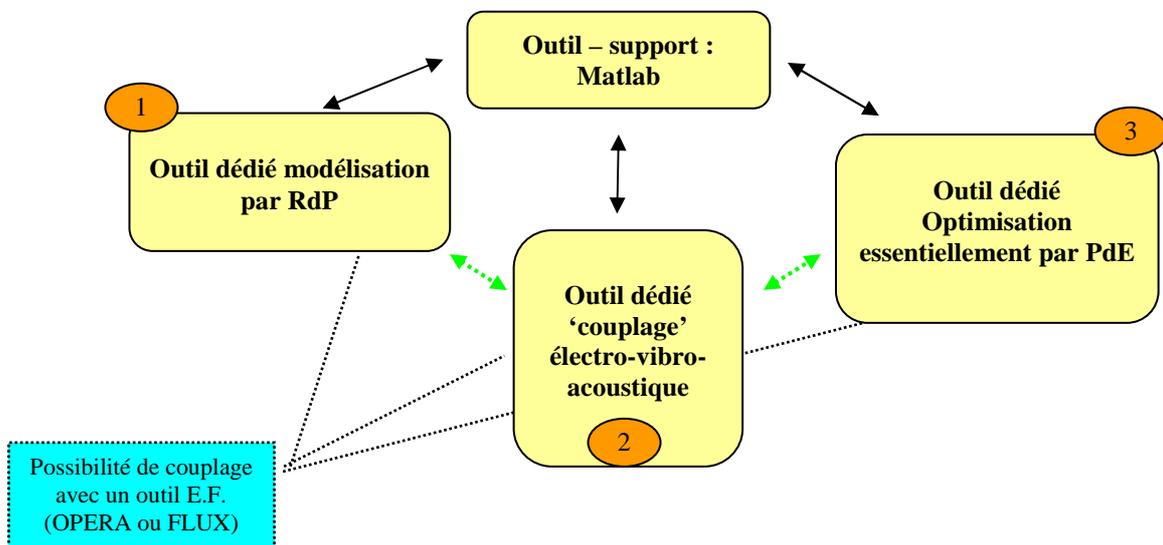


Figure II.17. Développement d'outils sous Matlab

Ci-dessous, un historique est rappelé sur la création de différents outils permettant de construire, d'améliorer et d'adapter ceux-ci en vue de les coupler entre eux et avec un code éléments finis.

Les outils présentés sont les suivants :

- a) Outils orientés 'modélisation par RdP'
 - en utilisant la M.E.F : travaux avec SIREPCE [Roi-98 & R5],
 - et en utilisant des méthodes analytiques uniquement : TURBO-TCM.
- b) Outil dédié 'couplage' permettant la prise en compte des couplages électro-vibro-acoustique : DIVA (Dimensionnement Vibro-Acoustique)
- c) Outil dédié 'optimisation' par plans d'expériences essentiellement présenté et détaillé dans le chapitre III.

Différentes applications sont présentées au paragraphe IV et annexe permettant d'illustrer et de présenter leurs différents avantages.

II.4.1. Outils exploitant l'approche des Réseaux de Perméances :

Plusieurs outils furent développés et utilisés au cours de ces différents travaux. L'évolution de nos outils est due en partie aux évolutions des produits informatiques. Les premières simulations de RdP ont été réalisées sous Allan-Neptunix (produit Gaz de France) permettant de construire le RdP sous forme de boîtes noires et de lier ces boîtes : construction d'un réseau, le système d'équations étant généré directement par l'outil [Th M.Hecquet]. Celui-ci fut couplé à un code éléments finis afin d'effectuer une étude de sensibilité de la forme des griffes d'un alternateur automobile (exemple détaillé en annexe).

Des problèmes matériels et de simulations (initialisation de paramètres) nous ont poussés au développement d'un premier outil propre au labo : SIREPCE [Roi-98]. Un article en commun sur deux cas traités par Sirepce est référencé [R5]. L'outil nous permettait une plus grande souplesse, la possibilité à l'époque de bénéficier déjà des toolboxes de Matlab pour le calcul matriciel mais aussi pour le post-processing.

Cet outil est encore à l'heure actuelle opérationnel mais présente les inconvénients suivants :

- Difficulté pour affiner un réseau de perméances (par exemple, considérer 3 couches au niveau de la culasse au lieu d'une seule),
- problème de gestion de la taille des matrices (le nombre de perméances était limité à une centaine : cas de l'alternateur à griffes),
- temps de calcul relativement important dans ce cas.

Pour ces différentes raisons et surtout afin de faciliter le couplage avec nos outils d'optimisation, les travaux de D. Petrichenko ont demandé le développement d'un nouvel outil 'TurboTCM' prenant en considération ces remarques.

L'outil « TurboTCM » :

Notre idée dans cette présentation est de donner les possibilités de l'outil concernant la définition du réseau de perméances, le paramétrage, les simulations... Une présentation rapide est faite, suivi d'un exemple au paragraphe suivant sur la modélisation d'un turbo-alternateur.

Reposant sur un réseau de perméances paramétré et combiné avec des calculs analytiques, l'avantage de TurboTCM est de pouvoir déduire très rapidement le circuit magnétique en quelques secondes. Des calculs en statique et en dynamique sont ensuite possibles.

La réalisation de l'outil est présentée, incluant la méthode de calcul du circuit, développée en C++, et le solveur développé sous Matlab. Celui-ci génère automatiquement le réseau de perméances paramétré.

En ce qui concerne les données d'entrée, la fiche électrique et magnétique est nécessaire et doit contenir : les dimensions stator et rotor, le nombre d'encoches stator et rotor, leurs dimensions, la description complète du bobinage stator et rotor, les caractéristiques des matériaux, les spécifications du circuit électrique, etc.

A partir de toutes ces informations, un circuit magnétique équivalent paramétré est défini mais aussi le circuit électrique et les équations de couplage. La définition de ce réseau couplé peut être réalisée automatiquement ou manuellement (par exemple, durant la phase de test de l'outil).

L'outil permet de modifier la topologie du réseau de perméances (nombre de couches variable) mais aussi la possibilité de prise en compte de géométrie complexe (figure II.17) en insérant uniquement les coordonnées de la géométrie puis décomposition en n zones, ce dernier point permet d'envisager d'étudier différents types de géométrie.

Ci-dessous, un exemple de réseau avec les possibilités de variation du réseau (nombre de couches variable, nombre de dents et de pôles..):

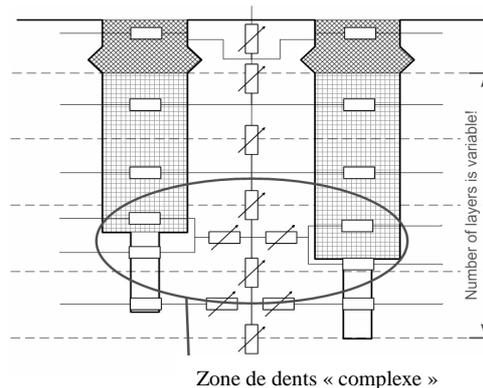


Figure II.17. Développement d'outils sous Matlab

Quelques exemples d'exploitation de l'outil appliqué au cas du turbo-alternateur sont donnés au § IV.

Pour cette application, le nombre de paramètres géométriques et électriques varie entre 150 et 200 pour l'étude. On doit intégrer les différentes formes d'encoches mais aussi la possibilité de relever le flux et l'induction en de nombreux points.

La deuxième difficulté réside dans le nombre de phénomènes à prendre en compte. Les principaux concernent:

- La prise en compte des événements (canaux de ventilations),
- les têtes de bobines,
- le bobinage (prise en compte des isolants et des cales entre plans)
- la présence ou non de cales d'encoche magnétique ou semi-magnétique.

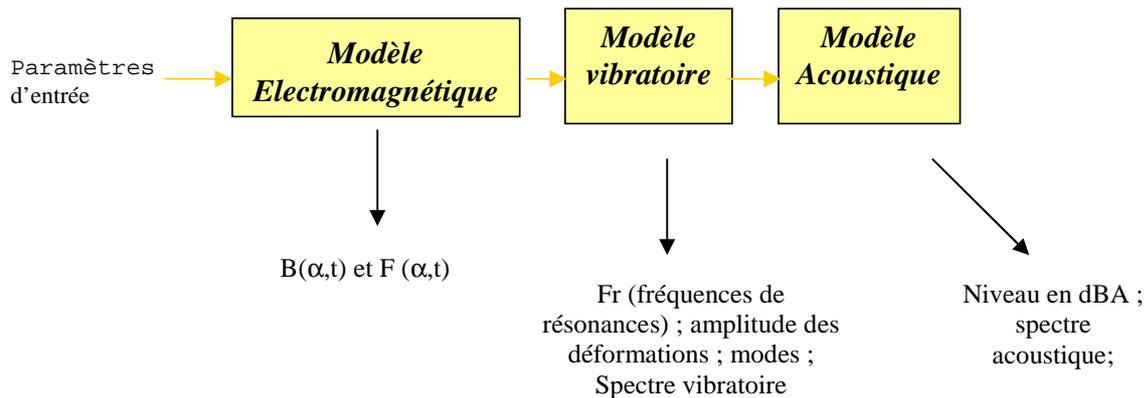
II.4.2. Outils exploitant le couplage vibro-acoustique (outil DIVA):

L'outil développé DIVA : Dimensionnement Vibro-Acoustique pour cette partie 'couplage' multi-physiques repose sur Matlab.

Trois parties sont distinctes :

- une première partie : paramètres d'entrée rassemblant les paramètres électriques – mécaniques et acoustiques permettant ainsi un couplage avec des procédures d'optimisation ;
- une seconde regroupant les modèles vibro-acoustiques qui sont alimentés par une matrice contenant l'induction au niveau de l'entrefer fonction du temps et de l'espace. Ainsi, nous avons la possibilité d'utiliser un code E.F. pour fournir cette matrice et d'en déduire le niveau acoustique correspondant.
- Enfin, la troisième partie contenant la partie 'post-processing'.

Le schéma suivant nous donne les possibilités de sortie de l'outil :



Dans la partie qui va suivre, ces différentes outils sont exploitées sur différents exemples afin d'illustrer l'intérêt de chacun.

II.5. Conclusion sur les prototypes virtuels

Dans ce chapitre, nous avons présenté différentes possibilités de modélisation multi-physiques d'un dispositif, définissant un prototype virtuel. La première partie concernait les problèmes rencontrés, le niveau de granularité à choisir et les différentes approches possibles. Plusieurs exemples illustrant différents niveaux de complexité sont donnés au § IV et en annexe I ; de la méthode des éléments finis appliqués au cas d'un frein linéaire à courants de Foucault aux méthodes analytiques pour le couplage vibro-acoustique en passant par les réseaux de perméances.

Dans une seconde partie, nous avons souligné une des originalités de nos travaux qui concerne l'utilisation de méthodes semi-numériques : modèles à constantes localisées apportant un bon compromis temps de calcul –précision. Puisque le modèle de conception doit être multi-physiques, les points les plus difficiles à maîtriser pour un électrotechnicien sont les aspects thermiques et mécaniques mais aussi économiques. L'électrotechnicien peut s'efforcer de maîtriser ces aspects mais la solution semble être plutôt collaborative et passe par la mise en place d'équipes pluridisciplinaires.

Enfin, nos améliorations et 'perspectives' concernant le prototypage virtuel sont développées dans la partie III de ce rapport 'Synthèse et perspectives'. Elles concernent :

- a) Apport de la thèse d'Aurélie FASQUELLE [Th.7]
 - Développement de modèle aéro-thermique couplé au modèle vibro-acoustique (lien avec le LME de Valenciennes)

- b) Apport de la thèse de Jean Le BESNERAIS [Th.5]
 - Modélisation de l'ensemble Convertisseur + machines (lien avec le LEC de Compiègne - UTC)
 - Amélioration du modèle électro-vibro-acoustique

- c) Apport de la thèse de S. BUZACK [Th.4].
 - Lien avec le T.U.G. Gdansk concernant le développement d'outils en vue de réduire le bruit d'origine électromagnétique dès la phase de conception (Couplage avec des outils de CAO comme AutoCAD)
 - Calculs éléments finis avec ANSYS permettant de valider la partie vibro-acoustique.

III] OPTIMISATION PAR PLANS D'EXPÉRIENCES

III.1. Introduction

Comme je l'ai annoncé en préambule à ce mémoire, l'objectif de l'équipe COME, son utopie, est de rationaliser le processus de conception et, pour cela, de le rendre entièrement numérique.

L'élaboration de prototypes virtuels en est une étape clef. Outre la fiabilité, c'est-à-dire la capacité du prototype virtuel à reproduire précisément le fonctionnement de la machine ou du dispositif réel, une propriété fondamentale est la malléabilité, ou la capacité à subir des variations de géométrie ou de matériau, voire de topologie, tout en restant fiable. L'intérêt de disposer d'un prototype fiable et malléable est alors évident : il permet d'explorer l'espace de conception, c'est-à-dire de balayer exhaustivement tous les points de cet espace.

Bien entendu, une telle exploration est utopique du fait même du caractère continu ou infini de cet espace. Et même en le discrétisant grossièrement, l'exploration de cet espace dépasse encore la capacité de traitement des calculateurs actuels.

Mais supposons que l'on puisse le faire :

- a) comment alors exploiter une telle masse de données ?
- b) comment discrétiser et sélectionner les meilleures solutions ?
- c) enfin, qu'est-ce qu'une meilleure solution ?

Sans méthode, sans méthodologie de travail, l'esprit humain a du mal à résoudre ce problème. La complexité du problème de conception est partiellement vaincue par la mise à disposition d'un prototype virtuel. Malgré cela, les deux questions (a) et (b) restent complexes. Les méthodologies de l'optimisation répondent au problème de l'exploitation des résultats et de la sélection des solutions. En ce qui concerne la question (c), elle relève de l'expertise des acteurs humains. Ceux-ci doivent connaître les métiers de leur entreprise, ses savoir-faire, son environnement technique et ses clients. Il est donc impossible de donner une réponse numérique à cette question et bien souvent les connaissances qui permettent d'y répondre ne sont même pas formalisées. Par contre, il est possible quand même de proposer une aide.

La situation du concepteur est très analogue à celle de l'expérimentateur qui est face à un système ou à un phénomène physique qu'il doit identifier. Il ne peut qu'expérimenter ou procéder à une modification du système pour en mesurer les effets. Progressivement, par ces expérimentations, il produira des connaissances exploitables. Il identifiera les réponses ainsi que les facteurs qui les influent, puis proposera des modèles mathématiques qui lui permettront de manipuler les connaissances acquises.

C'est à cause de cette analogie profonde entre le concepteur et l'expérimentateur que l'équipe COME s'est intéressée particulièrement à la *méthode des plans d'expériences* et l'a privilégiée comme méthode d'exploration progressive de l'espace de conception.

La méthode des plans d'expériences nous a séduite par sa capacité à traiter les problèmes complexes et 'compliqués'. En effet, dans une première étape, elle permet d'identifier les réponses intéressantes et les facteurs influents d'une conception. Elle est tout à fait capable de traiter plusieurs réponses à la fois et, en ce sens, aide à la formulation des aspects 'compliqués'. Elle est capable de prendre en compte simultanément un grand nombre de facteurs et, en ce sens, aide à vaincre la complexité. Cette étape est couverte par les *plans de criblage* ou « *screening* », généralement des plans factoriels fractionnaires comme les plans de Taguchi [Pil-94].

Une originalité a été de proposer *un screening multizones* : développement de plans particuliers, les plans treillis (thèse de S. Vivier) [Th.1] appliqués à un modèle multi-physiques (Thèse de A. Ait-Hammouda) [Th.2].

Dans une deuxième étape, la méthode des plans d'expérience permet de construire des modèles polynomiaux des réponses étudiées en fonction des facteurs qui ont été jugés significatifs. A ce stade, les réponses étudiées peuvent être ensuite des objectifs ou des contraintes. C'est un outil de modélisation et d'optimisation local car la recherche d'un extremum sur une surface polynomiale quadratique ou linéaire est un problème simple. Cette étape est couverte pour les plans dit de RSM 'Response Surface Method' ou méthode des surfaces de réponse.

Ce point a été testé sur de nombreux cas mais de façon « local », c'est à dire sur un domaine physique seul : cas de l'étude des freins à courants de Foucault avec la conception d'un FCF respectant le bon compromis entre la force de freinage et la force d'attraction [CR.3 – CR.4], [D3].

La méthode des plans d'expériences a toujours été considérée comme une méthode d'optimisation par ceux qui s'en sont servis ou l'ont promue. Par exemple, elle est utilisée couramment dans l'industrie comme outil de réglage optimal d'un procédé.

Avec la thèse de S. Vivier [Th.1], la contribution apportée concerne le développement des méthodes heuristiques construites sur l'utilisation des plans d'expériences et qui sont des stratégies habituelles d'optimisation par plans d'expériences : le glissement de plans, le zoom, l'enchaînement de plans, les plans treillis. Elles sont détaillées par la suite.

Avant de présenter ces différentes possibilités, un rappel historique de la méthode des plans d'expérience est donné.

III.2. La méthode des Plans d'Expérience (PdE)

Historique :

Cette technique est apparue au début du siècle avec les travaux de Fisher (1925). Les premiers utilisateurs furent les agronomes car il était nécessaire, aux vues de la durée d'un essai (une année), de réduire leur nombre.

Puis, en 1960, Taguchi publia des tables, dites orthogonales, ce qui permis de synthétiser et simplifier l'utilisation des plans d'expériences mais aussi de permettre une large diffusion, surtout auprès des industriels [Pil-94].

Ces documents furent publiés et repris par [Box-87], [Gou-88] pour une plus grande vulgarisation. A présent, cette technique représente un bagage scientifique nécessaire pour tout expérimentateur. Dans le domaine du génie électrique, quelques références apparaissent dans les années 90 : quelques articles présentent des travaux où la méthode des plans d'expériences est employée comme méthodologie de base de l'étude [Gar-95], [Dro-97], [Gil-97], [Dyc-99], [Zao-00], [Cal-01].

Nous allons à présent montrer l'intérêt de l'utilisation de la méthode des plans d'expériences dans la démarche de conception et d'optimisation de dispositifs électrotechniques.

Intérêt de l'approche (pourquoi les PdE) ?

L'approche permet de déterminer l'influence des facteurs en un nombre d'essais ou d'expériences réduit. En effet, faire varier un facteur à la fois sur un dispositif s'avère inadéquate et même inexploitable lorsque le nombre de facteurs est considérable avec des contraintes importantes fixées par le cahier des charges.

A titre d'exemple :

Une façon naturelle d'identifier le rôle d'un facteur X sur une réponse Y d'une expérience est d'étudier l'influence de plusieurs de ses valeurs alors que le niveau des autres variables reste fixe. Le tracé de la courbe $Y=f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ est alors possible. Elle représente l'évolution de Y en fonction de X_1 avec une invariance des autres facteurs. Il faudrait effectuer la même opération pour X_2, X_3, \dots, X_n pour voir leurs influences sur le système. Au mieux le phénomène est modélisé et connu sur 'n' droites. Cette connaissance est inexploitable.

Avec une telle approche, le nombre d'expériences à réaliser est élevé. A titre d'exemple, l'étude de l'influence de dix facteurs en prenant quatre points par variable nécessite 4^{10} simulations; ce qui est difficilement envisageable. En ne prenant plus que deux points par variable, il y a encore 2^{10} , c.a.d. 1024 essais à réaliser, ce qui reste important.

A la différence de cette approche classique, la méthode des plans d'expériences impose de faire varier tous les facteurs à la fois et à chaque expérience mais de manière planifiée et raisonnée. Cette méthode tente par un nombre restreint d'essais (utilisation de plans fractionnaires) d'étudier l'effet de chaque facteur influent sur l'expérience réalisée. Plutôt que d'étudier indépendamment l'effet de chaque facteur, la méthode calcule l'effet d'un facteur à partir d'une différence de moyenne, ce qui est statistiquement la meilleure solution.

Ainsi, l'approche présente l'intérêt de traiter des problèmes avec un grand nombre de facteurs tout en réduisant le nombre de simulations. De plus, en ce qui concerne l'objectif d'optimisation du dispositif (paragraphe III.3), les PdE permettent de conserver un modèle équivalent des phénomènes investigués et de fournir la sensibilité de l'optimum.

Cet apport s'avère très important et la distingue des méthodes déterministes (gradient conjugué, plus grande pente,...) qui ne donnent qu'un seul point. Cet aspect est renforcé dans le cas d'une étude de systèmes multi-physiques complexes car il travaille avec des modèles 'réduits'.

Par contre, l'étude de systèmes électrotechniques modélisés soulève deux difficultés : les modélisations utilisées ne sont pas obligatoirement fidèles aux dispositifs originels et il existe dans tous les cas une incertitude typiquement expérimentale due à la construction et à l'utilisation des modèles eux-mêmes.

Rappel sur les PdE

Le terme Méthode des Plans d'Expériences désigne une méthodologie complète pour la caractérisation comportementale d'un système. Elle est basée sur la modification et la mesure des variables propres au dispositif considéré ; cela comprend principalement les grandeurs étudiées ainsi que leurs sources de variation.

Par conséquent, cette méthode cherche à établir des liens entre 2 types de variables :

- la réponse : grandeur physique étudiée;
- les facteurs : grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur, sensées influencer sur les variations de la réponse.

Plus précisément, elle vise aussi bien à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux. Pour cela, la solution proposée consiste dans tous les cas à établir un modèle, exprimant la réponse en fonction des facteurs.

Pour bâtir ce modèle, il faut appréhender ces variations. Celles-ci sont déduites des résultats de séries d'expériences, c'est-à-dire de plusieurs configurations pour lesquelles les valeurs des facteurs sont différentes. Il s'agit ici de la notion de plan d'expériences (PdE), correspondant à la réalisation d'une série de N expériences.

La réalisation d'un plan revient à déterminer la valeur de la fonction réponse pour ces N configurations. Une relation de modélisation en est alors déduite.

Cette méthode s'appuie essentiellement sur des bases statistiques et algébriques. Cette particularité induit la possibilité quasi-permanente de connaître les erreurs concédées sur les données expérimentales et sur celles qui en sont déduites.

Toutes les variables considérées sont assimilées à des variables aléatoires. Par conséquent, la majorité des développements théoriques statistiques peuvent compléter les fonctions originellement attribuées à la méthode des plans d'expériences.

Les deux principales utilisations possibles de la Méthode des Plans d'Expériences (MPE) sont :

- la technique du screening :
Parmi les facteurs recensés par l'expérimentateur, cet outil permet de déterminer ceux qui ont une influence statistiquement non négligeable sur les variations de la réponse.
- la méthodologie des surfaces de réponse [Gou-96] :
Les variations de la réponse sont calculées en fonction des facteurs précédemment jugés influents. Cette étude est davantage quantitative, le but étant de déterminer comment la réponse varie.

Dans cette partie et afin d'illustrer directement notre chapitre, plusieurs exemples sont repris. En annexe, quelques papiers correspondants sont fournis afin de détailler les figures choisies.

III.2.1 Applications des Plans d'Expériences au L2EP :

Différents dispositifs ont été testés au laboratoire :

- étude d'une machine synchrone à aimants [Gil-97], [Gil-00], utilisation de la technique des PdE et de la technique de zooms ;
- le développement de différentes stratégies et la réalisation d'un superviseur d'optimisation par PdE : SOPHEMIS [Th.1 - S. Vivier] (*annexe I.4*)
- l'étude d'un frein linéaire à courants de Foucault [CR.1, CR.3 & CR.4] (*Annexe I.3 et § suivant*)
- l'optimisation de la forme des griffes d'un alternateur automobile [thèse M. Hecquet + CR.2] (*annexe I.1.1*),
- enfin, l'application aux cas de machines de traction ferroviaire (synchrone et asynchrone) avec l'utilisation de modèle multi-physiques et l'application du Screening multizones [Th.2 – A. Ait-Hammouda], [CR.5] (*Annexe I.2 et § suivant*)

Quelques illustrations sont données directement dans ce chapitre III ainsi qu'un exemple détaillé au chapitre IV. En annexe, différents articles assurent un complément sur ces différents cas traités.

III.2.1.1. Technique du criblage (Screening)

Parmi les facteurs recensés par l'expérimentateur, cette approche permet de déterminer ceux qui ont une influence statistiquement non négligeable sur les variations de la réponse. On

peut donc ainsi procéder à une simplification du problème, par élimination des facteurs peu influents [Gou-96] [Gar-95].

Pour déterminer l'influence d'un facteur, il suffit de lui faire prendre 2 niveaux différents et d'observer les variations induites de la réponse étudiée.

Ainsi, de manière générale, pour évaluer les effets de plusieurs facteurs grâce à un seul plan d'expériences, il faut faire en sorte que :

- chaque facteur prenne (au minimum) 2 niveaux différents;
- le nombre d'expériences définies pour un niveau donné de facteurs soit toujours constant de façon à ne pas introduire de biais : c'est la propriété d'orthogonalité.

Les PdE de screening sont tous dérivés des matrices factorielles complètes et plus généralement des matrices d'Hadamard. On peut ainsi citer les plans factoriels complets et fractionnaires, les plans de Plackett-Burman ainsi que les plans de Taguchi [Pil-94].

Les modèles déduits de tels plans peuvent être uniquement du premier ordre et prendre également en compte tout ou partie des interactions entre les facteurs.

Afin d'illustrer cette partie, un premier exemple est choisi : le Frein linéaire à courants de Foucault (FCF). Pourquoi avoir choisi cet exemple ??

Pour cette application, la modélisation fine des courants induits était nécessaire afin de calculer les forces de freinage et de répulsion liées à ces courants induits dans le rail. Nous utilisons pour cela la méthode des éléments finis (M.E.F.) en magnétodynamique 3D. La technique des PdE est alors bien adaptée à ce type d'étude ayant des temps de calculs importants et la recherche *d'une conception optimale* est donc tout à fait possible par la méthode des éléments finis associée au PdE.

Notre objectif dans cette partie se limite à illustrer nos développements théoriques comme l'emploi de l'analyse de la variance dans le cas de prototypes virtuels.

Le principe de fonctionnement du FCF, le modèle éléments finis tridimensionnel, et surtout la validation par l'intermédiaire d'essais expérimentaux sont détaillés en annexe I.3.

Application à l'étude du frein linéaire à Courants de Foucault

La méthode des éléments finis a été choisie pour répondre au cahier des charges et a permis d'étudier une structure tridimensionnelle en considérant de nombreux phénomènes comme la circulation des courants induits.

L'objectif est de concevoir une structure linéaire réalisant un bon compromis entre la force de freinage à maximiser et la force d'attraction à minimiser [R8].

Les valeurs fixées par le cahier des charges sont les suivantes :

- $F_{att} \leq 15\text{kN}$ (force d'attraction),
- $F_{frein} \geq 25\%$ de la force de freinage totale (c'est-à-dire $F_{frein} \geq 7.5\text{kN}$ /patin),

et ceci pour une vitesse égale à 90 à 100km/h, à peu près 25m/s.

Dans un premier temps, il nous faut identifier les facteurs influents. Le nombre de facteurs et les phénomènes à prendre en considération dans l'optimisation du dispositif sont très nombreux. Outre la valeur des ampères-tours placés dans les bobines, les paramètres géométriques susceptibles d'influencer les performances du dispositif sont définis sur la figure III.1.

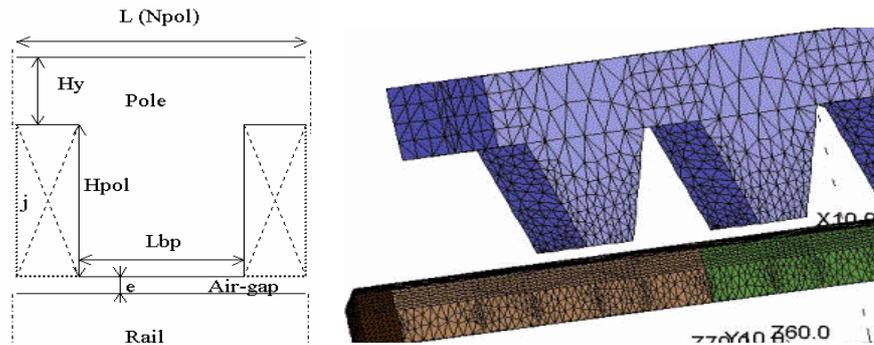


Figure III.1. Vue d'un pôle, définition des paramètres de conception, et exemple d'un maillage 3D.

Ces paramètres sont : l'épaisseur de l'entrefer (e), la hauteur du pôle (H_{pol}), l'épaisseur de la culasse (H_y), le nombre de pôles (N_{pol}), la dimension du bas de pôle (L_{bp}), le nombre d'ampères-tours imposés (NI).

Le pas polaire L est lié au nombre de pôles, la longueur totale du dispositif étant imposée. Les bobines, alimentées par un courant continu, sont placées autour des pôles, la valeur des ampères-tours totaux est maintenue constante.

Un plan de screening est réalisé dans le but d'identifier les facteurs les plus significatifs.

Deux niveaux sont choisis pour chaque facteur dans le but d'établir les effets de ceux-ci ainsi que leurs interactions sur les forces. Ces niveaux sont :

$$e : e_{moy} \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}; H_{pol} : 70 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}; H_y : 45 \text{ mm} \pm 15 \text{ mm}$$

$$L_{bp} : \text{de } 0 \text{ à } 30\%; N_{pol} : \text{de } 6 \text{ à } 10; j : \text{de } 6 \text{ à } 8 \text{ A/mm}^2$$

Le plan factoriel complet requiert 2^6 expériences, c.a.d, 64 tests, ce qui représenterait un temps de calcul total maximum de 36 jours (avec une moyenne de 12h/calcul) !!!

Il est alors judicieux de choisir un plan factoriel fractionnaire. Pour cela, il faut savoir que :

- réduire le nombre d'essais revient à aliaser (ou confondre) le facteur principal avec une interaction d'ordre élevée,
- il faut alors connaître le niveau ou l'ordre des interactions qui nous paraissent négligeables.

Pour les différentes études traitées, nous avons supposé *comme négligeable toute interaction supérieure ou égale à 3*. Ainsi, nous avons retenu un plan à seulement 16 simulations : plan 2^{6-2} . La résolution, la notion d'alias et de générateur associé sont nécessaires à la bonne compréhension permettant ainsi d'effectuer le bon choix du plan. Ces informations ainsi que les différentes tables sont répertoriées dans les travaux de S. Vivier [Th.1].

Pour le plan choisi, les facteurs 5,6 sont par conséquent aliasés avec des interactions d'ordre 4. On définit alors l'effet moyen d'un facteur X_1 sur la réponse Y comme :

$$E_1 = (Y^+_{\text{moy}} - Y^-_{\text{moy}}) / 2$$

Avec :

Y^+_{moy} : moyenne des réponses lorsque X_1 prend son niveau haut (valeur max.)

Y^-_{moy} : moyenne des réponses lorsque X_1 prend son niveau bas (valeur min.)

Ainsi, simplement par l'examen des effets, les facteurs peuvent être classés entre eux suivant leur capacité plus ou moins forte à faire varier la réponse étudiée (quelques exemples de graphes des effets seront fournis sur les différents cas traités).

Puis, *l'analyse de la variance* permet l'exploitation des résultats [Gou-88], [Poi-TI] en discriminant les effets des facteurs qui sont les plus significatifs pour la réponse étudiée : dans notre cas, la force de freinage. Un exemple de traitement est donné figure III.2.

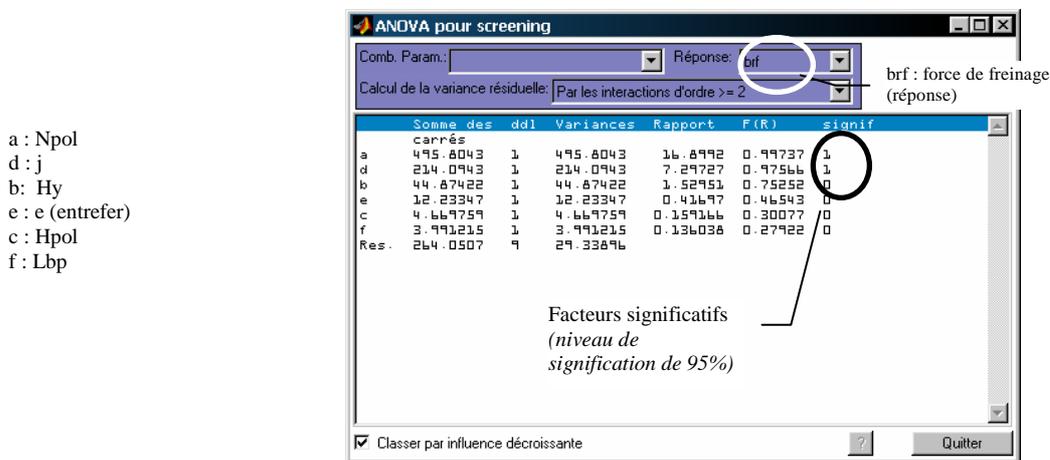


Figure III.2. Analyse de variance et effets des facteurs ($v= 50$ km/h)

(Outil SOPHEMIS présenté en annexe I.4)

En conclusion de cette analyse, 2 facteurs sont déclarés influents avec un niveau de signification de 95% : le nombre de pôles et le courant d'excitation j , pour le domaine choisi. Ces différents facteurs, pour la vitesse considérée, sont classés par ordre d'influence sur la force de freinage. Pour exemple, l'épaisseur de la culasse a 3 chances sur 4 d'avoir un effet sur les variations des forces. Ainsi, celui-ci peut également être conservé. De nombreux tests

ont été effectués ainsi qu'une utilisation originale de l'analyse de la variance, qui démontrent la validité des facteurs retenus.

En effet, *l'analyse de la variance* repose sur la détermination de la *variance résiduelle* (appelée 'approche 1' ci-dessous) qui est construite à partir des interactions d'ordre élevé, jugées d'influences faibles. Dans le tableau 1, on a placé la valeur de cette variance résiduelle en fonction des interactions d'ordre '5+6', d'ordre '4+5+6', etc., jusqu'à la détermination de la variance résiduelle qui englobe toutes les interactions du problème : '2+3+4+5+6'

Pour nous permettre d'identifier les interactions d'ordre '5+6' par exemple, des expériences supplémentaires ont été réalisées afin d'estimer cette variance 'résiduelle', notre intérêt étant de valider notre hypothèse : les interactions d'ordre élevé peuvent être utilisées pour le calcul de la variance.

L'autre technique ou approche n°2 consiste à évaluer une *erreur dite expérimentale*, plus classiquement employée. Celle-ci est plus difficile à appliquer sur un prototype virtuel car la répétition d'une même expérience dans les mêmes conditions donnera toujours le même résultat.

Ainsi, pour valider notre hypothèse, avec l'exemple du frein linéaire, on a considéré différents maillages de la structure, plus ou moins fins, avec ou sans l'utilisation de différentes techniques d'up-winding pour ce type de problème. Ces différents modèles ont été définis de la façon suivante, le premier modèle donnant de bons résultats sur la force de freinage par rapport aux essais expérimentaux [CI.21 & 22], [Inr-96]: la variation du nombre de nœuds de 10%, l'utilisation du maillage auto-adaptatif et l'utilisation de différentes techniques d'up-winding (Hughes ou Streamline);

Un même plan d'expériences a été défini et différentes valeurs de force de freinage sont obtenues. Ensuite, pour chaque expérience, la variance correspondante est calculé, et nous en déterminons la moyenne : 0,8611.

<i>Ordre des interactions</i>	<i>Approche 1 (Variance résiduelle)</i>	<i>Approche 2 (variance 'expérimentale')</i>
5+6	0,0029	
4+5+6	0,036	<u>0,8611</u>
3+4+5+6	0,3752	
2+3+4+5+6	3,048	

Tableau III.1. Comparaison entre les variances 'résiduelle' et 'expérimentale'

En conclusion, l'ordre de grandeur de la variance 'résiduelle' construite à partir des interactions d'ordre supérieur à 2 est comparable à celui donnée par l'erreur dite expérimentale, ce qui nous permet de valider notre hypothèse.

En ce qui concerne les résultats obtenus par le screening, l'intérêt est de faire ressortir quelques facteurs pour ensuite utiliser une approche plutôt quantitative : la R.S.M. ou alors directement une méthode d'optimisation.

Pour cela, différents domaines d'étude ont été testés et le choix de facteurs influents demande d'explorer un domaine le plus large possible tout en conservant une échelle relativement petite pour celui-ci. Dans notre cas, il faut, par exemple, valider le choix des facteurs pour différentes vitesses mais aussi pour des variations de facteurs différentes.

De ces remarques découlent le screening multizones ou global. En effet, il est intéressant de valider notre choix de facteurs influents : s'assurer que ceux-ci le resteront quelle que soit par exemple la vitesse de fonctionnement.

III.2.1.2. Technique du criblage multidimensionnel ou multizone

Un apport original fut d'étendre cette technique à l'étude d'un domaine 'discretisé'. En effet, comme nous l'avons précisé précédemment, afin de s'assurer de la pertinence de nos choix de facteurs, il s'avère indispensable de valider ce choix sur 'n' domaines de variations.

Pour cela, un choix judicieux de plans fut développé : les plans 'treillis'. Ces plans ont été développés par S. Vivier lors de sa thèse [Th. S. Vivier] et furent tout d'abord appliqués avec succès au cas d'une bobine supraconductrice (Workshop S.M.E.S.) [R9]. L'objectif ne se limitait pas à déterminer des facteurs influents mais aussi à retrouver le point optimal connu.

Démarche :

Les plans 'treillis' ont été conçus comme un plan fractionnaire multi-niveaux ou équivalent à un plan grille. Pour exemple, sur la figure III.3.a, le plan factoriel de base choisi est un plan factoriel fractionnaire 2^{3-1} . Une association judicieuse, permutation des nœuds, permet de construire un maillage (Figure III.3.b).

Les propriétés des plans fractionnaires sont conservées : règle d'orthogonalité par exemple. De plus, un avantage important est la possibilité de diviser le nombre d'expériences en correspondance avec un plan grille par 2, 4, 8, etc... en fonction du plan fractionnaire choisi.

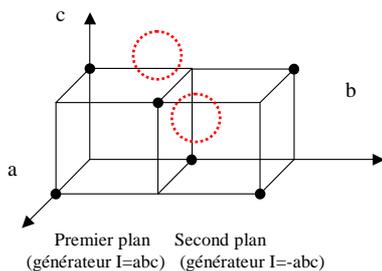


Figure III.3.a : association de 2 plans

Les deux exemples qui suivent reprennent ce type de plan et surtout présentent l'intérêt d'explorer le domaine tout en réduisant le nombre d'expériences. Le premier exemple concerne le cas d'une machine synchrone à aimants : modèle décrit dans la thèse d'Amine Ait-Hammouda [Th.2], [R10]. La démarche en ce qui concerne l'obtention du modèle vibro-acoustique a été définie au § II.3.

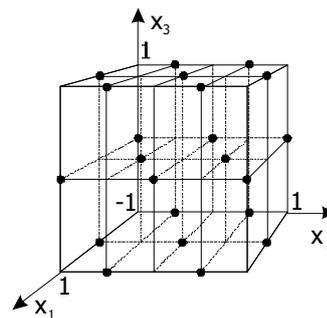


Fig. III.3.b. Plan treillis à 3 facteurs avec $N_{n_1}=3$, $N_{n_2}=5$, $N_{n_3}=3$ (nbre de subdivisions)

Application au cas d'une machine synchrone à aimants et une machine asynchrone :

- a) Cas N°1: Facteurs influents sur le bruit d'origine électromagnétique appliqués à une machine synchrone à aimants [R11] , [Th. Ait-Hammouda].

Cette machine est composée de 8 pôles rotor, aimants montés en surface et de 48 dents stator (figure III.4). La puissance de la machine est de l'ordre de 250kW, machine réalisée par Alstom-Transport à Ornans. Le modèle électro-vibro-acoustique est analytique et a été validé par éléments finis et par des essais expérimentaux (annexe I.2). Notre objectif était de prédéterminer le bruit d'origine électromagnétique du fonctionnement de la machine synchrone à vide [R11];

Une étude de screening en considérant cinq facteurs, présentés ci-dessous, est réalisée. La réponse étudiée concerne *le bruit d'origine électromagnétique*.

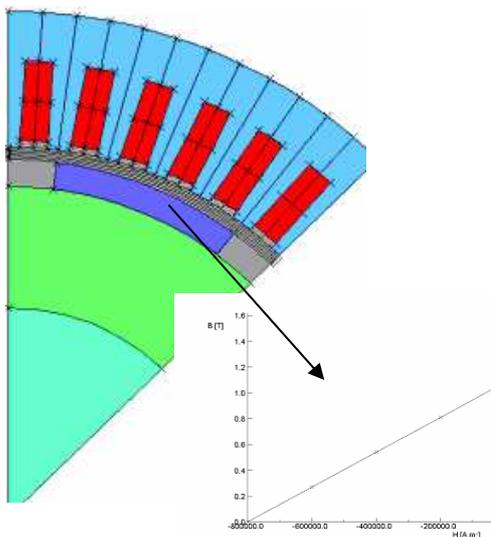


Figure III.4 : 1/8 de machine avec la caractéristique de l'aimant.

Table III.2. Intervalles de variations – Analyse de screening

Facteurs	Niveau bas	Niveau haut
l_{se}	$L_{se} \text{ min}$	$L_{se} \text{ min} + 20\%$
h_{yoke}	$h_{yoke} \text{ min}$	$h_{yoke} \text{ min} + 20\%$
alp	30°	32°
e	$e \text{ min}$	$e \text{ min} + 20\%$
h_{mag}	10 mm	12 mm

Facteurs choisis :

- l_{se} : ouverture des encoches statoriques;
- h_{yoke} : hauteur de culasse;
- alp : ouverture de l'aimant;
- e : épaisseur de l'entrefer;
- h_{mag} : hauteur de l'aimant;

Dans un premier temps, *un screening 'classique'* sur ce domaine pour une vitesse constante de 3000 tr/min est réalisé. Le graphe des effets est présenté pour ces 5 facteurs sur la figure III.5.

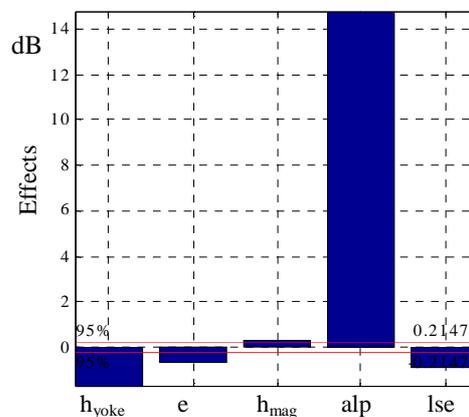


Figure III.5. Graphe des effets des facteurs principaux

* *Note sur la limite de 95%* : on utilise le test de Fisher-Snedecor qui à partir d'une loi statistique permet de comparer 2 variances afin de connaître si le facteur est influent ou non. Ces 2 variances ont été présentées au § précédent. Ce niveau est fixé arbitrairement et peut-être augmenté à 99%.

Premièrement, ce résultat montre que l'ouverture de l'aimant (alp) est un facteur très influent sur le bruit : +15dB sur la valeur moyenne en augmentant l'ouverture de 30 à 32°.

La hauteur de la culasse ainsi que l'ouverture de l'encoche et l'entrefer sont aussi significatifs : effet supérieur à la limite de 95%* imposée lors de l'analyse de variance. Il faut augmenter leur valeur pour réduire le niveau de bruit.

Remarque : le résultat concernant la hauteur de culasse ne vérifie pas toujours cette tendance. En effet, on peut obtenir des effets « inverses » sur le bruit dans le cadre d'une application à vitesse variable [R14 – article fourni en annexe].

En ce qui concerne le 5^{ème} facteur (h_{mag}), il est à la limite des facteurs influents pour ce niveau de 95%. Bien entendu, ces conclusions ne sont valables que dans le domaine considéré et pour la vitesse considérée ! On peut par conséquent insérer le facteur 'vitesse N' et ainsi observer la validité de nos conclusions dans le cas d'une étude à vitesse variable.

L'étude suivante va prendre en considération ce facteur supplémentaire : la vitesse de rotation et subdiviser le domaine d'exploration.

Utilisation d'un plan "treillis":

La définition du plan est la suivante : 6 facteurs considérés avec 3 niveaux pour le domaine d'étude. Les facteurs sont les mêmes que précédemment en ayant ajouté la vitesse, ceci afin de valider ses effets sur toute la plage de variation.

La réponse considérée étant le bruit d'origine électromagnétique, il est important d'augmenter le nombre de subdivisions à 4, c.a.d. 5 niveaux pour le facteur vitesse 'N', ceci se justifie afin d'observer son influence du paramètre fonction des résonances mécaniques de la machine. La figure suivante présente le détail du plan choisi (outil SOPHEMIS) :

The screenshot shows the SOPHEMIS software interface for defining a treillis (lattice) plan. The interface is divided into several sections:

- Niveaux** (Levels):
 - Disposition régulière:
 - Homogène: 3 niveaux par dimension
 - Hétérogène: [3, 3, 3, 5, 3, 3]
 - Disposition personnalisée:
 - Facteur: [dropdown]
 - Niveaux: [0.01, 0.011, 0.012]
- Bornes de variation des facteurs** (Factor variation bounds):
 - Facteur: [dropdown]
 - Borne inférieure: 0.01
 - Borne supérieure: 0.012
- Vecteur de déplacement du plan** (Plan displacement vector):
 - [0, 0, 0, 0, 0, 0]
- Plan factoriel, dans chaque sous-domaine** (Factorial plan in each sub-domain):
 - Complet
 - Fractionnaire: 2⁶⁻² (4 exp. - Res. IV)
 - Meilleurs (classiques)
 - Meilleurs (additifs - soustractifs)
 - Personnalisés: abce bcdl

Summary statistics on the right side of the interface:

- Nombre de facteurs déclarés: 6
- Nb d'exp. plan treillis: 312
- Nb d'exp. plan grille correspondant: 1215
- Economie (nb d'expériences): 903
- Economie (%): 74.32

Buttons: Accepter, Mettre à jour, ? (Help), Quitter.

Figure III.6. Définition d'un plan treillis

Le plan fractionnaire de base choisi est un plan 2^{6-2} . Ce plan treillis ne compte que 312 expériences au lieu de 1215 expériences pour un plan grille.

Analyse de screening “multizones”

Pour chaque plan fractionnaire 2^{6-2} , ce qui correspond à chaque sous-domaine, des analyses de screening peuvent être calculées sur ce plan ‘treillis’ [Th 1], à partir des 312 expériences. Un point à noter, du fait de la récupération de points lors de l’association des plans, on obtient un nombre d’analyses supérieur au nombre initial d’expériences.

Différents moyens de représentations peuvent être effectués et sont présentés dans la thèse de S. Vivier [Th.1].

Pour exemple sur la figure III.7, des représentations 3D sur l’influence de l’ouverture de l’aimant et sur l’effet de culasse qui montre l’importance du sous-domaine choisi ; on retrouve l’analyse précédente dans le sous-domaine 2 de ‘alp’

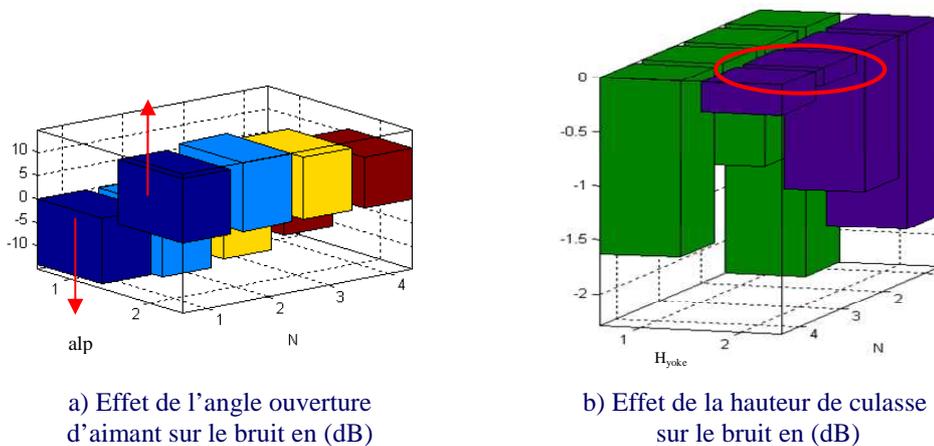


Figure III.7. Variations de l’ouverture de l’aimant (alp) et de la hauteur de la culasse (Hyoke) sur le bruit. Pour les intervalles de vitesses suivants : 1: 2500 à 3000 tr/min; 2: 3000 à 3500tr/min; 3: 3500 à 4000tr/min; 4: 4000 à 4500tr/min;

Dans les 2 sous-domaines, le facteur alp est très influent (± 15 dB), permettant soit de réduire ou d’augmenter le bruit. Ce point sera confirmé dans la partie R.S.M. §3.3. La modification de la vitesse affecte la valeur maximale du bruit mais de façon modérée en comparaison avec la modification de l’ouverture d’aimant. On passe par un maximum pour la zone 2 : N compris entre 3000 et 3500tr/min.

En ce qui concerne la hauteur de culasse (figure III.7.b), il est possible de visualiser les effets max. et min. en fonction du sous-domaine choisi. L’effet de la vitesse associée à la variation de la hauteur de culasse modifie les variations de la réponse : de 0 à 2dB. Bien entendu, en comparaison avec les résultats précédents, cette variation reste faible.

En conclusion sur cette étude de la MS à aimants, les trois facteurs ‘alp’, ‘ h_{yoke} ’, et N sont des facteurs à prendre en considération, l’ouverture de l’aimant ayant un effet important devant les autres facteurs. L’entrefer ‘e’ et l’ouverture de l’encoche ‘les’, pour la plage de variation considérée, reste des facteurs influents mais avec des variations sur le bruit inférieur à 1dB. Enfin, le facteur ‘ h_{mag} ’ n’apporte que peu de modifications sur la réponse.

Un autre plan a été considéré et présenté dans la référence [R13] avec 5 niveaux pour chacun des facteurs contribuant à renforcer les conclusions précédentes.

Quelques surfaces de réponses et la déduction de zones optimales sont présentées dans le point suivant correspondant à la R.S.M.

- b) Cas N°2 : Facteurs influents sur le bruit d'origine électromagnétique appliqués à une MAS [R14], [DEA D8], [Th. 2 – A.Ait-Hammouda]

La machine est détaillée *en annexe I.2*.

L'étude de screening, détaillée ci-dessous, pour cette machine portait sur 10 facteurs. La démarche est rigoureusement la même que précédemment. Dans cet exemple supplémentaire, nous présentons l'intérêt de l'approche sur un nombre de facteurs plus importants et les effets d'interactions entre les facteurs.

On a montré qu'il ne suffit pas d'accroître la hauteur ou l'épaisseur de culasse d'une machine pour réduire le bruit d'origine électromagnétique lors d'un fonctionnement à vitesse variable. Le point important dans ce cas d'étude est surtout d'éviter les résonances.

Pour cette étude, avec 10 facteurs, la réalisation d'un plan factoriel complet nécessite 2^{10} simulations soit 1024 simulations ce qui est prohibitif en temps de calcul (une simulation nécessitant à cette période plus de 5 min). Un plan factoriel fractionnaire 2^{10-3} est choisi, ce qui nécessite 128 expériences. Avec ce plan, on considère que les interactions d'ordre supérieur à deux sont négligeables. Seule la fréquence de fonctionnement sera subdivisée afin de valider le choix des facteurs pour différentes plages de variations de vitesse.

Tableau III.3 : facteurs et plage de variation.

Identifiant	Description	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)	Unité
Zs	Nombre d'encoches au stator	36	54	
Zr	Nombre d'encoches au rotor	40	44	
lse	Ouverture d'encoche statorique	lse	lse + 20%	M
lre	Ouverture d'encoche rotorique	lre	lre + 20%	M
h_{cul}	Épaisseur de la culasse	h_{cul}	$h_{cul} + 20\%$	M
e	Entrefer	e	e + 10%	M
L1	Longueur du stator	L1	L1 + 10%	M
L2	Longueur du rotor	L2	L2 + 10%	M
Da	Diamètre d'arbre	Da	Da + 10%	M
Mst1	Masse volumique de la tôle	7.25	8.05	Kg /dm ³

La fréquence de fonctionnement varie de 30Hz à 130Hz, ce qui correspond à une vitesse variant de 600 tr/min à 2600tr/min.

L'histogramme des effets moyens permet de juger rapidement des effets relatifs des facteurs sur la réponse : le niveau acoustique en dB (figure III.8.a). C'est ainsi que l'on constate l'extrême importance des facteurs : nombre d'encoches au stator Zs, nombre d'encoches au rotor Zr ainsi que de leurs interactions (figure III.8.b).

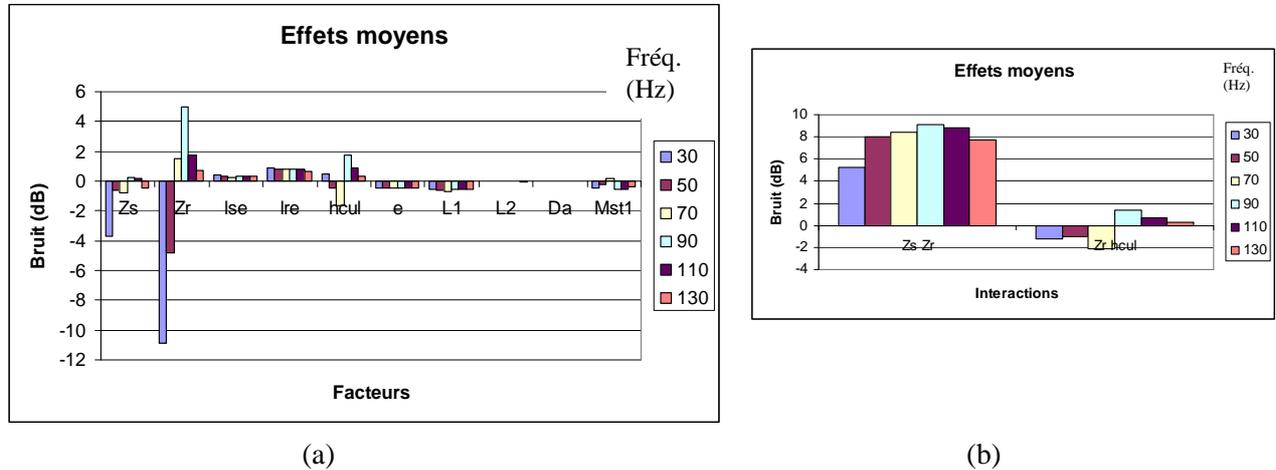


Figure III.8. : Effets moyens des facteurs principaux (à gauche) et des interactions principales (à droite)

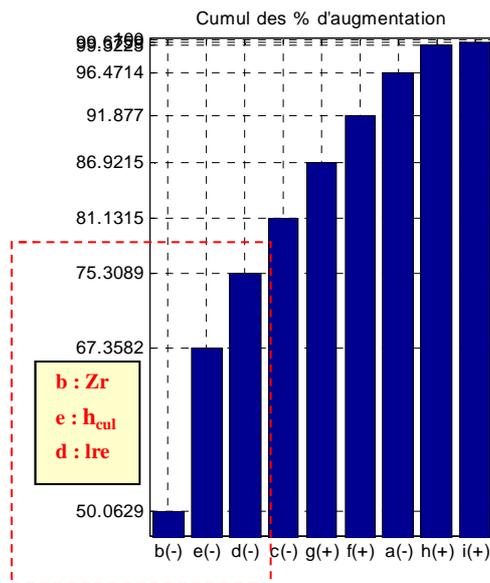
Sur ces 2 graphes, il est important de souligner l'amplitude de variation du facteur 'Zr' (+5 à -11dB) et de l'interaction 'Zs-Zr' (+9dB). De plus, la fréquence d'alimentation modifie considérablement les tendances comme pour la hauteur de culasse, le nombre de dents stators mais aussi l'interaction 'Zr-h_{cul}'. Par exemple, l'effet de 'Zr' sur le bruit est de -11dB pour la fréquence la plus faible de 30Hz alors qu'il passe par un maximum de +5dB pour 90Hz.

Sur ces graphes, on peut remarquer par ordre les effets notables des facteurs 'Zs', 'h_{cul}', 'lre', 'L1', 'e', 'lse', et 'Mst1', de même que l'interaction 'Zr-hcul', alors que les effets des facteurs L2 et Da sont quasiment nuls.

Pour pouvoir juger du caractère significatif d'un facteur, on utilise l'analyse de la variance. Les résultats obtenus par l'analyse de variance montrent la difficulté à sélectionner un facteur influent pour toute la plage de variation. Les facteurs 'Zr', 'h_{cul}', 'Zs' et 'lre' peuvent être sélectionnés comme facteurs influents. En ce qui concerne les interactions, la sélection de 'Zr' impose le facteur 'Zs', idem pour 'Zr & h_{cul}' [Th.2 – A. ait-Hammouda].

L'interaction 'Zs-Zr' rappelle effectivement que pour concevoir une machine peu bruyante, il faut commencer par choisir une « bonne combinaison » de dents stator-rotor, mais ce critère n'est bien entendu pas suffisant.

Afin d'observer l'effet de chaque grandeur et surtout leur apport au niveau de la variation du niveau acoustique, une représentation différente est proposée. Ci-dessous, pour exemple, à f=90Hz :



- 1) Le facteur b (Zr) apporte 50.06% sur la variation du niveau acoustique
- 2) Le signe (-) ou (+) rappelle si le facteur augmente ou diminue la réponse
- 3) Dans notre cas, la somme des 3 facteurs 'Zr', 'h_{cul}', 'lre' modifie la réponse à hauteur de 75.3%

Figure III.9. : Classement des facteurs à f=90Hz

En conclusion, le dernier graphe permet de situer l'apport de chaque facteur sur la réponse et donne une information supplémentaire en complément de l'analyse de variance.

Ayant montré les différentes possibilités de sélections de facteurs par un criblage multizones, une étude quantitative par surface de réponse peut être envisagée en retenant les facteurs influents. Quelques uns de ces exemples sont repris afin d'illustrer l'intérêt de l'approche.

III.2.1.3 Méthodologie des surfaces de réponse

Les variations de la réponse sont calculées en fonction des facteurs précédemment jugés influents lors de l'analyse de screening. Cette étude est davantage quantitative, le but étant de déterminer comment la réponse varie [Box-87], [Gou-96].

Dans ce contexte, les modèles utilisés permettent généralement de prendre en compte les variations quadratiques de la réponse. De ce fait, chaque facteur doit prendre au minimum 3 niveaux différents. Un ensemble d'outils complémentaires peut alors être utilisé pour évaluer la qualité de la modélisation et analyser les variations décrites par les modèles. La méthodologie des surfaces de réponse repose sur la construction de plans particuliers appelés couramment plans de RSM (Response Surface Methodology). On peut citer les plans Doehlert, grilles, Box-Behnken, etc.

Un apport original a été de réutiliser les plans treillis [Th.1 - S.Vivier], cette fois-ci appliqués au cas de la RSM. En effet, deux possibilités, le plan de base peut être plus sophistiqué ou alors une extension du plan de screening peut être envisagée. En effet, on peut décider de déterminer les points manquants par interpolation permettant un gain de temps considérable. Pour cela, il faut bien entendu que le domaine soit identique. Dans les exemples

de la MS à aimants et la MAS, les deux machines appliquées à la traction ferroviaire, nous avons appliqué cette démarche de réutiliser le plan treillis associé à une méthode d'interpolation.

Plusieurs exemples présentant différents types de représentations sont détaillés ci-dessous. Dans un premier temps, le frein linéaire à courants de Foucault est présenté brièvement en annexe I.3 et détaillé dans les références [R8], [CI.21], [CI.22]. D'autres exemples sont référencés comme le cas d'une machine synchrone [Gil-98], [Gil-00].

Application à l'étude du frein linéaire à Courants de Foucault

⇒ Référence [DEA D3] ; [Th S. Vivier] ; [R8] ;

Lors de l'étude de criblage présentée au § III.2.1.1, seuls 2 facteurs – le nombre de pôles et le courant d'excitation – sont pris en compte et étudiés pour différentes vitesses. En ce qui concerne la hauteur de culasse H_y , sa valeur est fixée de façon à ce que l'induction dans la culasse soit en dessous de 1.5-1.6T. L'épaisseur de l'entrefer est fixée à sa valeur maximale.

Sur la figure III.10, les résultats de simulations présentent la variation du rapport Force de freinage/Force d'attraction en fonction du nombre de pôles (N_{pol}) et de la vitesse.

Le maximum de force de freinage est obtenu pour 6 ou 8 pôles mais le rapport F_{frein}/F_{attr} est maximum pour un modèle 10 pôles et une vitesse égale à 25m/sec. En effet, la force d'attraction décroît très rapidement en fonction de la vitesse, ce qui explique l'augmentation de plus de 10% du rapport des forces.

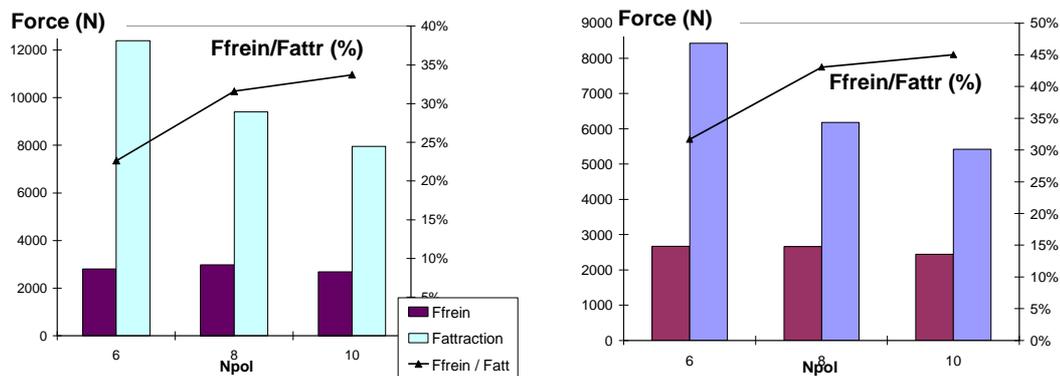


Figure III.10. Forces de freinage et d'attraction fonction du nombre de pôles pour 2 vitesses – Gauche : $v=12.5\text{m/sec}$ – Droite : $v=25\text{m/sec}$

Nous pouvons observer le compromis entre le maximum de force de freinage et le minimum de force d'attraction. Dans le but d'étudier les variations de la réponse : force d'attraction ou force de freinage, différents plans de surface de réponse ont été calculés en utilisant SOPHEMIS. Des simulations sont effectuées sur des modèles possédant de 4 à 12 pôles.

Ainsi et avec les différents résultats précédents, avec une exigence d'une force de freinage maximale, le modèle 8 pôles a été retenu car il réalise le meilleur compromis. Pour exemple, nous présentons ci-dessous les surfaces de réponse et leur modèle analytique des forces d'attraction et de freinage en fonction de la vitesse et de la densité de courant j (figure III.11).

Grâce à ces modèles équivalents, une étude de sensibilité de la réponse peut être réalisée.

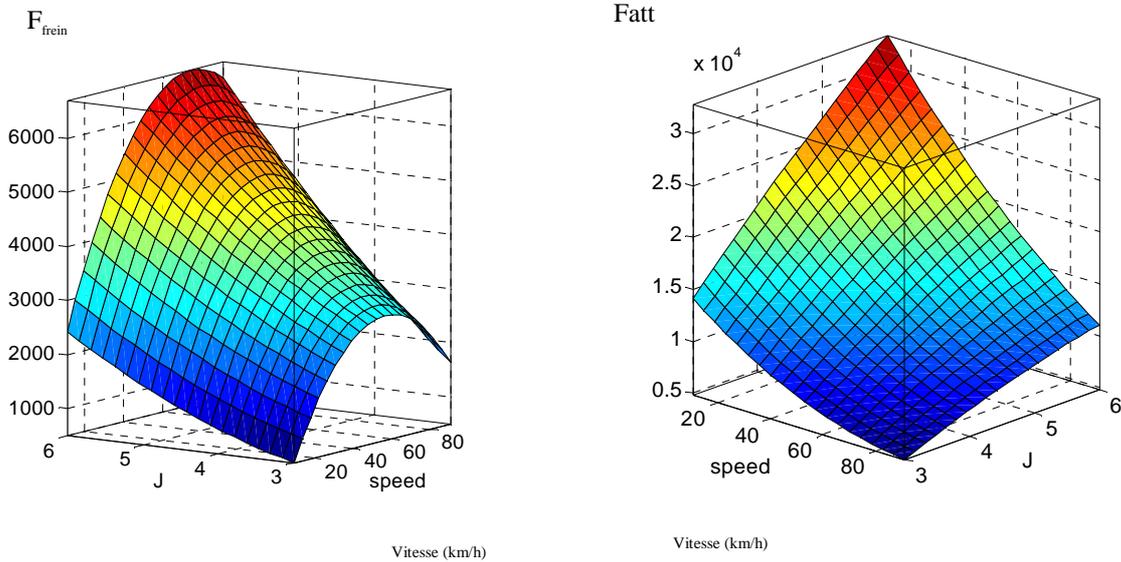


Figure III.11. Forces de freinage et d'attraction fonction de la vitesse et de la densité de courant J . (modèle 8 pôles)

Fig de gauche : force de freinage

$$(F_{\text{frein}} = -511 + 85.5 * v - 345.8 * J - 1.05 * v^2 + 95.7 * J^2 + 11.8 * v * J)$$

Fig. de droite : force d'attraction

$$(F_{\text{att}} = -7829 - 78.4 * v + 883 * J + 1.1 * v^2 - 231 * J^2 - 51.6 * v * J)$$

Ces deux expressions ne sont valides que dans le domaine considéré : v comprise entre 20 et 100 km/h et j comprise entre 3 et 6 A/mm².

L'étude du dispositif et l'analyse des surfaces de réponses ont permis de fixer le nombre de pôles, sa géométrie, le courant, mais aussi d'atteindre un rapport force de freinage / force d'attraction égal à 55% à la vitesse de 25 m/sec, soit un gain de plus de 10% par rapport à la géométrie initiale. La force de freinage est suffisante par rapport à la valeur fixée par le cahier des charges.

En conclusion sur cette étude d'un FCF linéaire, la méthode des plans d'expériences combinée à des simulations numériques éléments finis a permis d'étudier une structure complexe en considérant de nombreux phénomènes mais aussi de nombreux paramètres géométriques.

En premier lieu, la technique de screening a servi à expliciter et à évaluer l'influence des différents paramètres de conception sur les forces de freinage et d'attraction du dispositif.

Dans une seconde étape, les facteurs les plus influents ont été retenus pour la construction des surfaces de réponse de ces 2 forces. Celles-ci ont ainsi été déterminées en fonction de la vitesse et des ampères-tours pour un modèle 8 pôles, ce dernier présentant le meilleur compromis.

Elles ont donc permis de caractériser les possibilités du dispositif et après coup d'atteindre les objectifs fixés par le cahier des charges, en sélectionnant les valeurs adéquates des facteurs.

Application au cas d'une machine synchrone à aimants

⇒ Exemples de surfaces de réponse concernant le bruit d'origine électromagnétique appliquées aux machines de traction et déduction de zones optimales [Th.2 A. Ait-Hammouda], [R13 & R14] ;

Le cas de l'étude de la machine synchrone à aimants, présenté au §III.2.1.2 dans le cadre d'un plan de criblage, est repris. Nous avons exploité directement ce plan treillis, ce qui nous a permis de tracer les surfaces de réponse mais aussi des iso-surfaces en décibels [R13].

Les 2 graphes ci-dessous représentent la variation du niveau acoustique en fonction de facteurs influents comme 'alp' qui montre que le changement de l'ouverture de l'aimant peut modifier de façon considérable la réponse ce qui avait été présentée dans la partie screening.

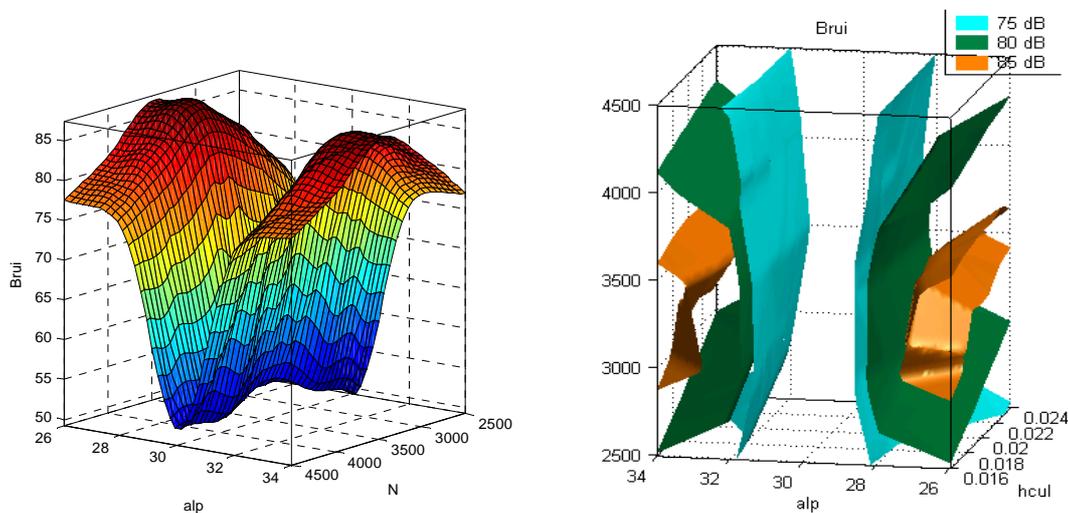


Figure III.14. : Effet de ' h_{cul} ', de ' N ' et de ' alp ' sur le niveau acoustique en dB représenté par des iso-surfaces.

La figure de droite est un mode de représentation permettant d'avoir 3 facteurs en même temps fonction de la réponse, c.a.d. le bruit d'origine électromagnétique. Les 3 iso-surfaces : 75, 80 et 85 dB, permettent de déduire *une zone optimale* dans lequel le facteur ' alp ' est compris entre 28.5° et 31.5° .

Sur ces différents exemples présentés, si le nombre de facteurs est faible, on peut facilement, déduire la zone optimale en fonction du cahier des charges imposé en utilisant la technique des plans d'expériences.

Enfin, d'autres exemples d'applications sont détaillés :

- Cas de l'alternateur à griffes : PdE expérimentale et numérique (placés en annexe I.1.1)
- Cas du turbo-alternateur : présentation de surfaces de réponse concernant l'évolution de l'harmonique 3 de la force électromotrice ou alors du couple électromagnétique fonction du circuit magnétique) : détaillé au § IV.

En conclusion, un rappel de la démarche est représenté sur la figure suivante :

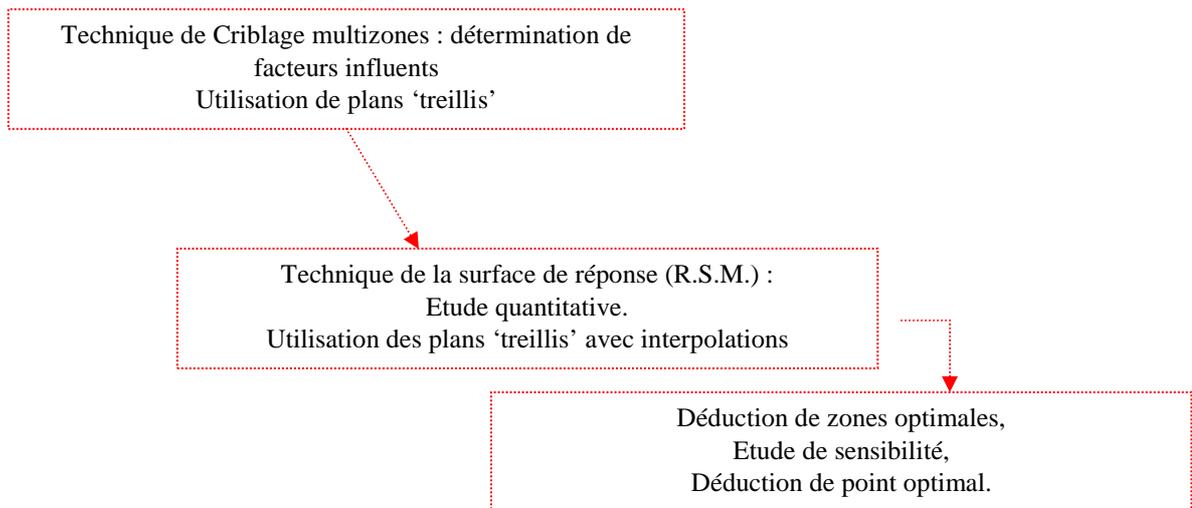


Figure III.15. Démarche utilisant la technique des PdE.

Enfin, une possibilité non exploitée est d'utiliser les modèles équivalents ou polynomiaux déduits de la R.S.M. ; par exemple les 2 fonctions correspondant à la force de freinage et la force d'attraction dans le cas du F.C.F., couplées à une méthode d'optimisation « classique » (Plus grande pente, SQP...) afin de déduire le point optimal.

A présent, nous allons montrer une application originale des plans d'expériences qui concerne l'optimisation et le développement de stratégies par plans d'expériences.

III.3. L'optimisation par 'PdE':

Depuis une dizaine d'années, l'optimisation des dispositifs électrotechniques fait l'objet de parutions de plus en plus nombreuses. L'usage des méthodes stochastiques se répand [Vas-97] [Gal-99] [Sal-97]; elles sont souvent comparées aux méthodes déterministes [Haj 03] et

viennent parfois à être combinées avec elles pour former des méthodes hybrides [Alo-00] [Far-01] [Seg-99].

Ainsi, une multitude de méthodes d'optimisation existe : algorithmes génétiques, essais particuliers, plans d'expériences, recherche taboue, recuit simulé, méthodes d'optimisation combinatoire, intelligence artificielle, mais, en conclusion, il est encore difficile de choisir une approche en vue d'obtenir un optimum global avec un coût de simulations réduit. De plus, il faut la plupart du temps utiliser des algorithmes d'optimisation sous contraintes et des paramètres continus et discrets seront certainement mélangés. Par exemple, dans les machines électriques, le nombre de pôles est un facteur discret alors qu'une dimension de la machine est un facteur continu.

La différence par rapport à des algorithmes d'optimisation déterministes (gradient conjugué, plus grande pente, etc..) et stochastiques (algorithmes génétiques, méthode 'taboue', etc..) est que l'optimisation par PdE permet de conserver un modèle équivalent des phénomènes investigués et de fournir la sensibilité de l'optimum.

Ainsi, en marge de ces algorithmes d'optimisation, la méthode des plans d'expériences peut être utilisée pour l'optimisation d'un système. Elle permet d'établir et d'analyser les relations existant entre les grandeurs étudiées (réponses) et leurs sources de variations supposées (facteurs). Il y a un nombre croissant de parutions présentant des optimisations de systèmes électrotechniques par l'utilisation de la méthode dite *heuristique (ou déterministe)* des plans d'expériences [Ron-97] [Tsu-00] [Bri-01] [Viv-01][Gao-01] [Gil-04] [li-04].

Tous ces travaux ont en commun une utilisation limitée de la MPE : chacune des procédures d'optimisation présentées se base sur la réalisation et l'analyse d'un unique plan d'expériences.

Un apport de la thèse de S. Vivier [Th.1] visa à élargir cet emploi, en assimilant le PdE à une brique élémentaire servant à la construction de stratégies d'optimisation plus complexes, afin d'augmenter la précision ou la portée des conditions optimales recherchées.

Plusieurs exemples :

- un exemple simple, modèle à deux maxima, est présenté référence [R12]. Les différentes stratégies, rappelées brièvement ci-dessous, sont comparées pour un même exemple.
- Le deuxième exemple connu, une bobine supraconductrice ; correspond au Workshop problem 22 (SMES Optimisation Benchmark <http://www-igte.tu-graz.ac.at>), référencé dans [R9], [Alo-03], [Cas-22].
- Le troisième reprend le frein à courants de Foucault et une présentation sur une stratégie.

Ainsi, dans un premier temps, un résumé des trois approches originales est rappelé, puis celles-ci sont évaluées sur différents exemples. A chaque itération, ces méthodes calculent un

plan d'expériences ; le modèle déduit permet alors de déterminer les caractéristiques du plan à calculer à l'itération suivante.

III.3.1. Stratégie de glissement de plans

Le premier plan est réalisé dans une zone du domaine d'étude 'DE' déterminée par l'expérimentateur qui doit également fixer les caractéristiques de ce plan (taille, nombre d'expériences, etc.). Ce premier PE sert au calcul d'une meilleure direction, c'est-à-dire d'une orientation dans le 'DE' pour laquelle les valeurs de la fonction réponse évoluent vers l'optimum désiré (figure III.16). A noter que cette information est indépendante de tout calcul de gradient.

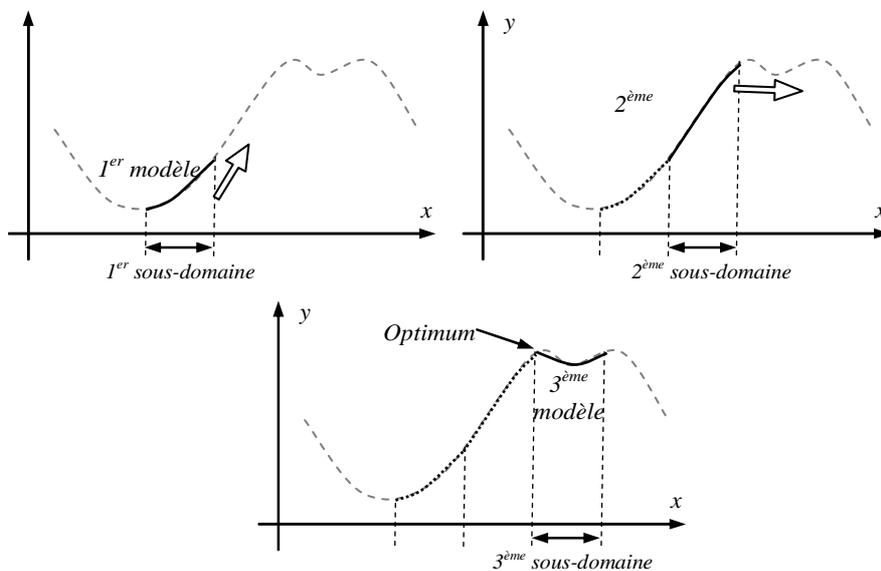


Figure III.16. Principe simplifié de fonctionnement des stratégies d'optimisation par glissements de plans.

Cette information de direction, ajoutée aux considérations de récupération d'expériences entre plans, permet de déduire le positionnement du plan à réaliser lors de l'itération suivante. Le fonctionnement est donc itératif. Les optima trouvés par cet algorithme sont typiquement locaux dans la mesure où ils dépendent très fortement de l'emplacement du premier plan réalisé.

Deux exemples sont présentés : le premier référencé [Viv-01] présente cette stratégie appliquée à un moteur brushless, le second est illustré par une fonction test à 2 maxima [R12]. Ci-dessous, nous présentons uniquement le résultat obtenu.

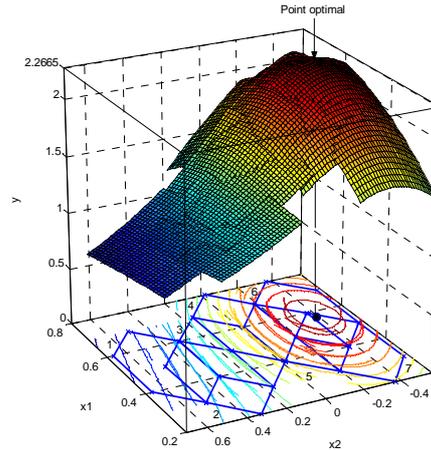


Figure III.17. Stratégie de glissements de plans – utilisation de modèles du 2nd ordre

La progression des plans au cours de l'algorithme est déduite de l'étude des modèles polynomiaux obtenus à chaque itération. L'étude des modèles permet de déduire facilement des directions de meilleures valeurs, au sens de l'optimalité choisie (recherche du maximum ici).

Lorsqu'aucune amélioration de la réponse ne peut plus être trouvée, une technique de recoupement de chemins optimaux est appliquée afin de préciser les coordonnées du point optimum ainsi trouvé [Th.1]. Dans l'exemple courant, le plan n°6 est celui qui donne la meilleure valeur de la réponse. Pour préciser la position du point optimal, un septième plan est calculé au plus proche de ce point. Celui-ci est alors redéfini par confrontation des modèles de ces 2 derniers plans.

III.3.2. Stratégie de resserrement de plans ou zoom.

La stratégie précédente présente l'inconvénient de ne couvrir qu'une partie du domaine d'étude, ce qui relativise le caractère optimal de la solution trouvée.

Afin de réduire cette incertitude, il est intéressant de faire débiter l'optimisation par une modélisation complète du domaine d'étude, puis de resserer sur la zone pour laquelle le modèle donne les meilleures valeurs de réponse (figure III.18).

Ces dernières sont comprises entre l'optimum de la modélisation et une limite spécifiée par l'expérimentateur. Plus cette limite est proche de l'optimum du modèle, plus le resserrement est important, et donc plus la zone considérée à l'itération suivante est petite. La convergence s'en trouve donc accélérée mais il reste cependant le risque qu'elle se réalise sur un optimum local. Il y a donc compromis entre rapidité et certitude sur le type de la solution.

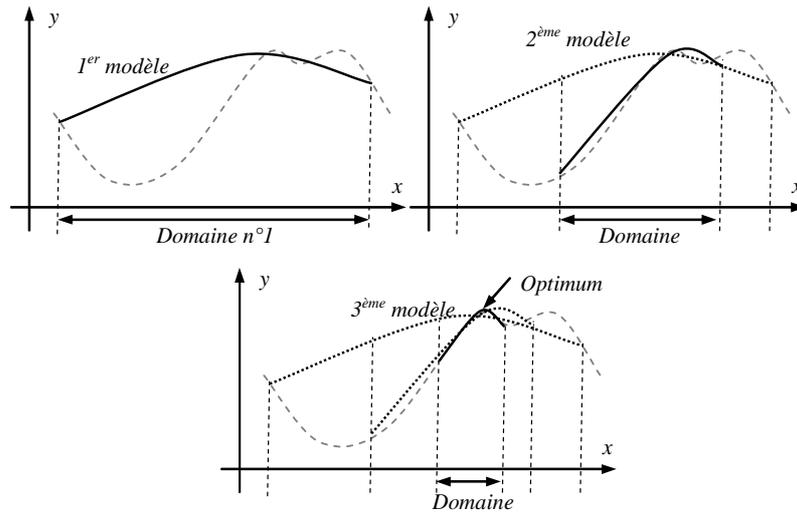


Figure III.18. Principe simplifié de fonctionnement des stratégies d'optimisation par resserrements de plans

La méthode d'optimisation par zooms illustrée ici utilise à chaque itération des modèles du second ordre. Les plans d'expériences employés doivent donc avoir au minimum 3 niveaux par facteur. Dans le cas présent, le choix s'est porté sur des plans factoriels multi-niveaux (également appelés plans grilles).

A la première itération, un tel plan est calculé sur l'ensemble du domaine d'étude. Le modèle polynomial qui en est déduit, décrit une surface parabolicoïde dont le point stable est un maximum situé à l'intérieur du DE.

Le plan d'expériences calculé à la deuxième itération est alors *centré sur ce point*, sur une zone plus petite et *orientée selon les axes principaux* du modèle de l'itération précédente.

Les mêmes opérations sont appliquées aux itérations suivantes. La diminution de la taille des domaines considérés successivement permet d'obtenir in fine une grande précision sur la position du point optimal. Une illustration est donnée sur la figure suivante [R12] :

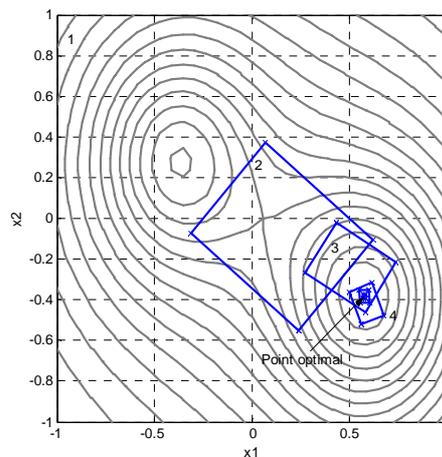


Figure III.19. Stratégie de resserrements de plans – utilisation de modèles du 2nd ordre

III.3.3. Stratégie « exhaustive »

Afin de s'assurer de la globalité des conditions optimales recherchées, la méthode des PdE est employée ici pour modéliser les variations de la réponse dans l'ensemble du DE. L'optimisation est donc précédée par une modélisation exhaustive.

Compte tenu des limites des modèles de base employés, la modélisation globale est ici toujours réalisée par morceaux. Le DEP est ainsi découpé en sous-domaines, dans chacun desquels est calculé un plan d'expériences puis un modèle. La mitoyenneté des sous-espaces permet une récupération optimale des expériences.

Les différents algorithmes utilisant cette stratégie se distinguent soit par les modèles de base utilisés, soit par leur technique de subdivision du DEP en sous-domaines.

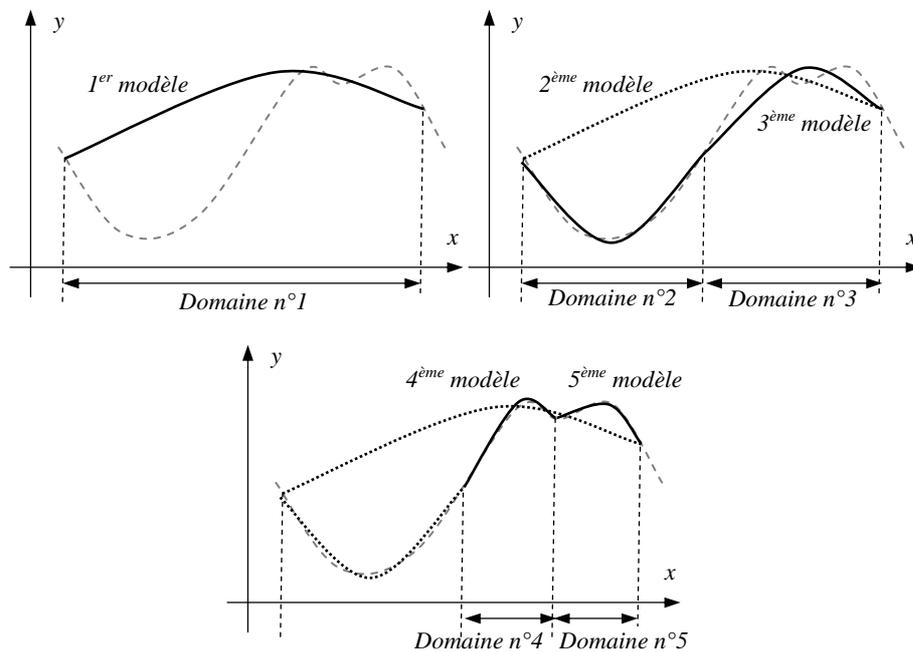


Figure III.20. Principe simplifié de fonctionnement des stratégies d'optimisation exhaustives

L'illustration est donnée ci-dessous, et deux autres exemples [Gil-04], [CI...] présentent l'optimisation d'un moteur tubulaire et d'une machine synchrone à aimants en considérant, dans ce deuxième cas, le bruit d'origine électromagnétique comme réponse.

La figure III.21 donne une illustration du résultat final en utilisant une stratégie exhaustive. En premier lieu, la fonction objectif est modélisée par morceaux : le domaine d'étude est scindé en sous-domaines qui peuvent être eux-mêmes décomposés en espaces plus petits. Ces découpages sont réalisés suivant les variations de la réponse : c'est ainsi que la taille des sous-domaines est plus petite lorsque le gradient de la réponse est le plus grand. Dans chaque sous-domaine, des modèles du second ordre sont utilisés. Ils permettent de prendre en compte de façon satisfaisante les différentes courbures de la réponse étudiée.

Sur la figure III.21, les différents sous-domaines sont représentés sous la surface. Dans un deuxième temps, la modélisation globale ainsi construite peut être utilisée pour déduire les caractéristiques des conditions optimales.

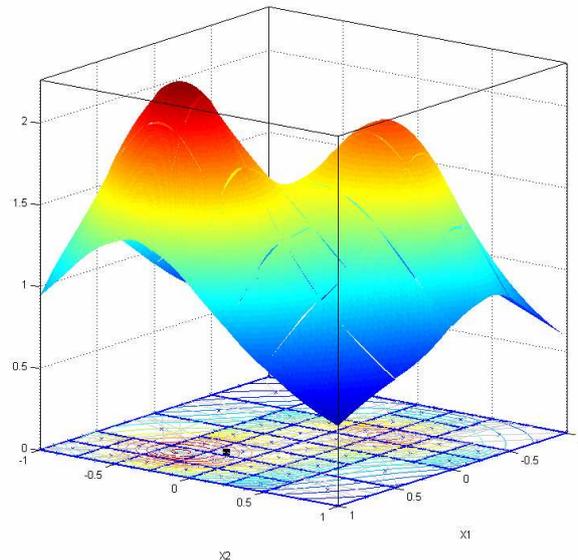


Figure III.21. Stratégie exhaustive – utilisation de modèles du 2nd ordre

Comparaison des techniques d'optimisation

Les trois différentes stratégies présentées se distinguent par leur fonctionnement et appellent donc à des usages choisis et distincts.

La procédure de glissements de plans s'avère de manière générale économique (et donc rapide), que cela soit en raison du faible coût de chaque plan réalisé ou bien des récupérations importantes d'expériences entre plans successifs. Employée seule, cette stratégie est par nature imprécise. Son emploi peut donc être avantageusement couplé avec celui d'une méthode de type 'plus grande pente'. Dans tous les cas, la portée de l'optimum trouvé est locale.

La diminution progressive de la taille des plans permet d'augmenter les chances de trouver l'optimum global au sein du DE, sans toutefois l'assurer complètement. La modélisation du DE réalisée au cours de l'optimisation est meilleure que dans le cadre de la stratégie précédente car elle couvre l'ensemble du domaine. Cependant, le placement irrégulier des plans successivement calculés peut se révéler difficile à gérer dans certains cas. Enfin, on notera que les opérations particulières de zooms permettent de déterminer avec précision les caractéristiques du point optimal.

Les stratégies dites « exhaustives » augmentent une fois de plus la probabilité de trouver l'optimum global au sein du DE, en le découpant de manière systématique en sous-domaines. Ces divisions sont déduites des variations constatées de la fonction réponse, qui est alors modélisée par morceaux. Bien que coûteuse, cette stratégie possède de nombreux atouts. Elle permet notamment de construire des modélisations précises, de manière progressive : à partir

d'une configuration initiale, l'utilisateur peut envisager de rajouter des facteurs ou des expériences afin de compléter la connaissance du phénomène étudié.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques constatées pour chacune des 3 stratégies d'optimisation précédemment décrites.

Groupe	Type optimum	Modélisation (étendue)	Précision	Récupération de points	Coût Total
Glissements de plans	Local	Partielle	Faible	Moyenne	Faible
Zooms successifs	Local	Partielle	Forte	Faible	Moyen
Modélisation Globale	Global	Globale	Moyenne	Forte	Important

Tableau III.6. Evaluation des caractéristiques moyennes des 3 stratégies d'optimisation par plans d'expériences

En conclusion, les caractéristiques des principales stratégies d'optimisation qui mettent en œuvre la technique des plans d'expériences ont été détaillées et illustrées sur un exemple simple : une fonction analytique où le maximum est connu, ce qui permet leur compréhension. Elles ont été appliquées avec succès à différents dispositifs électrotechniques (quelques exemples sont présentés ci-dessous).

A la différence notamment des algorithmes d'optimisation déterministes ou stochastiques, les simulations demandées sont réalisées en vue de la construction d'un modèle et non pas directement pour la recherche des conditions optimales.

Par nature, la méthode des plans d'expériences n'est pas une technique d'optimisation, mais plutôt une méthodologie complète pour l'étude et la maîtrise de phénomènes physiques complexes. Cette maîtrise des paramètres qui contrôle le phénomène physique, conduit naturellement à la recherche d'optima.

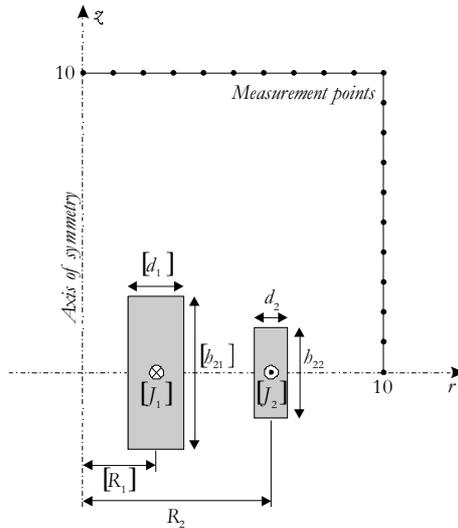
Les propriétés algébriques des plans d'expériences permettent d'implémenter facilement dans un logiciel dédié ces différentes stratégies d'optimisation, ce qui a été réalisé dans SOPHEMIS. Leurs intérêts principaux restent ceux des plans d'expériences : coût réduit, précision optimale et production en permanence de modèles directement exploitables comme cela a été présenté dans l'étude du frein à courants de Foucault.

Application au cas d'une bobine supraconductrice

⇒ [Th.2 - S.Vivier] [R9] ;

L'intérêt de cet exemple est d'avoir utilisé la technique des PdE et plus particulièrement les plans treillis en vue d'une optimisation de structure. Une comparaison avec la méthode exhaustive est aussi faite.

Le schéma, figure III.22, présente le dispositif et rappelle les paramètres utilisés :



Test sur 3 facteurs
uniquement



Nom	Unité	Niveau bas	Niveau haut	Pas
R2	M	2.6	3.4	0.01
h22	M	0.204	1.1	0.007
d2	M	0.1	0.4	0.003

Figure III.22. S.M.E.S.(superconducting magnetic energy storage) device

Cahier des charges :

Ce problème d'optimisation consiste à trouver un minimum pour la fonction 'objective' OF suivante:

$$OF = \frac{B_{stray}^2}{B_{norm}^2} + \frac{|E - E_{ref}|}{E_{ref}}$$

Où $E_{ref} = 180 \text{ MJ}$, $B_{norm} = 3.10^{-3} \text{ T}$ et $B_{stray}^2 = \frac{1}{22} \cdot \sum_{i=1}^{22} |B_i|^2$

(avec B_{stray}^2 est déterminé à partir de l'induction au niveau des 22 points équidistants représentés sur la figure III.22).

Une contrainte est définie : la valeur maximum d'induction ne doit excéder pour le système S.M.E.S. $B_{max} < 4.92 \text{ T}$.

Pour rappel, les différentes approches sont synthétisées ci-dessous ainsi que les résultats :
A) la première approche repose sur l'utilisation du Screening puis de la RSM. Ainsi, chaque domaine entre le niveau haut et bas de chaque facteur est décomposé en 4 zones :

- *Partie 'Criblage' : utilisation d'un plan treillis à 64 expériences qui est composé de plans fractionnaires judicieusement juxtaposés afin d'économiser un maximum d'expériences [R9].*

⇒ *Résultats : 2 facteurs influents sur les 3 : h22 et d2*

r2 sera par conséquent fixé à sa valeur intermédiaire : $r2=3$

- *Partie 'Surface de réponse' : utilisation d'un plan grille à 121 expériences sur les 2 facteurs (11*11).*

⇒ *Résultats : Modèle 2 facteurs représentés ci-dessous.*

Grâce à ce nouveau plan, le modèle (h22, d2) peut être déduit et des interpolations être établies. Dans ce contexte, des représentations graphiques sont faites:

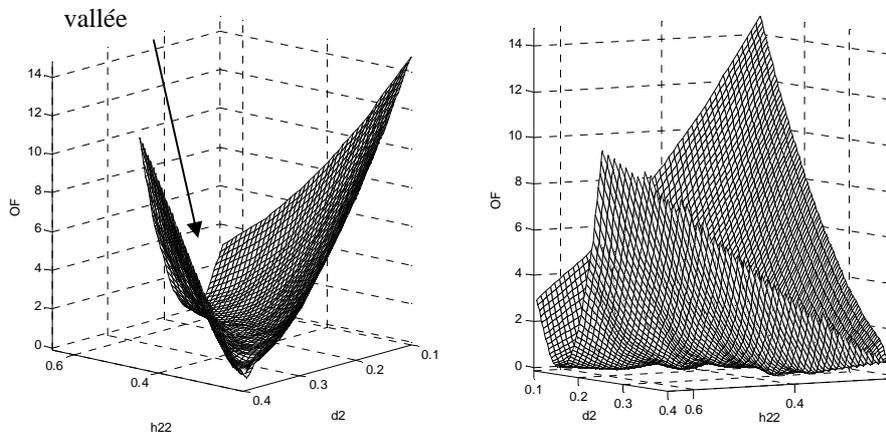


Figure III.23. Variations de la fonction 'objectif' OF en fonction de $h22$ et $d2$ ($r2=3$)

On peut voir que des valeurs minimales pour le domaine d'étude sont situées le long d'une vallée incurvée avec une petite pente. Des minima successifs peuvent également être observés dans ce secteur.

Par conséquent, la recherche des conditions optimales peut être obtenue exclusivement au moyen d'une approche systématique : toutes les expériences situées dans la vallée doivent être calculées. Pour $r2$ égale 3, le point optimal a pour coordonnée $h22=0.239$ et $d2=0.394$.

L'erreur commise sur la solution optimale donnée par [Cas-22] est de l'ordre de 7%.

B) la deuxième approche repose sur la dernière stratégie présentée : la méthode exhaustive

À chaque itération, un modèle polynomial est calculé à partir des résultats. La qualité de ce modèle est alors vérifiée : elle inclut sa représentativité et validité. Cet algorithme fonctionne d'une manière itérative. Il explore le domaine étudié d'une façon approfondie.

Un meilleur point a été obtenu après 2 tests détaillés dans le tableau ci-dessous (amélioration du zoom possible et modification du point initial). La méthode employée a nécessité 2247 expériences avec un temps de calcul de 10h 19min sur un PC Pentium IV à 2 Ghz.

La différence avec l'optimum global est diminuée et est égale à 2,5%.

Tableau III.7. Résultats obtenus avec les 2 approches

Variable	r2	h22	d2	OF
<i>Best point (IGTE)</i>	3.08	0.239	0.394	0.08646
1 ^{ère} approche	3	0.239	0.394	0.09254
2 ^{nde} approche	3.096	0.295	0.315	0.08876

En conclusion, l'intérêt de la première approche est de privilégier la détermination de facteurs influents et déduire un optimum. L'inconvénient par la suite pour l'optimisation réside bien entendu, dans le fait de fixer un des paramètres, ce qui limite la validité de l'optimum obtenu.

La seconde approche reprend la méthode exhaustive déjà présentée. Elle est certes coûteuse en temps de calcul mais permet d'obtenir une meilleure précision sur le résultat. Ces conclusions rejoignent les remarques données précédemment dans le tableau sur les comparaisons des différentes techniques.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les avantages et inconvénients de l'approche des plans d'expériences et des apports effectués.

Les plans 'treillis' ont été présentés et appliqués à différents exemples (bobine supraconductrice, machine synchrone à aimants et machine asynchrone). Les avantages de ces plans d'expériences sont les suivants :

- *Réduction du nombre d'expériences (plans fractionnaires combinés judicieusement),*
- *Elargissement du domaine d'étude par du criblage global,*
- *déduction des paramètres influents par zones,*
- *représentations adaptées : cumul des pourcentages pour apprécier l'effet de chaque facteur sur la réponse, représentation par iso-valeurs, etc...*

Nous avons surtout privilégié la détermination de facteurs influents, ce qui reste, bien entendu, une première étape. Celle-ci permet aussi au concepteur d'analyser l'influence de chaque facteur sur différentes réponses.

Enfin, différentes stratégies permettent de répondre à l'optimisation d'un dispositif ainsi qu'une meilleure précision sur le résultat en comparaison à une étude par surfaces de réponse.

Nous allons à présent donner quelques exemples dans le chapitre suivant sur les travaux de thèses actuels et futurs.

IV] APPLICATIONS

Modélisation par réseau de perméances 2D et 3D

Cas de l'alternateur à griffes

(RdP 3D + optimisation de la forme des griffes en vue de réduire le bruit)

⇒ Résumé en Annexe + articles

L'utilisation d'un réseau de perméances 3D nous a permis de modéliser une machine à griffes qui est typiquement tridimensionnelle. Le modèle obtenu prend en compte aussi bien le mouvement du rotor que la saturation des matériaux ainsi que l'électronique associé (ponts des diodes). Nous pouvons avec ce modèle faire varier différents paramètres de la machine : électriques, magnétiques ou géométriques, et observer leurs conséquences sur les grandeurs de sortie.

Ensuite, une étude sur la forme des griffes (variation de la pointe, de la base et de la longueur de griffes) afin de limiter le bruit d'origine électromagnétique a été réalisée en utilisant la technique des plans d'expériences. Un plan d'expériences numérique et expérimentale a permis de déterminer les facteurs significatifs, de quantifier leurs influences ainsi que leurs interactions et donc de proposer des modifications de géométrie favorables à la réduction du bruit émis.

Cas du turbo-alternateur (RdP à topologie variable)

a) Contexte de l'étude et objectif

Dans les complexes industriels, les cahiers des charges sont de plus en plus exigeants en termes de performances et d'optimisation économique des installations de production électrique. Dans certains cas, on cherchera à minimiser les courants de court-circuit pour soulager les organes de coupure. Dans d'autres cas, au contraire, on veillera à limiter les chutes de tension transitoires. Les moyens de calcul rapides permettant de dimensionner les machines, basés sur des modèles analytiques, n'ont pas toujours la précision nécessaire. Les méthodes de calcul par Eléments Finis permettent d'optimiser des parties locales de la machine mais deviennent trop lourds d'utilisation s'agissant de dimensionner des équipements pour répondre aux appels d'offre de matériels de moyenne puissance.

L'objectif de ce travail concerne le développement d'un outil complètement 'automatisé' permettant dans un premier temps la modélisation des turbo-alternateurs.

Notre idée est de se reposer sur un réseau de perméances paramétrées établi à partir de calculs analytiques et en ce qui concerne l'entrefer, l'utilisation de la Tooth Contour Method présentée au §II.2.4 ou méthode de contour de dents. Le couplage électrique, magnétique ainsi que mécanique, la saturation, le mouvement et les effets tridimensionnels sont pris en considération.

L'objectif à long terme est de mettre au point un outil de conception optimale électromagnétique de turbo-alternateurs de 10 à 100 MW, comprenant un modèle numérique d'une part, et un progiciel sur PC d'autre part.

Cet outil, développé sous Matlab et nommé 'Turbo-TCM', a été présenté brièvement au §II.4. Il nous fournit très rapidement le circuit magnétique (génération automatique), en quelques secondes, et la possibilité d'effectuer des calculs :

- en statique, exemple : calcul des grandeurs comme la tension et le courant débité pour un point de fonctionnement nominal,
- ou en dynamique, exemple : détermination de l'allure temporelle de la tension de sortie.

b) Choix de l'approche

Cette méthode permet de conserver la rapidité d'exploitation et d'améliorer la précision de calcul en adaptant facilement le réseau de perméances à la configuration étudiée. Le travail développé est ouvert aux méthodes d'optimisation ainsi qu'à la prise en compte de régimes dynamiques. La méthode proposée par l'équipe COME et le MPEI de Moscou a retenu l'attention de Jeumont SA pour développer un nouveau logiciel dans le cadre du CNRT « Réseaux et Machines du Futur » de Lille.

c) Rappel sur le turbo

Les turbo-alternateurs de la gamme industrielle (10 à 100 MW) sont entraînés par des turbines à gaz ou à vapeur tournant aux vitesses de synchronisme, 3000 ou 3600 tr/min. Le refroidissement par air est direct pour le bobinage rotorique dont les conducteurs sont ajourés pour laisser l'air se propulser depuis un canal sous encoche vers l'entrefer. Le stator est en refroidissement indirect, l'air circulant au travers des événements ménagés entre les paquets de tôles du circuit magnétique (figure IV.1).

Les bobinages rotoriques sont concentriques, logés dans des encoches taillées dans l'arbre massif magnétique. Les têtes de bobines sont maintenues par des frettes en acier amagnétique. Le bobinage statorique triphasé est réalisé en barres (2 par encoches) connectées entre elles de façon à réaliser les circuits souhaités pour obtenir la tension de sortie nominale avec un circuit magnétique idéalement magnétisé et pour minimiser les harmoniques de tension.

Les développantes et les circuits de couplage sont fermement supportés et calés pour éviter les vibrations qui endommagent les isolants. Les plateaux en acier magnétique sont

protégés du champ magnétique développé par les courants dans les têtes de bobines par des écrans de flux en cuivre.

Les caractéristiques dimensionnelles et les propriétés physiques de ces éléments constructifs constituent les données d'entrée du code de calcul développé.

Des extensions du code permettront également de dimensionner des machines à rotor cylindrique à polarité multiple (2 - 4 - 6 pôles)



Carcasse et stator d'un alternateur 4 pôles

*Rotors bobinés d'un alternateur 4 pôles
(en premier plan) et d'un turboalternateur
2 pôles (en arrière plan)*

Figure IV.1. Présentation du rotor et du stator de turbo.

Pour cette application, le nombre de paramètres géométriques et électriques varie entre 150 et 200 pour l'étude. On doit intégrer les différentes formes d'encoches mais aussi la possibilité de relever le flux et l'induction en de nombreux points.

La deuxième difficulté est le nombre de phénomènes à prendre en compte. Les principaux concernent:

- c) La prise en compte des événements (canaux de ventilations),
- d) les têtes de bobines,
- e) le bobinage (prise en compte des isolants et des cales entre plans)
- f) la présence ou non de cales d'encoche magnétique ou semi-magnétique.

d) Modélisation par RdP

Le réseau de perméances du système magnétique est généré automatiquement à partir des paramètres géométriques. La structure générale du stator et du rotor est présentée sur la figure suivante (figure IV.2).

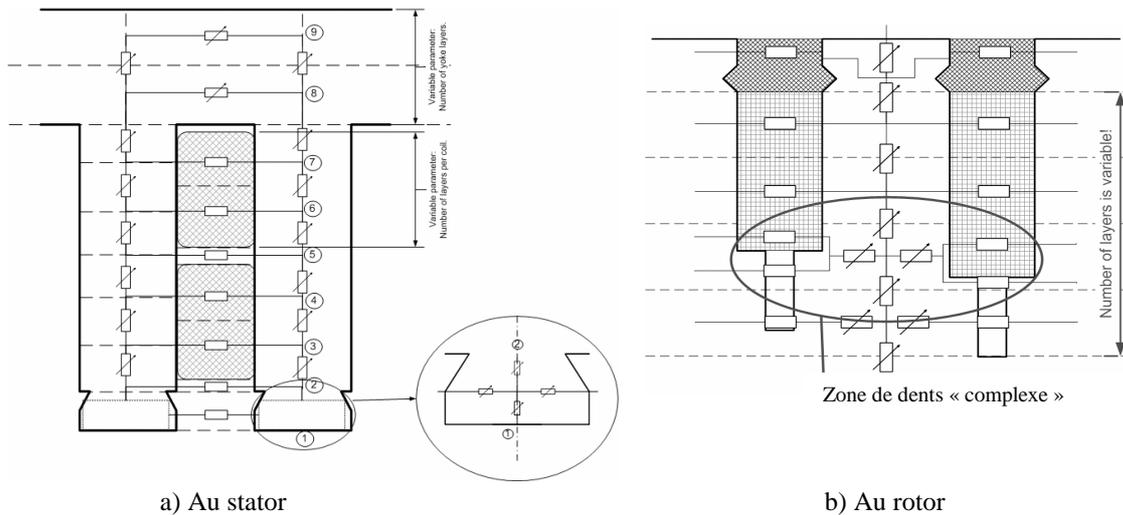


Figure IV.2. Partie du réseau de perméances

Le nombre de subdivisions de la culasse statorique et des dents est variable. Cette variation sur la densité du réseau est possible au stator et au rotor. Elle permet d'intégrer plus précisément le problème des saturations locales. Cette décomposition a une influence, bien évidemment, sur le temps de calcul.

Le rotor d'un turbo-alternateur (figure IV.2.b) peut être très sophistiqué avec différentes formes d'encoches et de dents avec des profondeurs variables. Ces différentes formes sont prises en considération par une analyse fine des zones afin de trouver le meilleur découpage.

La figure IV.2.b montre le circuit magnétique équivalent d'une dent rotorique. L'utilisateur définit uniquement le nombre de subdivisions.

Couplage électrique – magnétique :

Les sources de force magnétomotrice (MMF) sont placées au niveau des branches horizontales (figure présentée au § II.2.5). Elles permettent le couplage électrique-magnétique.

Des détails du circuit complet avec le couplage et la description du système d'équations sont donnés dans la référence [CI.13], fournie en annexe I.1.2. Notre réseau est construit sur une période électrique uniquement et dans ce modèle équivalent, les courants induits au rotor ne seront pas considérés.

Prise en compte des effets 3D :

Dans le cas de l'étude des turbo-alternateurs, la prise en compte de la 3ème dimension est nécessaire en vue d'intégrer les phénomènes suivants tels que les canaux de ventilations ou les effets d'extrémités. En effet, l'influence des canaux de ventilations situés au stator et/ou au rotor est à prendre en considération dans le réseau de perméances.

Pour cela, un calcul de la longueur réelle du fer par l'utilisation de relations analytiques insérant les effets d'extrémités, l'effet des canaux de ventilations (§II.2.7) entraîne une

modification pour l'évaluation des perméances. Ce point a été détaillé au §II.2.7 et dans la référence [R15] placé en annexe I.1.2.

e) *Validation du prototype virtuel*

Quelques résultats obtenus en régime permanent sont présentés ci-dessous. La méthode utilisée est détaillée en annexe I.1.2.

Caractéristiques à vide :

La figure IV.3 présente la tension à vide obtenue par Turbo-TCM et obtenue expérimentalement (mesures réalisées par Jeumont SA.). L'influence des effets 3D est donnée. L'erreur maximale est de 6,8% et de 0,3% pour le courant nominal.

La difficulté dans ce cas est la prise en compte de la courbe $b(h)$ « réelle » ayant une saturation importante au rotor mais aussi l'effet de magnétisation que l'on retrouve sur la caractéristique à vide réelle.

La figure IV.4 présente la caractéristique obtenue en court-circuit représentant le courant rotorique (I_f) fonction du courant d'induit ou statorique (I_s). Les résultats de simulation donnent de très bons résultats : erreur < à 3.5%. En effet, dans ce cas, il n'y a pas d'effet de saturation.

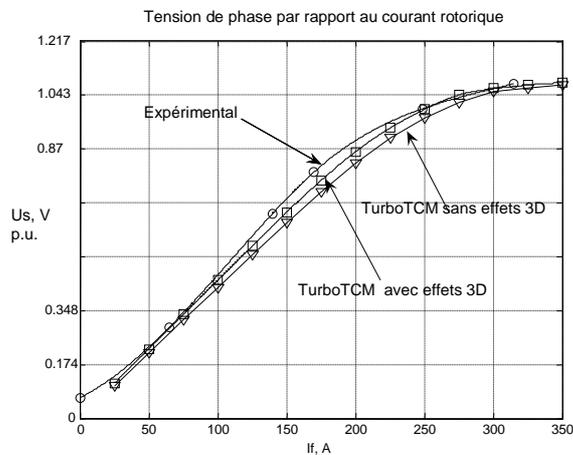


Figure IV.3. Caractéristique à vide

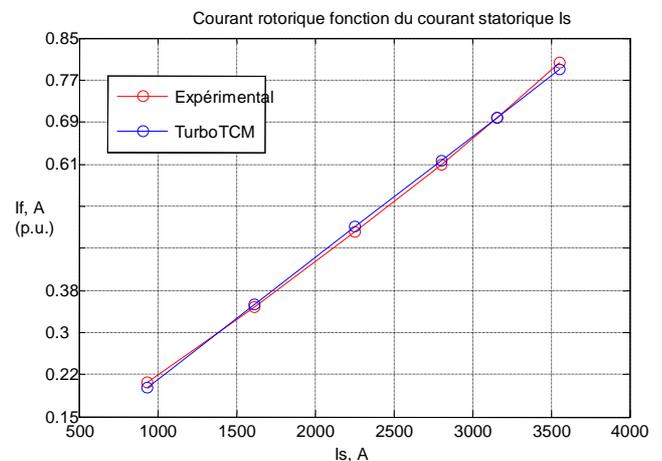


Figure IV.4. Caractéristique en court-circuit.

De nombreux turbos (8 cas) ont été simulés avec une gamme de puissances variables à 2 pôles. Seul un cas a posé problème sur la comparaison de la force électromotrice (f_{em}) liée, du fait de la validation des autres machines, aux caractéristiques $b(h)$ incertaines.

De nombreuses simulations en dynamique (avec prise en compte du mouvement) ont été effectuées. Ce calcul repose sur la détermination de $Pe(\theta)$ présenté précédemment (§II.2.4).

Leur intérêt est de pouvoir effectuer une analyse harmonique afin de vérifier par exemple que la tension de sortie de l'alternateur est parfaitement sinusoïdale ou de minimiser une

harmonique en particulier. Sur la figure suivante, nous présentons l'allure de l'induction fonction de l'espace et des fems (figure IV.5).

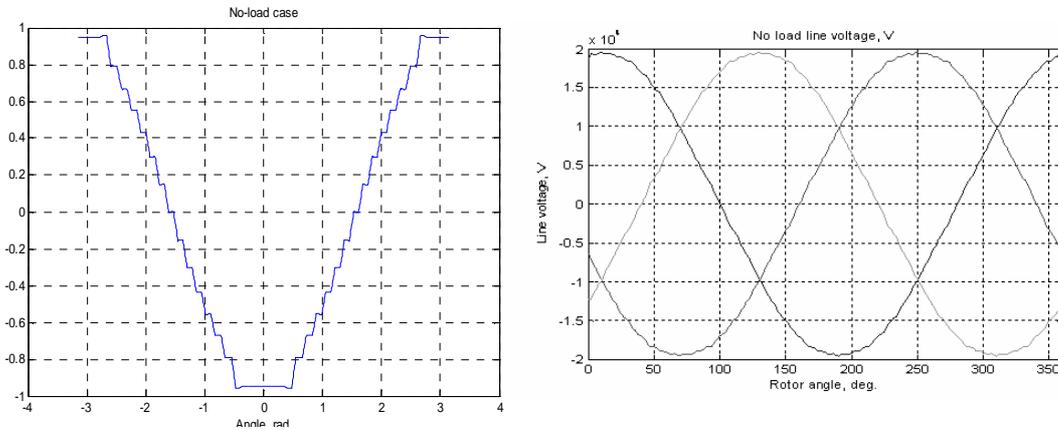


Figure IV.5. Allure de l'induction $B(t, \theta)$ dans l'entrefer (à vide) et des fems.

Le temps de calcul pour une période est de l'ordre de la minute sur un pentium IV-300MHz.

Caractéristiques en charge :

Les figures suivantes (IV.6 et IV.7) présentent les caractéristiques en charge d'un turbo-alternateur du marché industriel. Sur la figure IV.7, la tension de sortie U_s est fournie fonction du courant débité I_s pour 3 valeurs de $\cos \phi$ (PF). Les courbes en V sont données pour une tension de sortie nominale et pour différentes valeurs de puissance (P_s).

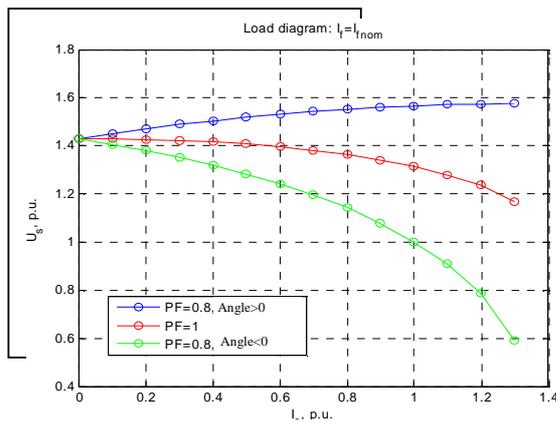


Figure IV.6. Courbes $U(I)$ pour différentes valeurs de PF

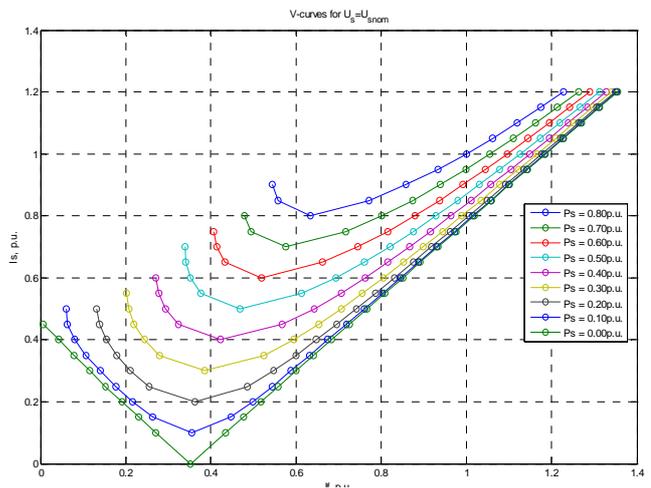


Figure IV.7. Courbes en V pour différentes valeurs de puissance P_s

Comme sur la figure IV.5, l'induction dans l'entrefer dans le cas d'un fonctionnement en charge est présentée sur la figure IV.8.

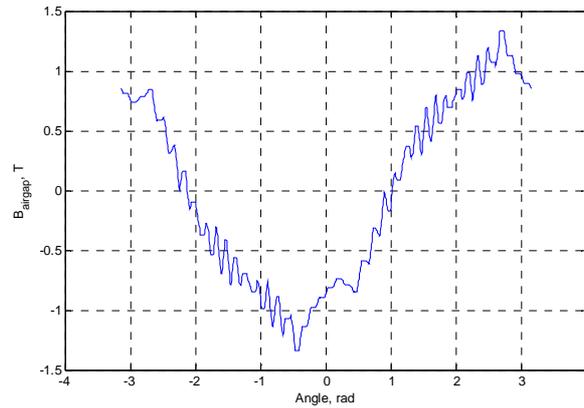


Figure IV.8 Induction dans l'entrefer fonction de l'angle.

De plus, il est aussi possible de déterminer le couple d'origine électromagnétique par l'outil 'TurboTCM':

$$T_{TCM} = \frac{1}{2} \cdot \sum U^T \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial \theta} \cdot U$$

Avec U – différence de potentiel magnétique, Λ - perméances, θ - angle du rotor

A partir des essais, nous disposons uniquement du calcul du couple utile pour le point nominal:

$$T_U = \frac{S \cdot PF}{\Omega}$$

Avec S – la puissance apparente, PF – facteur de puissance, Ω - vitesse de rotation en rad/sec

Dans cette application, n'ayant pas été estimé le couple de pertes, il paraissait difficile de comparer ces deux calculs.

Par contre, cette relation permettant d'estimer le couple électromagnétique a été validée dans le cadre de l'étude sur l'alternateur à griffes en variant la charge.

A présent et pour rejoindre notre développement sur l'utilisation de la technique des plans d'expériences, une étude de sensibilité à partir de surfaces de réponse est donnée liant quelques paramètres de conception à différentes réponses comme les harmoniques de forces électromotrices (fem).

f) *Méthodologie des Surfaces de Réponse appliquée au cas du turbo-alternateur*

⇒ Couplage Turbo-TCM & SOPHEMIS, [C1.1] & [C1.3]

Dans le but d'étudier les variations de différentes grandeurs comme les harmoniques de fems ou le couple fonction des grandeurs géométriques comme le diamètre d'alésage, la longueur de la machine et les dimensions de la dent, un couplage entre les outils « Turbo-TCM » et « Sophemis » a été réalisé.

Notre objectif se limite à une étude de sensibilité autour du point initial correspondant à la structure présentée précédemment. Nous allons agir sur quelques paramètres qui sont :

h_{s1}, b_{s1} : hauteur et largeur d'une dent statorique,

T_{p1} : pas polaire rotorique,

D_{i1} : diamètre intérieur statorique (lier à l'épaisseur de l'entrefer δ).

Rem. : le diamètre extérieur reste constant.

Ci-dessous la table avec les intervalles de variation :

Table IV.1 : Intervalles de variation.

Factors	Lower bound	Upper bound
h_{s1}	$h_{s1} - 10\%$	$h_{s1} + 10\%$
b_{s1}	$b_{s1} - 10\%$	$b_{s1} + 10\%$
D_{i1}	$D_{i1} - 5\%$	$D_{i1} + 5\%$
T_{p1}	$T_{p1} - 10\%$	$T_{p1} + 10\%$

Les réponses choisies sont :

K_{hB3} : l'harmonique 3 d'espace du flux au niveau de l'entrefer à vide,

K_{hE3} : l'harmonique 3 de la force électromotrice statorique à vide,

K_{hE1} : le fondamental de la fem à vide,

I_f : le courant rotorique d'excitation (à vide).

Le plan factoriel choisi est un plan complet à 3 niveaux (plan de RSM) avec 4 facteurs : 81 expériences. Sur les figures suivantes, quelques résultats sont présentés.

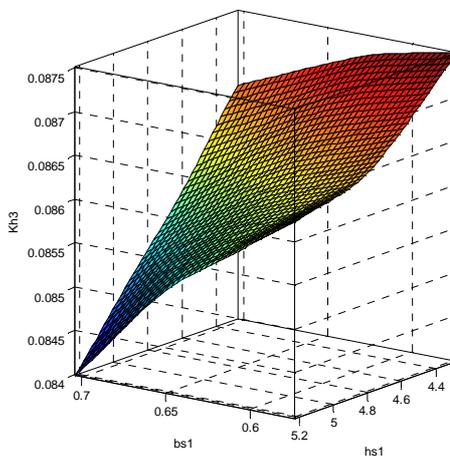


Fig. IV.9. K_{hB3} pour $T_{p1} \min$.

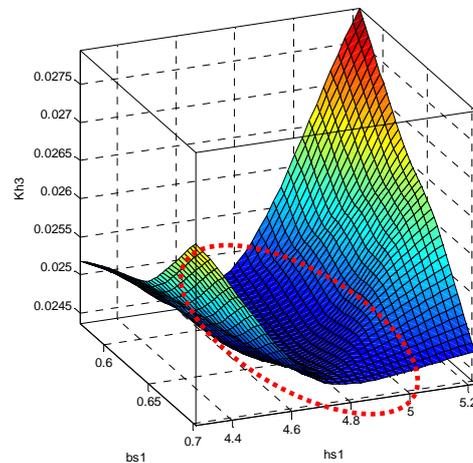


Fig.IV.10. K_{hB3} pour $T_{p1} \max$.

Ces résultats sont obtenus pour un diamètre maximal de : $D_i' = 1.05D_{i1}$, et par conséquent, le maximum pour l'épaisseur de l'entrefer. Nous pouvons observer que si l'on augmente le pas polaire l'amplitude de l'harmonique 3 diminue. Les mêmes tendances sont observées quelle que soit la valeur du diamètre. La figure IV.10 est particulièrement intéressante car elle présente les valeurs minimales du coefficient K_{hB3} . Ces différents résultats ainsi que les suivants sont en p.u. Les dimensions pour b_{s1} et h_{s1} sont divisées par la hauteur de l'entrefer.

Les résultats suivants présentent l'analyse harmonique de la fem. Nous n'avons représenté que l'harmonique 3 et le fondamental. Les figures IV.11 et IV.12 montrent l'influence de la largeur et de la hauteur des dents statoriques pour un diamètre moyen et différents valeurs de pas polaire. La surface "haute" correspond à des valeurs maximales du pas polaire T_{p1} .

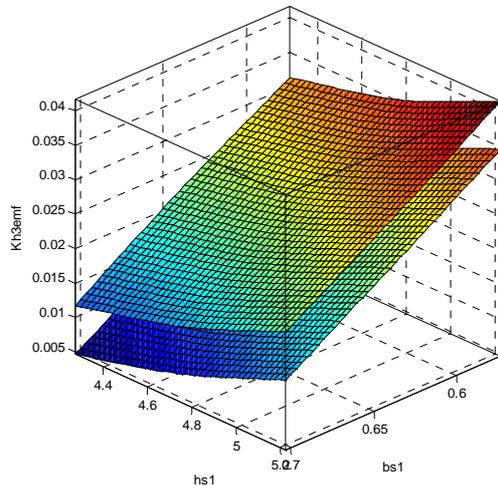


Fig. IV.11. K_{hE3} pour différents T_{p1} .

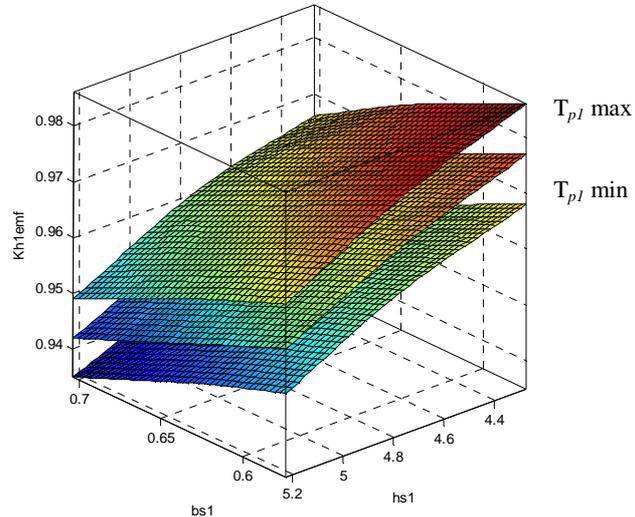
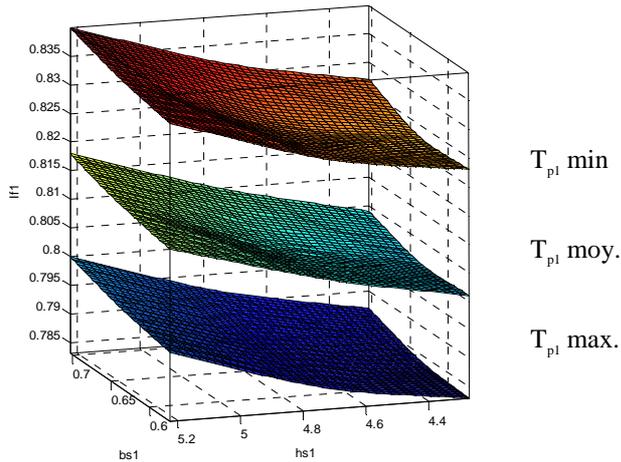
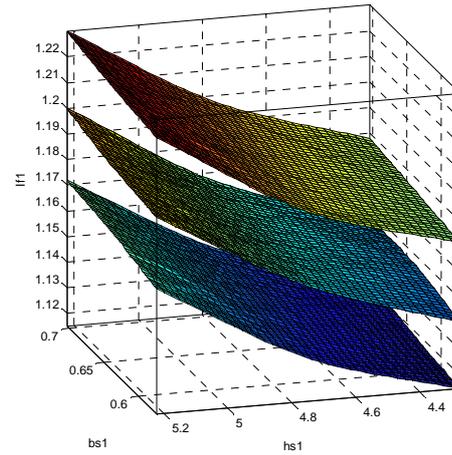


Fig. IV.12. Fondamental de la fem pour différents T_{p1} .

Rem.: Le temps de calcul pour les 81 simulations est de 25 minutes sur un Pentium IV 1.9 GHz. Ce temps de calcul prend en compte *la régénération du réseau de perméances* à chaque modification de paramètres !

Le courant d'excitation I_f a aussi été calculé par rapport aux 4 mêmes paramètres avec seulement deux valeurs extrêmes pour le diamètre. La surface « basse » correspond à une valeur minimale du pas polaire.

Les résultats présentés sur les figures IV.13 & 14 montrent bien évidemment la dépendance entre le courant rotorique et l'épaisseur de l'entrefer. Le pas polaire est inversement proportionnel à la valeur du courant. L'augmentation de la hauteur d'encoche augmente le courant d'excitation car l'épaisseur de culasse diminue (le diamètre extérieur étant constant).

Fig.IV.13. I_f pour une valeur minimale d'entrefer (D_i min)Fig.IV.14. I_f pour D_i max

D'autres résultats sont donnés en charge comme la variation du couple pour un point de fonctionnement nominal (charge nominal). [CI.1]

g) Conclusion sur le cas du turbo-alternateur

Dans ce travail, un modèle de turbo-alternateurs a été présenté, basé sur la méthode de contour de dents. L'outil 'TurboTCM' développé sous Matlab permet de générer de façon automatique le réseau de perméances. Des simulations ont été comparées aux résultats expérimentaux et ont montré la bonne correspondance des résultats. Puis, certaines caractéristiques de sortie sont données montrant les possibilités de l'outil.

En réalisant un bon compromis entre le temps de calcul et la précision, nous pouvons envisager le couplage avec des outils d'optimisation. Dans un premier temps, une étude de sensibilité est fournie sachant que celle-ci peut être étendue à n facteurs influents.

Les perspectives sont nombreuses sur l'application d'un tel outil. Il nous reste à valider celui-ci sur ' n ' turbo-alternateurs avec un nombre de pôles différents, débuté par un stage ingénieur en 2005 [Projet T.E.R. - E3].

Le couplage de l'outil Turbo-TCM avec la méthode des plans d'expériences permet d'envisager une conception optimale de la structure.

Cas d'une machine asynchrone appliquée à la traction ferroviaire

(Utilisation de la perméance globale + couplage vibro-acoustique)

⇒ **Résumé en Annexe + articles**

PARTIE III

Synthèse et Perspectives

SOMMAIRE (partie III)

I. Bilan de mes activités de recherche	- 123 -
II. Perspectives ‘court terme’	- 126 -
II.1. Modélisation multi-physiques	- 126 -
II.1.1. Aspect ‘aéro-thermique’	- 126 -
II.1.2. Aspect ‘acoustique & vibratoire’	- 128 -
II.1.3. Aspect ‘modélisation par réseau de perméances (RdP)’	- 129 -
II.2. Optimisation par plans d’expériences.....	- 130 -
III. Conclusion sur le bilan et les perspectives court terme	- 132 -
IV. Perspectives à long terme :	- 133 -

I. Bilan de mes activités de recherche

Dans cette partie, il s'agit de tirer un bilan des réalisations et études effectuées et d'en dégager les lignes directrices. Tout d'abord, la figure suivante permet de visualiser mes principales activités dans le domaine de la conception optimale.

Point de vue 'Méthodologie' :

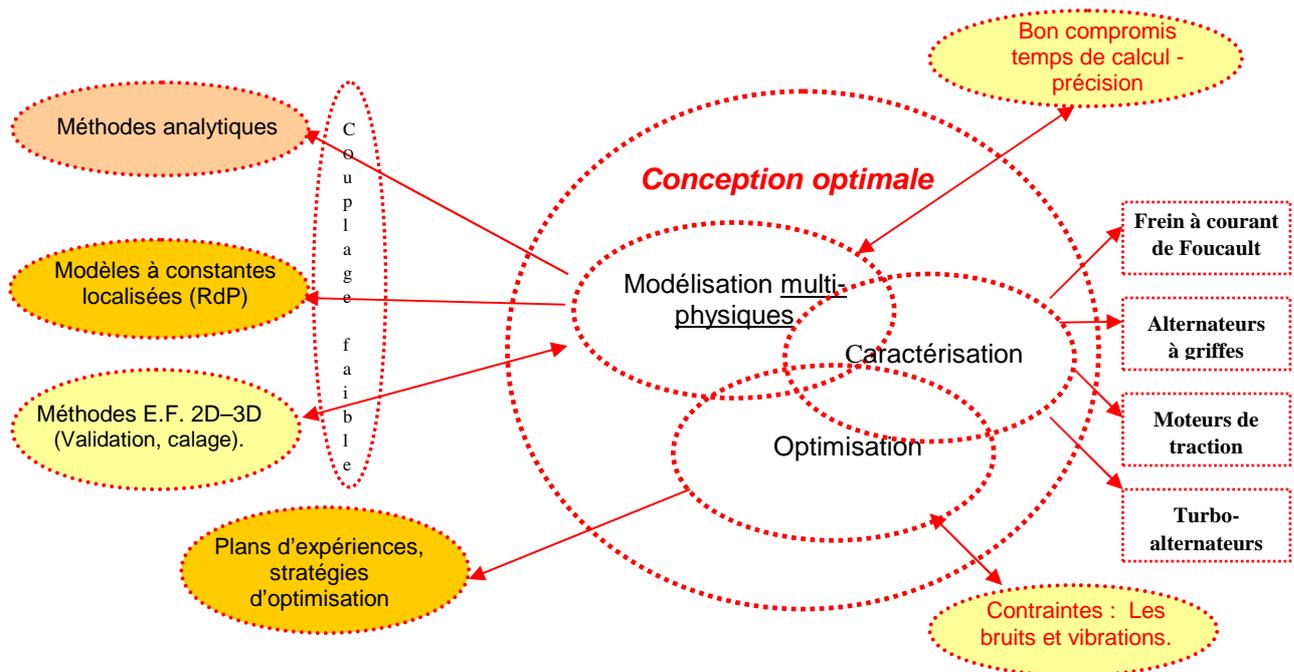


Figure III.1 : Synthèse des différentes activités

En ce qui concerne les activités de 'modélisation et optimisation', mes apports ont concerné :

- l'approche « réseau de perméances » avec l'étude de différentes possibilités de calcul de la loi d'évolution de la perméance d'entrefer. Cette orientation est liée au fait que l'approche apporte un bon compromis temps de calcul-précision permettant d'envisager une optimisation.
- le couplage multi-physiques permettant de prédéterminer par exemple le bruit d'origine électromagnétique. Nos modèles intègrent différents phénomènes physiques comme la vibro-acoustique liée à la mécanique, la thermique, mais aussi plus simplement, l'électronique associée. Pour cela, des méthodes analytiques connues ont été appliquées et validées par de nombreuses mesures expérimentales (cas par exemple de la validation du modèle analytique vibratoire permettant d'obtenir les fréquences de résonnances de la structure).
- enfin les plans d'expériences ainsi que les stratégies d'optimisation que l'on retrouve sur les différentes études présentées précédemment. Dans ces exemples, une contrainte importante concerne les bruits et vibrations.

En ce qui concerne l'utilisation de la méthode des éléments finis, la plupart du temps, elle est utilisée comme méthode de référence, et permet de valider nos modèles simplifiés qu'ils

soient mécaniques ou électromagnétiques dans le cas où les mesures expérimentales sont difficiles.

Dans certains cas, la modélisation éléments finis est absolument nécessaire et fournit directement le prototype virtuel comme dans l'exemple du frein linéaire à courant de Foucault.

Moyens expérimentaux et développement d'outils adaptés :

Afin de valider nos développements et améliorer nos modèles, des moyens de mesure et logiciels ont été acquis et maîtrisés:

- logiciels éléments finis (Opera 2D et 3D pour les études magnétostatiques et magnétodynamiques, Flux-2D LS pour l'étude des pertes fer, ANSYS pour l'étude du couplage vibro-acoustique)
- Outils de mesures électrique et vibro-acoustique (accéléromètres, micros, marteaux de choc...)
- Outil PULSE de chez Bruel&Kjaer : pour l'analyse modale expérimentale et l'analyse modale opérationnelle.

De plus, afin de répondre à nos besoins, des logiciels propriétaires ont été développés. Ces simulateurs dédiés couplés à des outils permettant une optimisation ou un calcul spécifique sont gérés par un « coordinateur » : MATLAB. L'avantage est de pouvoir disposer de nombreuses 'toolboxes' prédéfinies, que ce soit pour le calcul scientifique, pour la visualisation des résultats mais aussi pour l'optimisation car de nombreux algorithmes y sont proposés comme les algorithmes stochastiques ou les méthodes directes.

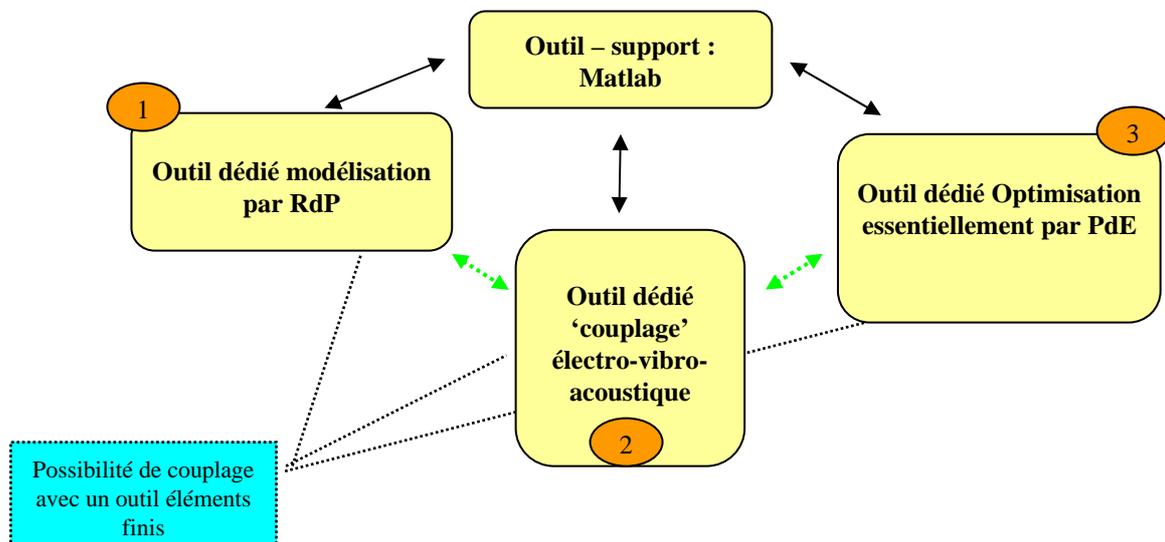


Figure III.2. Développement d'outils sous Matlab

Quelques outils typiques ont été détaillés précédemment :

- outil de modélisation par Réseau de Perméances 'RdP' des turboalternateurs : TURBO-TCM (outil développé par Mr D. Petrichenko) (1)

- outil de prédimensionnement vibro-acoustique des machines de traction : DIVA (outil développé par Mr A. Ait-Hammouda) (2).
L'outil DIVA est en cours d'amélioration avec la prise en compte du convertisseur et différentes stratégies de MLI [Th.5]. La prise en compte de machines synchrones à aimants [Th.3] est aussi en cours de validation.
- outil d'optimisation par plans d'expériences (SOPHEMIS) (3) développé lors de la thèse de S. Vivier qui est couplé à différents outils comme des outils E.F. ou Excel, mais aussi DIVA et TURBO-TCM permettant d'atteindre pleinement notre objectif de conception optimale. En effet, la maîtrise de ces deux activités : 'modélisation et optimisation', et leur combinaison permettent d'envisager la conception optimale de machines.

En ce qui concerne le développement de prototypes, les réalisations suivantes ont été marquantes:

- pour l'étude de l'alternateur à griffes, Valéo a réalisé différents types de rotors avec différentes formes de griffes afin d'étudier leurs effets sur le niveau acoustique. Pour effectuer le test de ces différents rotors, un banc particulier a été développé et réalisé par la société Moteurs FOX) [CR.2];
Ce plan d'expériences matériel a permis de confirmer les conclusions du plan numérique (présenté en annexe I.1).
- pour l'étude sur la traction ferroviaire, des modifications 'concrètes' sur les rotors de machines ont été préconisées et réalisées ainsi que le pas de bobinage. Elles ont permis de réduire le bruit d'origine électromagnétique.
Nous avons testé de nombreuses machines et proposé des solutions capables de réduire le bruit. Deux réalisations ont été effectuées sur deux gammes de machines différentes. Elles valident nos travaux (présenté en annexe I.2).
- en ce qui concerne l'étude sur les turbo-alternateurs, un prototype de puissance réduite (3kW) a été réalisé par la société 'Moteurs FOX' financé par Jeumont-SA (Framatome) de façon à valider la démarche sur une machine de faible puissance. Le rotor de celle-ci est identique à celui d'un turbo : formes des encoches et bobinage. Les mesures ont permis de valider notre modèle.
Enfin, l'outil a montré son efficacité sur une dizaine de turbos où les caractéristiques prédites ont été comparées aux caractéristiques réelles avec succès.

En ce qui concerne les mesures expérimentales, la plupart ont été réalisées chez nos partenaires. Par contre, pour l'étude vibro-acoustique, de nombreux tests ont été effectués au laboratoire par l'intermédiaire de DEA, stagiaires et thésards. Ils ont porté sur :

- le calage et l'amélioration de modèles vibro-acoustiques,
- l'exploitation de l'outil PULSE (analyse modale expérimentale et création de nouveaux projets concernant la mesure vibro-acoustique),

Ces différentes études ont été effectuées en collaboration avec M. GOUEYGOU, Maître de Conférences de l'IEMN dépt. électronique et vibro-acoustique, sur une dizaine d'années. Cette collaboration fut essentielle pour le développement et la pérennité de ces travaux.

En fait, tous ces développements ont été à l'origine de nombreux liens. Ces relations sont durables et déterminantes pour mes perspectives de recherches à court terme comme nous allons le voir.

Les liens établis avec d'autres *laboratoires nationaux ou internationaux* sont aussi importants et concernent naturellement la conception optimale de machines électriques avec comme contraintes le niveau acoustique mais aussi la température.

Mes perspectives à court terme sur la conception optimale sont développées en trois points :

- le développement de modèles multi-physiques et le couplage,
- l'optimisation par plans d'expériences et le développement de modèles adaptés,
- le développement d'outils adaptés.

II] Perspectives à 'court terme'

II.1. Modélisation multi-physiques

Il s'agit d'une part de comprendre les couplages entre les différents phénomènes physiques et d'autre part de développer et améliorer les modèles multi-physiques appropriés.

II.1.1. Aspect 'aéro-thermique'

1 thèse en cours (M^{elle} Aurélie Fasquelle) [Th.7], 1 projet TER, 1 CDD de 2 ans à partir d'Oct. 2006.

Lien avec le *LME de Valenciennes* : Pr S. Harmand

⇒ co-encadrement de la thèse d'Aurélie Fasquelle.

Lien avec *l'Ecole HEI de Lille* : A. Ansel (enseignant-chercheur à 50% équipe COME)

Contrat : [CR.9] avec *Alstom-Transport*.

La thèse d'Amine Ait-Hammouda [Th 2] a été le point de départ avec le développement de modèles couplés de type électro-vibro-acoustique. L'objectif de la thèse d'A. Fasquelle est d'enrichir le modèle avec la partie aéro-thermique.

Il s'agit de développer un modèle multi-physiques couplé, électro-vibro-acoustique et thermique, adapté aux objectifs de conception et repris dans un superviseur d'optimisation. La démarche est représentée sur la figure suivante :

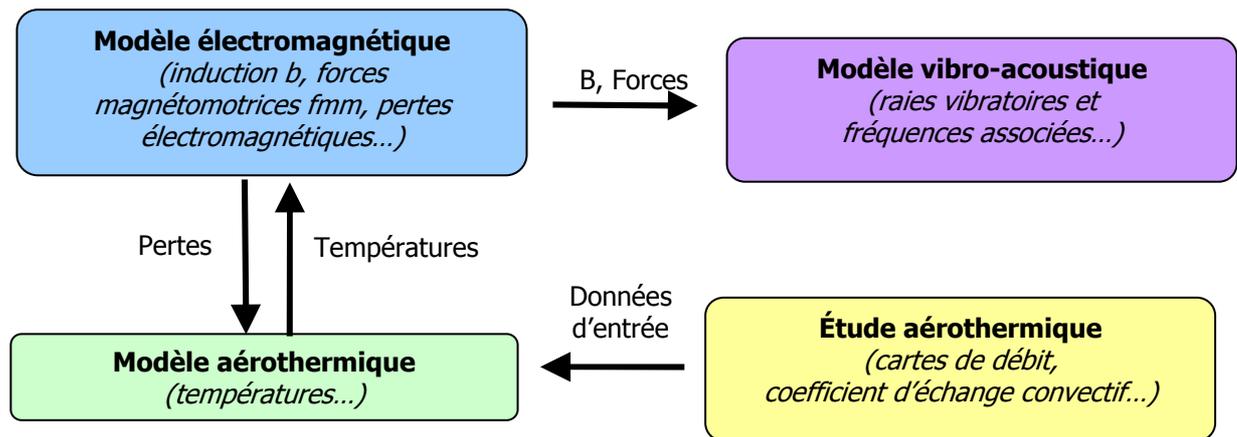
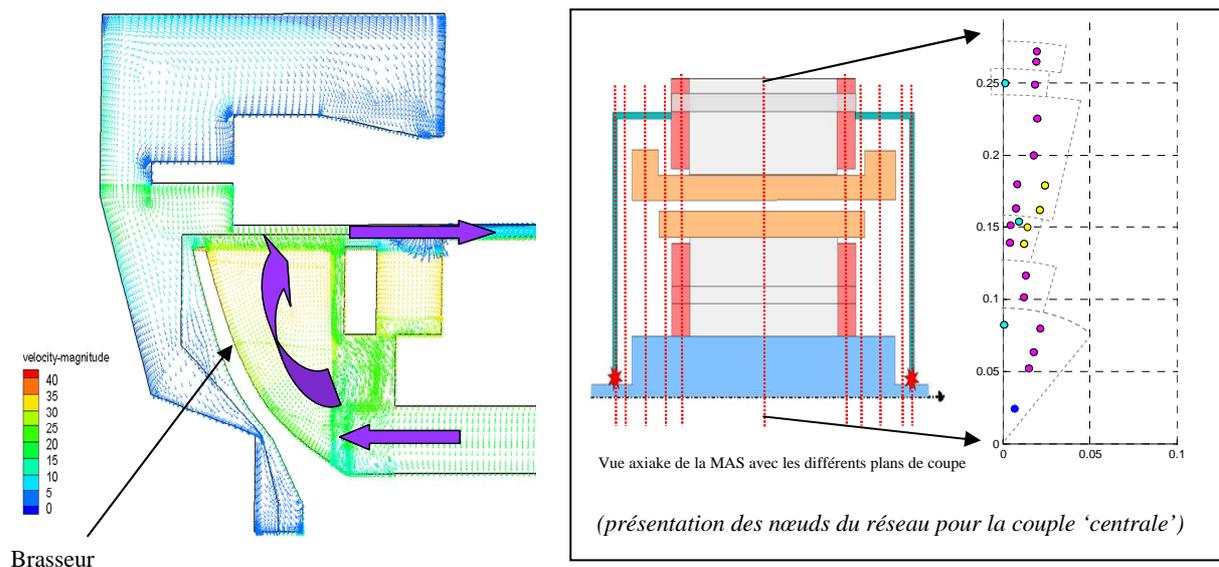


Figure III.3 : Etude aéro-thermique et électro-vibro-acoustique.

Ces travaux, orientés en premier lieu sur l'aérodynamique des machines, sont indispensables à la compréhension des effets des brasseurs et à la vérification de leur efficacité. L'étude est réalisée sous Fluent, code éléments finis tridimensionnel (figure III.4.a). Elle permet de déduire les coefficients d'échanges convectifs pour les calculs thermiques. Un réseau nodal (figure III.4.b) est ensuite construit. Il est paramétré pour permettre l'optimisation géométrique et l'optimisation de la structure.



III.4.a Etude aérodynamique sous FLUENT (carte de débit)

III.4.b Réseau nodal équivalent à la MAS

Figure III.4 : Etude aéro-thermique correspondant à une MAS de tracteur.

Plusieurs pistes d'améliorations structurelles se sont dégagées afin d'améliorer la répartition de l'air. En ce qui concerne le modèle thermique, le maillage est généré automatiquement en fonction des caractéristiques géométriques. Ce modèle actuel comporte environ 120 nœuds.

En parallèle, des travaux concernant la détermination des pertes Joule et fer ont été réalisés par A. Ansel et S. Brisset. Pour l'étude des pertes fer, nous nous sommes appuyés sur le module Loss Surfaces de Flux2D mais aussi sur des mesures expérimentales réalisées par Alstom qui ont débouché sur la mise au point d'un modèle fiable [CI.6].

En fin de thèse, ces travaux doivent déboucher sur l'optimisation vibro-acoustique, thermique et aéraulique des machines de traction ferroviaire utilisées à vitesse variable, ces machines étant auto-ventilées. Dans ce travail, on retrouve donc la thématique de conception multi-physique de machines électriques, ainsi que l'optimisation multi-objectif dans le contexte de la conception en électrotechnique avec comme contrainte le bruit et le niveau de température.

II.1.2. Aspect 'Acoustique & Vibratoire'

1 thèse soutenue (Ait-Hammouda Amine) [Th.2] et 2 en cours (S. Bujacz) [Th.4], (J. Le Besnerais) [Th.5], 3 DEA, 2 CDD sur 1 an et 7 mois, nombreux stagiaires IUT (mesures sous Pulse), 1 professeur agrégé (O. Barré : projet Prosodie [CR.11]);

Lien avec l'IEMN : M.Goueygou

Lien avec le T.U.G. (Gdansk en Pologne) : Pr Janusz Nienanski

⇒ thèse en cotutelle de S. Bujacz [Th.4]

Lien avec l'UTC de Compiègne : V. Lafranchi et le Pr. G. Friedrich du laboratoire L.E.C

⇒ co-encadrement de la thèse de J. Le Besnerais depuis décembre 2005 [Th.5]

Contrats en relation avec cette partie : [CR.11] avec Alstom-Transport, [CR.2] avec Valéo Alternateur.

Après mes travaux sur l'alternateur à griffes et ceux d'O. Barré sur le calcul de forces [R.16], puis ceux d'A. Ait-Hammouda sur la prédétermination du niveau acoustique, j'ai acquis un savoir faire dans le domaine vibro-acoustique. En effet, il faut dans un premier temps être capable de prédéterminer les efforts qui agissent sur la structure, essentiellement sur le stator de la machine, pour connaître le niveau vibratoire ainsi que le bruit. Cependant, le couplage électro-vibro-acoustique n'est pas évident et il est nécessaire de procéder à de nombreuses mesures afin de valider les hypothèses faites. Des acquisitions de matériels de mesure et de logiciels Bruel&Kjear nous ont ainsi permis d'effectuer de nombreux tests et d'acquérir une certaine expertise dans ce domaine.

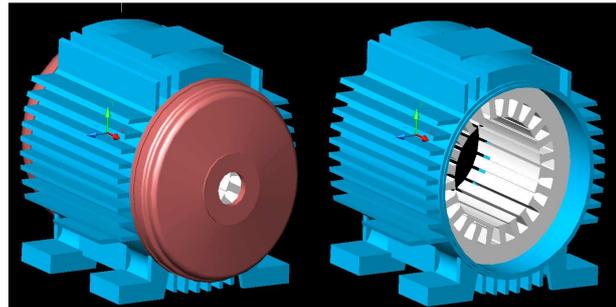
Ainsi, sur ces deux thèses en cours, nos perspectives sont les suivantes :

- poursuivre nos activités sur la réduction du bruit d'origine électromagnétique ;
- renforcer nos modèles analytiques vibro-acoustiques (travaux en commun avec VIBRATEC) afin d'obtenir une meilleure précision sur l'estimation des fréquences de résonances mais surtout sur le niveau acoustique (Exploitation de l'outil pulse et de l'analyse modèle opérationnelle) ;
- renforcer le lien avec des outils de CAO comme Autocad (thèse de S. Bujacz) ;
- améliorer l'outil DIVA : prise en compte des harmoniques d'espace rotorique, prise en compte de convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions avec la possibilité de changer de stratégies; l'application restant la traction ferroviaire (Thèse de J. Le Besnerais);
- optimisation globale énergétique et vibro-acoustique de machines électriques pour les différentes machines à aimants étudiées par S. Bujacz ou les machines asynchrones de traction ferroviaire étudiées par J. Le Besnerais.

La thèse de S. Bujacz s'est en effet orientée sur des machines à aimants montés en surface ou enterrés, celles-ci étant de plus en plus utilisées même pour la traction ferroviaire. Notre objectif est d'optimiser la structure en insérant des contraintes vibro-acoustiques. Pour cela, différents rotors ont été testés avec un effet de vrillage : aimants montés sur des galettes avec possibilités de réglage (figure de gauche ci-dessous) [CI.4]. Des améliorations sur les modèles vibratoires sont en cours et le couplage avec un outil de CAO (Autocad) a été réalisé. L'intérêt de ce dernier est de pouvoir enrichir facilement la structure étudiée ; les flasques par exemple (figure de droite ci-dessous) ou les détails géométriques de la carcasse en vue d'une étude des fréquences de résonances sous ANSYS.



Aimants montés sur des galettes
(possibilité de vrillage)



Vue sous AUTOCAD (stator + culasse + flasque)

Figure III.5 : Vue d'un rotor à aimants de MS et de son stator sous Autocad.

En ce qui concerne la thèse de J. Le Besnerais, elle prolonge la thèse d'A. Ait-Hammouda avec pour objectif d'élargir l'optimisation sous contrainte du bruit d'origine électromagnétique à une chaîne de traction ferroviaire complète : de la caténaire à la roue. Il faut pour cela associer les convertisseurs, le transformateur et le réducteur. Une prédétermination effort-vitesse est nécessaire afin de respecter le compromis couple – bruit. Cette thèse est en relation avec le projet PROSODIE [CR.11] et a débuté en décembre 2005.

On voit que l'objectif commun de ces travaux est une optimisation globale de la machine électrique avec comme contraintes la température et le niveau acoustique, intégrant ainsi des aspects environnementaux.

La base de ces modèles multi-physiques demeure le modèle électromagnétique qui simule le fonctionnement de la machine quelles que soient les conditions. L'utilisation de l'approche « Réseaux de Perméances » remplit ces conditions et assure le bon compromis temps de calcul – précision.

II.1.3. Aspect 'Modélisation par Réseau de Perméances (RdP)'

1 thèse en cours [Th.3], (thèse soutenue de M. Hecquet, 6 DEA, 1 projet Ingénieur chez Bosch, 1 CDD 2 ans (Futurelec3.op1)

Lien avec le MPEI de Moscou : Pr V. Kuznetsov

⇒ co-encadrement de la thèse de Dmitry Petrichenko.

En ce qui concerne le bilan, nous avons détaillé dans la partie II l'utilisation du RdP et son intérêt sur plusieurs applications (partie II et annexe).

Nos perspectives sur le sujet sont les suivantes :

- a) élargir la gamme d'applications et surtout être capable d'augmenter les capacités de notre outil de s'adapter à tout type de machines. Pour cela, il existe déjà sous 'Turbo-TCM' une procédure permettant de prendre en considération n'importe quel type de géométrie. Il reste à présent à l'appliquer et à résoudre les difficultés qui ne manqueront pas de surgir.
- b) en ce qui concerne les machines asynchrones, coupler le RdP avec un réseau nodal thermique : ce travail est l'objet d'un CDD projet « Futurelec3-op1BIS » qui vient de débuter (Oct. 2006). En effet, les travaux sur le couplage multi-physique sont basés sur un modèle magnétique linéaire qui ne fait intervenir que l'onde de perméance d'entrefer. Il semble plus réaliste de le remplacer par un modèle réseau de perméances de la machine asynchrone, ce qui permettrait d'éviter de nombreuses hypothèses restrictives.
- c) Améliorer la détermination des perméances de fuites ainsi que la perméance d'entrefer. De nombreuses méthodes de détermination des perméances d'entrefer ont déjà été testées. Il reste à les comparer sur tout type de machines à partir d'un outil unique. Pour cela, un travail important est nécessaire sur l'outil pour qu'il soit totalement générique.

II.2. Optimisation par plans d'expériences

L'optimisation par plans d'expériences reste une activité qu'il faut intensifier.

1 thèse soutenue (S. Vivier) [Th.1], 3 DEA + 1 projet Ingénieur.

⇒ lien avec la thèse de D. Petrichenko;

⇒ lien avec les thèses de S. Bujacz & J Le Besnerais & d'A. Fasquelle ;

⇒ lien avec la thèse de *F. Moussouni (programme FUTURELEC3-op2)* [CR.10]

(résumé du programme en annexe 3)

Nous pouvons souligner l'intérêt d'avoir développé un superviseur d'optimisation par plans d'expériences 'SOPHEMIS' [Th 1] qui est utilisé à l'heure actuelle et le sera pour nos travaux futurs. En effet, notre politique est de développer des outils logiciels compatibles et communicants, de façon à capitaliser et à fédérer les connaissances acquises.

Les optimisations qui ont été faites sont différentes :

- En ce qui concerne la thèse de Mr Petrichenko, seule la partie 'Surface de Réponses' a été exploitée pour le moment [CI.1], [CI.3]. Elle fournit en fonction de quelques facteurs des modèles équivalents, polynomiaux, pour l'allure du couple, l'évolution de l'harmonique 3 de la fem, etc.... Ceci permet d'utiliser ces modèles comme objectif ou contrainte dans une démarche d'optimisation.

- Pour les 3 thèses concernant la modélisation ‘multi-physiques’, la méthode a été utilisée afin de sélectionner les facteurs influents de la réponse choisie et d’identifier le domaine d’étude.

Nos objectifs d’optimisation vont s’élargir avec, comme réponse possible, le bruit magnétique, la température, mais aussi le rendement, le coût des matériaux et la masse ; ce qui impose une optimisation multi-objectifs.

Pour cela, une piste possible est d’associer les surfaces de réponse à un algorithme génétique multi-objectif de façon à identifier le front de Pareto [Reg-03] [Liu-03] en laissant à l’utilisateur le choix du compromis. Un exemple de représentation est donné ci-dessous sous la forme d’un front de Pareto à trois objectifs (Thèse de J. Le Besnerais) [Th.5]:

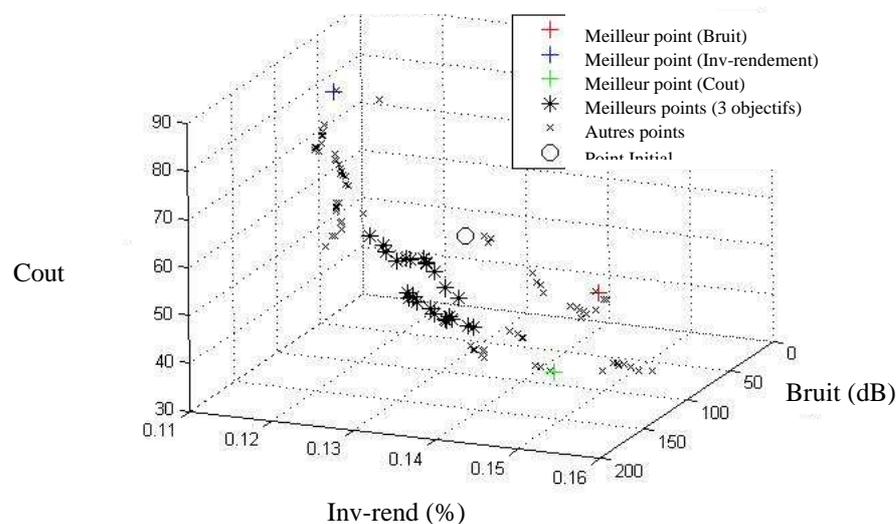


Figure III.6 : front de Pareto 3D avec 100 individus

(bruit, coût, rendement)

L’un des objectifs de la thèse de F. Moussouni encadrée par S. Brisset qui fait partie du projet commun ‘Futurelec3-op2’ est d’insérer des plans ‘treillis’ pour le criblage global dans une boîte à outils Matlab.

Il nous faudra aussi étendre l’utilisation des plans d’expériences à un très grand nombre de facteurs (une centaine) afin de répondre au cas de l’optimisation globale et multi-objectifs d’une chaîne de traction : Thèse de S. Kreawan encadrée par F. Gillon [CR.10].

(En annexe : une page résumée sur le programme ‘Futurelec3- op1 et op2’)

III. Conclusion sur le bilan et les perspectives court terme

Les différents projets présentés concernent la conception multi-physiques, l'optimisation multi-objectifs ainsi que le développement d'outils appropriés. Tous ces projets sont naturellement couplés et répondent à un besoin important en *recherche technologique* comme l'ont montré les différents exemples traités en collaboration avec des partenaires industriels, essentiellement dans le domaine du transport automobile et ferroviaire.

Un de nos *objectifs* au cours de ces 10 dernières années de recherche a été de trouver des solutions de représentations des machines électriques de façon à éviter la réalisation d'un prototype. L'approche par *réseaux de perméances*, offrant un bon compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul, a été privilégiée. Ainsi, à chacun des systèmes réels étudiés s'est vu correspondre un équivalent virtuel infiniment plus avantageux. Celui-ci peut être modifié à volonté, au gré de l'expérimentateur. Cette démarche est typiquement appliquée lors d'optimisations pendant lesquelles les caractéristiques des modèles sont modifiées afin d'améliorer certaines performances. En ce qui concerne l'optimisation, l'approche des plans d'expériences a été privilégiée.

Dans ces développements, nous nous sommes efforcés d'assurer une bonne adéquation entre le modèle et la méthode d'optimisation choisie. Enfin, la confrontation avec l'expérience assistée par nos partenaires a permis de valider nos approches.

En conclusion, ces différentes études ont contribué et contribueront aux améliorations technologiques par :

- une réduction des coûts et des nuisances comme le bruit et les vibrations,
- un maintien de la température à un niveau acceptable,
- un accroissement de l'efficacité énergétique,
- une réduction des encombrements et des masses.

Au niveau scientifique, nos apports ont contribué à la production de méthodologies adaptées à la conception de systèmes complexes.

A court terme, nos perspectives se portent sur :

- la modélisation multi-physiques de composants,
- l'optimisation multi-objectifs des composants électrotechniques.

IV. Perspectives à long terme :

On peut revenir sur l'une des questions posées au début de ce mémoire : en quoi un dispositif électrotechnique est-il optimal ? Avons-nous répondu à cette question ?

En effet, de nombreux phénomènes physiques, la fiabilité, les aspects économiques normatifs ou environnementaux restent à prendre en considération.

Aussi, notre objectif sera d'étendre le champ d'application de la modélisation et de l'optimisation, notamment en intégrant des phénomènes physiques qui restent à l'heure actuelle relativement complexe comme les courants de Foucault ou la fiabilité. Les couplages physiques et disciplinaires apportent une réponse à la modélisation de dispositifs électrotechniques complexes. Par exemple, l'utilisation d'un code éléments finis peut fournir l'induction en fonction du temps et de l'espace dans l'entrefer. Ces valeurs peuvent ensuite être injectées dans un modèle vibro-acoustique, de même pour les aspects thermiques. Bien entendu, les progrès de l'informatique permettront de diminuer les temps de calculs.

La figure ci-dessous, reprise de la figure III.1, synthétise quelques perspectives sur la modélisation et l'optimisation.

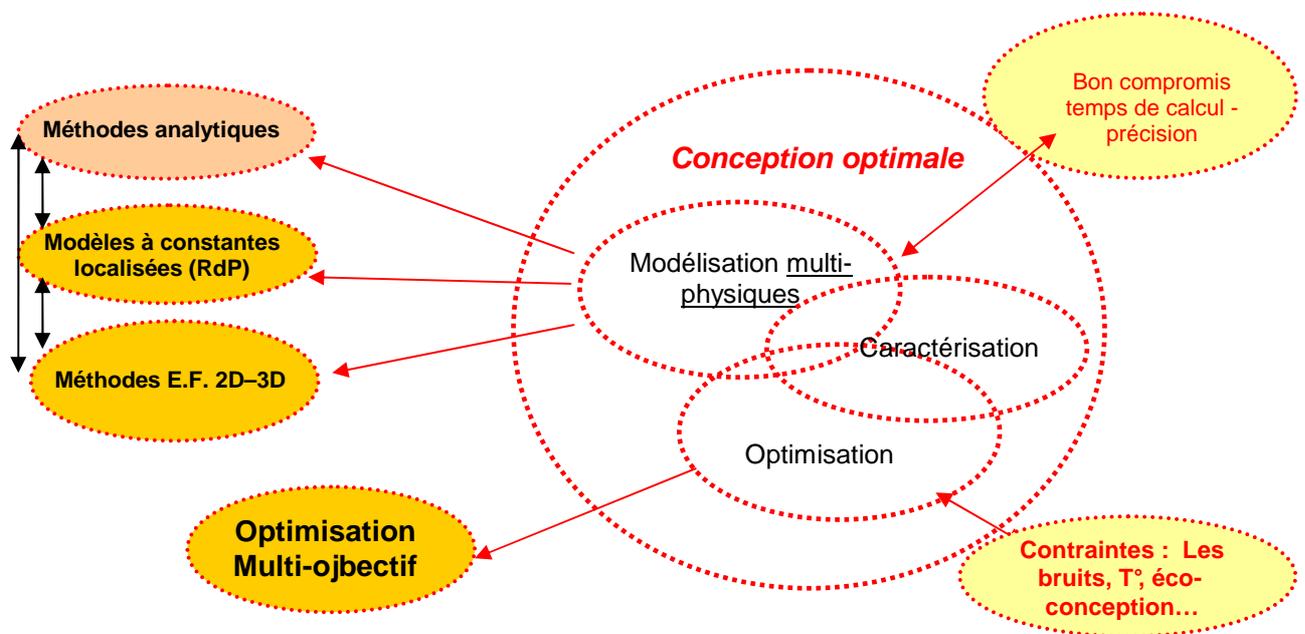


Figure III.7 : Synthèse des différentes activités

'Modélisation' : du modèle multi-physiques au modèle multi-disciplinaires

Non seulement, il est nécessaire de prendre en compte la plupart des phénomènes physiques qui interagissent au sein des dispositifs mais il est également nécessaire de prendre en compte d'autres aspects que l'on peut qualifier de disciplinaires :

- la commande,
- l'impact environnemental,
- la trace écologique,
- le coût du cycle de vie,

L'environnement technique des dispositifs est également à prendre en compte. Le composant électrotechnique interagit avec d'autres composants dans l'ensemble plus vaste qu'ils constituent. Cette interaction est évidente si l'on considère les masses ou les taux de défaillance. Elle est également essentielle en terme d'optimalité : A quoi bon optimiser un composant si des gains plus conséquents peuvent s'obtenir ailleurs plus facilement ?

Il sera donc nécessaire d'avoir une approche système. Pour cela, il faut être capable d'intégrer les couplages, d'avoir des modèles de granularités différents adaptés aux niveaux considérés.

On peut déjà voir une ébauche de solutions dans certaines méthodes d'optimisation comme le 'space-mapping', qui utilisent deux modèles de précision différents.

'Optimisation multi-objectifs' :

Aux vues des perspectives apportées aux modèles, l'optimisation multi-objectifs paraît indispensable. Pour cela, l'hybridation de techniques paraît prometteuse.

On pourrait ainsi envisager l'optimisation complète d'une chaîne de traction ferroviaire avec les aspects coût, environnement, efficacité énergétique en ayant au préalable une solution de représentation validée sur une large plage de fonctionnement.

La démarche d'optimisation pourrait être la suivante :

- L'utilisation du criblage multi-zones de façon à traiter un grand nombre de paramètres (plusieurs centaines) en renforçant, pour cela, le calcul réparti sur plusieurs ordinateurs afin de réduire le temps de calcul total.
Cette étude fournirait les facteurs influents et les modèles des fonctions 'objectif'.
- L'association à la technique des plans d'expériences, d'une technique d'optimisation multi-objectifs comme les algorithmes génétiques afin d'établir des surfaces de compromis, figure III.6 : compromis (bruit-coût-rendement).
Les 4 axes seraient par exemple dans le cas d'une chaîne de traction :
 - L'énergie consommée,
 - Le niveau acoustique globale 'aéroulque et magnétique',
 - La trace environnementale,
 - La compatibilité électromagnétique.

Conclusion finale :

Le plus important dans les années à venir sera pour nous de contribuer à l'optimisation de systèmes à base d'électrotechniques avec très certainement de fortes et inévitables contraintes économiques et environnementales.

Mes activités actuelles m'orientent naturellement vers les applications « Transport ». La région Nord-Pas-de-Calais vient d'obtenir un pôle de compétitivité I-Trans dans le ferroviaire qui pour le moment est orienté 'sûreté de fonctionnement – fiabilité - mécanique'.

Il nous appartient donc de proposer des sujets innovants appliqués au ferroviaire dans le domaine génie électrique.

Références

Quatre parties sont distinguées :

a) *Modélisations analytiques multi-physiques / éléments finis / Optimisation / conception optimale*

- [Bie-98] JM. Biedinger, JP. Vilain, 'Design of low-voltage variable-frequency electrical motors. I. Analysis of the magnetic-thermal-electric coupled problem' *European Physical Journal Applied Physics*, 3, pp 101-118, 1998.
- [Bie-99] JM. Biedinger, JP. Vilain, 'Dimensionnement des actionneurs électriques alimentés à fréquence variable sous faible tension', *European Physical Journal AP* 7, 247-261, 1999.
- [Bri-94] S. Brisset, P. Brochet, "Numerical simulation of the transients of a switched reluctance motor using an electronic-magnetic-mechanical coupled finite element model", *ICEM 94*, Paris, Proceeding Vol.2, Sept. 94, pp 402-407.
- [Bri-03] S. Brisset, C. Espanet, P. Brochet, 'Modèle de pré-dimensionnement d'un moteur à courant continu, aimant permanent, commutation électronique et bobinage concentré', *EF'2003*, GDR M2EMS – GT4, Supelec, Déc. 2003
- [Clé-01] S. Clénet, 'Contribution à la modélisation numérique en électromagnétisme statique', *Habilitation à Diriger des Recherches*, USTL –L2EP, 2003.
- [Dre-94] T. Dreher, 'Couplage de la méthode des éléments finis tridimensionnels avec une méthode d'analyse du circuit électrique : application à la modélisation des machines électriques tournantes', *Thèse de doctorat*, INP Grenoble, Oct. 1994.
- [Hen-92] G. Henneberger, R. Block, 'Numerical Calculation and simulation of a claw-pole alternator', *ICEM'92*, Paris, pp 127-131.
- [Hen-97] G. Henneberger, S. Kuppers, 'Numerical procedures for the calculation and design of automotive alternators', *IEEE Trans On Magnetics*, Vol 33, N°2, March 97.
- [Juf -79] M. Jufer, « *Electromécanique* », *Traité de l'école polytechnique fédérale de Lausanne*, Ed. Georgi (1979).
- [Kon-93] A.D. Kone, B. Nogarede, M. Lajoie-Mazenc, 'Le dimensionnement des actionneurs électriques : un problème de programmation NL', *JP III*, Vol 3, pp 285-301, 1993.
- [Lap-92] B. Laporte, R. Ibtouene et M. Chabane, 'Recherche de performances optimales pour une machine synchrone à aimants insérés par une méthode intégrale mettant en jeu une solution analytique', *J. Phys. III*, octobre 1992, pp. 1891-1904.
- [Liu-03] G. Liuzzi, S. Lucidi, F. Parasiliti, M. Villani, 'Multiobjective optimization techniques for the design of induction motors', *IEEE Trans On Magnetics*, Vol. 39, N°3, May 2003, pp1261 – 1265
- [Liw-67] M. Liwschitz, 'Calcul des machines électriques', volume II. SPES Lausanne 1967.
- [Mer-93] G. Mérouge, 'Les règles générales de dimensionnement des machines électriques tournantes', *Journées Electrotechnique du Club EEA*, Belfort, Mars 1993.
- [Mes-98] F. Messine, B. Nogarède, J.L Lagounaelle, "Optimal Design of Electro-Machanical Actuators : A New Method Based on Global Optimization", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 34, No. 1, pp. 229-308, 1998.
- [Mez-04] S. Mezani, 'Modélisation électromagnétique et thermique des machines à induction, en tenant compte des harmoniques d'espace', *Doctorat de l'INP Lorraine*, Juillet 2004.
- [Mul-93] B. Multon, 'Principe et élément de dimensionnement des machines à réluctance variable à double saillance autopilotées', *Journées Electrotechnique du club E.E.A.*, Belfort, 93.
- [Nog-90] Bertrand Nogarède, Michel Lajoie-Mazenc et Bernard Davat, « Modélisation analytique des machines à aimants à induit sans encoches », *Revue Phys. Appl.* 25, juillet 1990.
- [Pir-88] F. Piriou, A. Razek, "Coupling of saturated electromagnetic systems to non-linear power electronic devices", *IEEE Trans. Mag.*, Vol.24, pp. 274-277, 1988.
- [Reg-03] J. Regnier, B. Sareni, X. Roboam, "Optimal design of electrical engineering systems using Pareto Genetic Algorithms", *10th European Conference on Power Electronics and Applications*, Toulouse, 2003.
- [Seg-94] G. Séguier, F. Notelet « *Electrotechnique Industrielle* », TEC&DOC Lavoisier, 1994, PARIS.
- [Tsu-93] I.A. Tsukerman, A.Konrad, G. Meunier, J.C. Sabonnadière, "Coupled Field circuit Problems : Trends and Accomplishments", *IEEE Trans. Mag.*, Vol.29, N°2, 1993, pp. 1701-1704.

- [Tou-04] M. Tounzi, 'Contribution à la conception et la modélisation de machines électriques. Application aux machines à réluctance variable à deux circuits', USTL – L2EP, 2004
- [Vec-92] Vector Fields software: Tosca and Elektra 3D and Pc-opera 2D, Reference manuals, 1992 – Site web: <http://www.vectorfields.com/>.
- b) Utilisation des "Réseaux de perméances" :*
- [Alb-04] L. Albert, 'Modélisation et optimisation des alternateurs à griffes. Application au domaine automobile', Doctorat de l'INPG Grenoble, 2004.
- [Bru-91] JF. Brudny 'Etude quantitative des harmoniques du couple du moteur asynchrone triphasé d'induction. Habilitation à diriger des recherches(HDR), USTL Lille,1991.
- [Car-68] Carpenter C-J-, Magnetic equivalent circuits, Proc. I-E-E- 115 (October 1968) 1503-1511.
- [Del-03] C. Delmotte-Delforge, H. Hénao, G. Ekwe, P. Brochet, G.-A. Capolino, "Comparison of two modeling methods for induction machine study : application to diagnosis," Int. Journal for Computation and Maths. In Electrical and Electronic Eng. (COMPEL), Vol.22, N°4, pp.891-908, 2003.
- [Del-04] Augustin Delale, Laurent Albert, Laurent Gerbaud, and Frédéric Wurtz, 'Automatic Generation of Sizing Models for the Optimization of Electromagnetic Devices Using Reluctance Networks, IEEE Trans. On Mag, Vol. 40, N°. 2, March 2004, pp830 – 833.
- [Del-95] C. Delforge, "Modélisation d'un actionneur asynchrone et de sa commande vectorielle par réseaux de perméances", Thèse de doctorat, Université des sciences et techniques de Lille, Janvier 1995.
- [Dem-05] A. Demenko, J. Sykulski, 'Magneto-electric network models in electromagnetism', ISEF'05, Spain, Sept. 2005
- [Der-99] _ M.Derrhi, C.Delmotte-Delforge, P.Brochet. Coupling a static converter with an asynchronous cage motor in permeance network models diagnosis. SDEMPED'99 IEEE. 1999. USA
- [Der-00] M. Derrhi, "Modélisation de la machine asynchrone par réseau de perméances, validation par le diagnostic," Thèse de doctorat de l'Université de Picardie Jules Verne, novembre 2000.
- [Dev-02] V. Devanneaux, "Modélisation des machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil en vue de la surveillance et du diagnostic," thèse de Doctorat, INP de Toulouse, 2002.
- [Duc-03] B. Ducharme, 'Caractérisation et modélisation des circuits magnétiques – du global vers le local', CEGELY 2003, Université de Claude Bernard, Lyon I.
- [Duf-06] B. Du Peloux de St Romain, 'Modélisation des actionneurs électromagnétiques par réseaux de réluctances', Doctorat de l'INPG Grenoble, 2006.
- [Has-05] RN. Hasanah, M. Markovic, M. Jufer, Y. Perriard, 'Slot-Leakage Inductance Determination using Schwarz-Christoffel Mapping', Electrimacs 2005, Tunisie, 2005.
- [Jer-02] N. Jerance, 'Réseaux de réluctances et diagnostic des machines électriques', Thèse de Doctorat, ENSIEG-Grenoble, Nov. 2002.
- [Kuz-03] Kuznetsov V., Brochet P., "A general numerical modeling of electromagnetic process in electromechanical systems", The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (COMPEL), Vol. 22, No. 4, pp 1142-1154, 2003.
- [Lat-87] M. Latreche, 'Modélisation magnétique et thermique des machines électriques par des schémas équivalents', Thèse de doctorat, INP Toulouse, 1987.
- [Mar-04] M. Markovic, M. Jufer, Y. Perriard, "Analyzing an electromechanical actuator by Schwarz-Christoffel mapping", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.40, No.4, July 2004.
- [Mar-90] A. Marrocco, F. Hecht, "A finite element simulation of an alternator connected to a non-linear external circuit", IEEE Trans. Magnet., Vol.26, pp. 964-967, 1990.
- [Mar-95] F.Marhouret. Développement de modèles dynamiques comportementaux de circuits magnétiques. Thèse, INSA de Lyon 1995
- [Nak-05] K. Nakamura, K. Kimura, O. Ichinokura, 'Electromagnetic and motion coupled analysis for switched reluctance motor based on reluctance network analysis', EPE – PEMC 2004
- [Ost-89] Ostovic V., "Dynamics of saturated machines", Springer-Verlag, 1989, ISBN 3-540-97079-7

- [Ost-99] V. Ostovic, JM Miller, VK Garg, RD Schult, SH Swales, 'A magnetic equivalent circuit based performance computation of a Lundell alternator', IEEE Trans On Industry Applications, Vol.35, N°4, July/August 1999.
- [Per-02] J. Perho, 'Reluctance network for analysing induction machines', Thèse de Doctorat, Université d'Helsinki, Finlande, Décembre 2002.
- [Rak-96] M. Rakotovo, 'Un modèle opérationnel complet pour l'alternateur à griffes dans le domaine automobile', Thèse de doctorat, INP Grenoble, 1996
- [Roi-98] H. Roisse, 'Modélisation d'une machine synchrone à aimants par réseau de perméances', Thèse de doctorat, USTL, Janv. 98.
- [Rot-41] H. Roters, 'Electromagnetic devices', New-York, USA, : John Wiley and Sons, 1941.
- [Six-03] F.Sixdenier, B.Ducharme, J.P.Masson, L.Morel, M.A.Raulet, Coupled programming: "finite elements" – "dynamical hysteresis flux tubes" for non-homogeneous circuits modelling, COMPUMAG, Saratoga Springs, New-York, juillet 2003, USA.
- [Sle-90] Slemon G-R-, An equivalent circuit approach to analysis of synchronous machines with saliency and saturation, I-E-E-E- Trans. on Energy Conversion 5 (September 1990) 538-545.
- [Sra-05] S. Srairi, J. Farook, A. Djerdir, A. Miraoui, 'The magnetic network modeling of a permanent magnet motor with consideration of the saturation and heating effects', ISEF'2005, Spain, Sept. 2005.
- [Tsu-93] A.Tsukerman, A.Konrad, G.Meunier, J.C.Sabonnadière, Coupled Field-Circuit Problems: Trends and accomplishments, IEEE Transactions on magnetics, vol.29, N°2, March 1993.
- [Tur- 96] J. Turowski, "Reluctance networks," in Computational Magnetics, J.K.Sykulski, Ed. New York: Chapman & Hall, ch. 4.

c) Aspect Couplage 'Bruit & Vibrations' et thermique :

- [Aya-00] S. Ayari, 'Etude des vibrations des machines à reluctance variable : influence des caractéristiques géométriques et de l'excentricité rotorique', Thèse de doctorat, ENS Cachan, 2000.
- [Bel-91] R. J. M. Belmans, D. Verdyck, W. Geysen, and R. D. Findlay, "Electromechanical analysis of the audible noise of an inverter-fed squirrel-cage induction motor," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 27, pp. 539–544, Mar.1991.
- [Ben-93] M. E. H. Benbouzid, G. Reyne, S. Derou, and A. Foggia, "Finite element modeling of a synchronous machines: electromagnetic forces and mode shapes," IEEE Trans. Magn., vol. 29, pp. 2014–2018, Mar. 1993.
- [Ber-99] Y. Bertin, 'Refroidissement des machines électriques tournantes', Technique de l'Ingénieur, D3460, 99.
- [Bro-03] Broussely M., Bertin Y., Lagonotte P., Reduction and optimisation of thermal models using Kirchhoff network theory, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 42 N° 9, pp. 795-804
- [Bru-91] JF. Brudny 'Etude quantitative des harmoniques du couple du moteur asynchrone triphasé d'induction. Habilitation à diriger des recherches(HDR), USTL Lille,1991.
- [Bru-97] JF Brudny, Modélisation de la denture de la machine asynchrone : phénomène de résonances', Journal de Physique III, 37 (7), pp 1009-1023, 1997.
- [Bru-83] Bruel & Kjaer, Mesures de Vibrations, Danemark, 1983
- [Cai-02] W. Cai, P. Pillay, Z.tang, 'Impact of stator windings and end-bells on resonant frequencies and mode shapes of srm', IEEE Trans on Industry Applications, 38(4), pp 1027-1036, Juillet-Aout 2002.
- [Cas-96] B. Cassoret, 'Réduction active du bruit magnétique des machines asynchrones directement connectées au réseau', Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Béthune, 1996
- [Cam-97] F. Camus, 'Modélisation des phénomènes vibratoires des machines à réluctance variable à double saillance. Influence de l'alimentation', Thèse de doctorat, ENS Cachan, 1997
- [Col-97] Y. Collette, 'Réduction active des vibrations dans les machines à réluctance variable', Thèse de doctorat, ENS, 1997
- [Cor-00] R.Corton, 'Bruit magnétique des machines asynchrones, procédure de réduction passive et active', Thèse de doctorat, 2000, Université d'Artois - Béthune.

- [Fas-06] A. Fasquelle, D. Saury, S. Harmand, A. Randria, 'Numerical study of fluid flow and heat transfer in an electrical motor', ASME Joint U.S. – European Fluids Engineering Summer Meeting, 17-20 juillet 2006, Miami, Floride
- [Fas-06a] A. Fasquelle, A. Ansel, S. Brisset, M. Hecquet, P. Brochet, A. Randria, 'Iron losses distribution in a railway traction induction motor', ICEM 2006, Crète.
- [Gab-99] M. Gabsi, 'Conception de machines spéciales et de leurs alimentations. Réduction du bruit d'origine électromagnétique', Habilitation à diriger des recherches, Juillet 1999.
- [Har-60] JP. Den Hartog, 'Vibrations mécaniques', Dunod - Paris 1960.
- [Had-95] A. Hadj Amor, P.L Timar, M. Poloujadoff, 'Induction squirrel cage machine design with minimization of electromagnetic noise', IEEE Trans On Energy Conversion, 10(4), December 95.
- [Hub-03] A. Hubert, G. Friedrich., 'Comportement vibratoire des machines électriques asynchrones alimenté par convertisseur statique PWM', Revue internationale de génie Electrique; volume 6 pp 225 à 254.
- [Hub-00] A. Hubert, Contribution à l'étude des bruits acoustiques générés lors de l'association machines électriques - convertisseurs statiques de puissance. Application à la machine asynchrone, Thèse de Doctorat, 2000, UTC Compiègne
- [Jav-95] H. Javadi, Y. Lefèvre, S. Clénet, M. Lajoie-Mazenc, 'Electro-magneto-mechanical caractérisations of the vibrations of magnetic origin of electrical machines', IEEE Trans On Magnetics, Vol 31, N°3, May 1995, pp1892-1895.
- [Jan-81] S.J. Jang, 'Low-noise electrical motors', Clarendon Press – Oxford, 1981.
- [Jor-50] H.Jordan, 'Electric motor silencer-formation and elimination of the noise in the electric motors' - W.Giradet-Essen editor 1950.
- [Lec-03] J. Lecointe, 'Etude et réduction active du bruit d'origine magnétique des MRVDS', Thèse de doctorat, Université d'Artois, 2003
- [Lef-97] Y. Lefèvre, 'Modélisation par la méthode des éléments finis des phénomènes physiques dans les machines électriques en vue de leur conception', HDR, Toulouse, 1997.
- [Min-05] X. Mininger, 'Réduction des vibrations des machines à réluctance variable à l'aide d'actionneurs piézoélectriques', Thèse de Doctorat, ENS Cachan, 2005
- [Rey-87] G. Reyne, 'Analyse théorique et experimental des phénomènes vibratoires d'origine électromagnétique', Thèse de doctorat, INP Grenoble, 1987. & dossier d'HDR 98.
- [Sou-06] Souhil Seghir-Ouali, 'Echanges convectifs à l'intérieur d'une cylindre tournant soumis à un flux axial : Application à l'étude thermique d'un moteur à aimants permanents de puissance élevée', Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Sept 2006.
- [Tim-39] S. Timochenko, 'Théorie des vibrations', Librairie Polytechnique CH Beranger, 1939.
- [Tima-89] P.L.Timar, 'Noise and Vibration of Electrical Machines', Elsevier editor-1989, 3ème Edition.
- [Ver-94] S.P.Verma, Balan.A, 'Determination of radial-forces in relation to noise and vibration problems of squirrel-cage induction motors', IEEE transaction on energy conversion, vol.9 N.2 June 1994.
- [Ver-02] S.P.Verma, Wen.Li, 'Experimental procedures for measurement of vibration and radiated acoustic noise of electrical machines', Power System Research Group 2002, pp432, ICEM 2002.
- [Zhu-99] ZQ. Zhu, D. Howe, 'Influence of mounting and coupling on the natural frequencies and acoustic noise radiated by a PWM controlled induction machine', International Conference on Electrical Machines and Drives, pp 164-168, 99.

d) Aspect 'Plans d'expériences' et optimisation :

- [Alo-00] P. Alotto, P. Girdinio, G. Molinari, M. Nervi, 'Hybrid deterministic / stochastic fuzzy methods for the optimization of electromagnetic devices', COMPEL, Vol. 19 N°1, 2000, pp. 30-38
- [Alo-03] Alotto P., Brandstätter B., Fuertratt G., Magele C., Molinari G., Nervi M., Repetto M., Richter K. R.: Some Results On a SMES Device Optimization Benchmark Problem, 2003.
- [Box-87] Box G. E. P., Draper N. R.: Empirical model-building and response surfaces, John Wiley & Sons, New York, 1987.

- [Bri-01] Brisset S., Gillon F., Vivier S., Brochet P., "Optimization with experimental design: an approach using Taguchi's methodology and finite element simulations", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.37, N°5, pp.3530-3533, September 2001.
- [Cal-01] Caldora Costa M., Giurgea S., Coulomb J.L., Maréchal Y., "Application of Experimental Design Method in the Screening of Electromagnetic Devices Parameters", Compumag 2001, Evian, June 2001, Vol. 3, pp.126-127.
- [Cas-22] SMES Optimization benchmark; definition of the 3 parameter problem, discrete case – IGTE Internet site: <http://www-igte.tu-graz.ac.at/team>.
- [Dro-97] Droesbeke J. J., Fine J., Saporta G., "Plans d'expériences – Applications à l'entreprise", Editions Technip, 1997.
- [Dyc-99] D. Dyck, D.A. Lowther, Z. Malik, R. Spence, J. Nelder, 'Response Surface Models of Electromagnetic Devices and their Application to Design', IEEE Transactions on magnetics, Vol. 35 N°3, May 1999
- [Far-01] M. Farina, J. K. Sykulski, 'Comparative Study of Evolution Strategies Combined with Approximation Techniques for Practical Electromagnetic Optimization Problems', IEEE Transactions on magnetics, Vol. 37 N°5, September 2001, pp. 3216-3220
- [Gal-99] J. A. Gallardo, D. A. Lowther, 'The optimisation of electromagnetic devices using niching genetic algorithms', COMPEL, Vol. 18 N°3, 1999, pp. 285-297
- [Gao-01] X. K. Gao, T. S. Low, S. X. Chen, Z. J. Liu, 'Robust Design for Torque Optimization using Response Surface Methodology', COMPUMAG 2001, Vol. III, pp. 42-43
- [Gar-95] A. Garcia-Diaz, Don T. Philips, "Principles of experimental design and analysis", Chapman & Hall, 1995.
- [Gil-97] F. Gillon, Modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur à commutations électroniques, Thèse de doctorat, USTL, Lille, Déc.1997
- [Gil-00] Gillon F., Brochet P., "Screening and response surface method applied to the numerical optimization of electromagnetic devices", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.36, N°4, pp.1163-1167, July 2000.
- [Gil-04] El-Amraoui L., Gillon F., Vivier S., Brochet P. And Benrejeb M., 'Robust Electromagnetic Optimization of Linear Tubular Actuators', IEEE Trans. Magn., vol. 40, no. 2, pp.1192-1195, 2004, March 2004.
- [Gou-88] J. Goupy, La méthode des plans d'expériences, Dunod, Paris, 1988.
- [Gou-96] Goupy J., "La méthode des plans d'expériences – Optimisation du choix des essais & de l'interprétation des résultats", Editions Dunod, 1996.
- [Gou-99] J. Goupy, 'Plans d'expériences pour surfaces de réponse', Dunod, 1999.
- [Haj-03] OE Hajji, S. Brisset, F. Wurtz, P. Brochet, J. Fandino, 'Comparaison des méthodes stochastiques et déterministes pour l'optimisation de dispositifs électrotechniques', EF'2003, GDR M2EMS – GT4, Supelec, Déc. 2003
- [Inr-96] Inrets-96, "Frein linéaire à courants de Foucault : Rapport d'essais d'un prototype de frein", 1996-1997, Rapport interne Alstom-Ornans.
- [li -04] J. T. Li, Z. J. Liu, M. A. Jabbar, and X. K. Gao, 'Design Optimization for Cogging Torque Minimization Using Response Surface Methodology' IEEE Trans On Magnetics, Vol. 40, N°2, March 04, pp 1176 – 1179.
- [Pil-94] M. Pillet, "Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi", Les Editions d'Organisation, 1994.
- [Poi-TI] J. Poirier, 'Analyse de la variance et de la régression – Plans d'expérience', Technique de l'Ingénieur, R260.
- [Ron-97] R.Rong, D.A. Lowther, Z. Malik, H. Su, J. Nelder, R. Spence, 'Applying Response Surface Methodology in the Design and Optimization of Electromagnetic Devices', IEEE Transactions on magnetics, Vol. 33 N°2, March 1997
- [Sal-97] L. Saludjian, J.L. Coulomb, A. Isabelle, 'Algorithmes génétiques et développement de Taylor de la solution éléments finis pour l'optimisation d'un dispositif électromagnétique', Journal de Physique – Novembre 1997 – pp. 2189-2200
- [Seg-99] J. Seguin, F. Dandurand, D. A. Lowther, J. K. Sykulski, 'The optimisation of electromagnetic devices using a combined finite element neural network approach with on-line training', COMPEL, Vol. 18 N°3, 1999, pp. 266-274
- [Tsu-00] T. Tsunoda, Y. Ishihara, T. Todaka, K. Hirata, 'Geometry optimization of a DC motor by Taguchi method', ISEF 2001, pp. 489-492

- [Vas-97] J. A. Vasconcelos, J. A. Ramírez, R. H. C. Takahashi, R. R.Saldanha, 'Improvements in Genetic Algorithms', IEEE Transactions on magnetics, Vol. 37 N°5, September 2001
- [Viv-01] S. Vivier, F. Gillon, P. Brochet, 'Optimization techniques derived from experimental design method and their application to the design of a brushless direct current motor', IEEE Trans On Mag., Vol.37, N°5, pp 3622-3626, Sept. 2001.
- [Zao-00] F. Zaoui, C. Marchand et A. Razek, " Une méthode des plans d'expériences pour la conception d'un système électromagnétique ", Revue Internationale de Génie Electrique. Vol. 3. n° 4/2000, pp.529-539.

PARTIE IV

ANNEXES

I] Exemples d'applications & articles

II] Plaquelette Equipe COME

III] Résumé programme

'Futurelec3' du CNRT

IV] Outil 'SOPHEMIS'

ANNEXE I

**Exemples d'applications
(Résumé + articles)**

Trois exemples viennent illustrer notre choix d'utiliser des *prototypes virtuels par réseaux de perméances (RdP)*, mais aussi par éléments finis (E.F.).

Ces exemples sont bien entendu en liaison avec les paragraphes II, III et IV de la partie II.

Ils vont permettre d'illustrer les outils spécifiques développés validés par des mesures expérimentales et dans certains cas, la réalisation de prototypes.

Nous avons choisi les trois exemples suivants :

1) *le premier exemple* illustre l'emploi de l'approche RdP concernant deux types de machines :

- la **modélisation d'un alternateur à griffes** par un réseau tridimensionnel (utilisation d'un code E.F. pour déterminer les perméances d'entrefer)

○ Pages iv à xiv.

- le cas du turbo-alternateur a été détaillé auparavant et dans cette partie, un article est placé donnant la mise **en équation et l'application sur un prototype de taille réduite** développé.

○ Pages xv à xxvi

2) *le deuxième exemple* illustre une approche reposant sur la perméance d'entrefer globale et orienté 'couplage multi-physiques'. Pour cela, l'emploi de modèles analytiques en vue de prédéterminer le niveau acoustique d'une **machine asynchrone appliquée à la traction ferroviaire** fut nécessaire. Cet exemple présente différentes possibilités de combiner des modèles avec des niveaux de complexités ou de granularités différents (modèle « mixte »). L'article ajouté donne les orientations sur la réalisation d'un rotor de machine asynchrone.

○ Pages xxvii à xxxvi

3) *le troisième exemple* utilise la méthode des E.F. comme prototype virtuel appliqué à un **frein linéaire à courant de Foucault**. En effet, un inconvénient à cette approche « réseau de perméances » est la difficulté pour la prise en compte des courants induits dans une partie massive.

La modélisation fine des courants induits était nécessaire afin de calculer les forces de freinage et de répulsion liées à ces courants induits dans le rail. Nous utilisons pour cela la méthode des éléments finis (M.E.F.) en magnétodynamique 3D.

Cet exemple frein linéaire à courants de Foucault a été exploité au niveau du chapitre III;

○ Pages xxxvii à xliiii

(I.1.1)
Approche « Réseaux de perméances »

*1.1. Optimisation de la forme des griffes d'un alternateur automobile
par un réseau de perméances 3D*

(Résumé des articles [R1] & [R2] ainsi que l'article [CI.23])

Contexte de l'étude et objectif

De nombreuses études font références à l'étude de cette machine à griffes, typiquement tridimensionnelle. En effet, les alternateurs automobiles ont vu leurs performances s'accroître au cours de ces dernières années, particulièrement la puissance massique dus à la croissance des dispositifs embarqués. De plus, ces alternateurs à griffes présentent un intérêt économique indéniable de part leur simplicité de réalisation, détaillée par la suite.

De plus, des phénomènes, autrefois négligés, demandent aujourd'hui à être étudiés, comme les vibrations ou le bruit rayonné. L'amélioration dès la conception, demande des modèles de plus en plus fins qui doivent tenir compte de nombreux phénomènes : géométrie complexe, saturation des matériaux, commutation due à l'électronique, vitesse de rotation fortement variable. Dans l'étude des machines tournantes couplées à des circuits électroniques, le recours aux modèles numériques s'impose [Hen-92], [Hen-97]. En particulier, lorsque les machines sont étudiées dans un plan de coupe, les modèles des éléments finis couplés magnétique - électrique, du fait qu'ils permettent de prendre en compte simultanément la saturation et les commutations des diodes, fournissent des résultats très détaillés.

Cependant, un temps de calcul important est requis pour la simulation (un mois sur un PC Pentium IV) nécessitant l'utilisation d'un code tridimensionnel couplé électrique - magnétique. Dans le cadre d'une optimisation de la structure, il n'est pas envisageable de retenir cette solution.

Notre *objectif* pour cet exemple est de proposer une approche permettant de modéliser et de simuler une structure typiquement tridimensionnelle avec la prise en compte du mouvement et de la saturation. A cela s'ajoute la nécessité de modifications de la géométrie et plus particulièrement des griffes du rotor afin de minimiser les efforts d'origine électromagnétique.

Choix de l'approche

C'est pour pallier à ce problème que nous avons proposé une approche concernant la modélisation de l'alternateur à griffes par un couplage de réseaux magnétiques et électriques. Le réseau magnétique est constitué de perméances ou réluctances. Ce réseau est ensuite couplé avec les circuits électriques ou électroniques internes et externes de la machine.

Cette approche avait déjà été testée au L2EP avec succès sur des dispositifs classiques : transformateur associé à un convertisseur en y insérant le phénomène d'hystérésis [CI.40] et le cas machine synchrone 2D en intégrant le phénomène de saturation et le mouvement [CI.38]. Cette approche et la prise en compte des différents phénomènes sont détaillées au § II.2.

Description de l'alternateur à griffes

La particularité de cette machine est que l'inducteur se compose d'une bobine d'excitation unique alimentée par deux bagues et enserrée par deux disques où roues polaires, portant chacun des griffes qui s'intercalent les unes dans les autres de manière à obtenir alternativement une succession de pôles nord et sud (figure 1.a). Ainsi le flux créé par l'inducteur traverse une griffe et se répartie dans les deux griffes adjacentes en passant par l'entrefer, les dents statoriques et la culasse (figure 1.b).

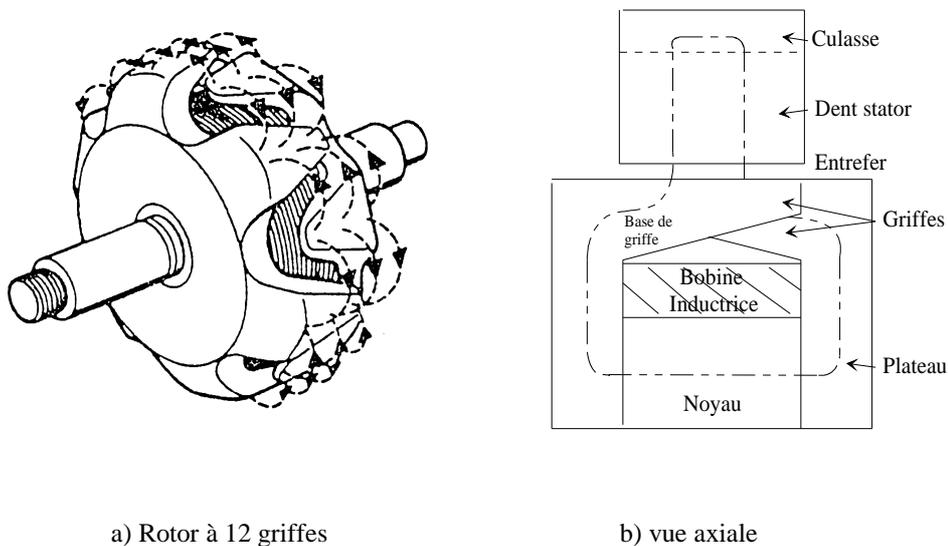


Figure 1. Vue du rotor à griffes et du parcours tridimensionnel des flux

L'effet tridimensionnel est caractérisé par une concentration plus importante de flux dans la base de griffe que dans la pointe et l'induction dans l'entrefer varie tout le long de l'axe rotorique, contrairement aux machines classiques.

Le stator ou induit de la machine est réalisé de façon classique : armature statorique encochée avec un bobinage triphasé. Celui-ci est excité par le champ tournant du rotor et délivre une tension alternative variable en fréquence selon la vitesse de rotation, celle-ci pouvant aller de quelques milliers de tours/minute à des dizaines de milliers de tours/minute.

Les phases statoriques sont connectées à une charge qui est composée d'un redresseur triphasé à 6 diodes et débite sur la batterie.

Prototype virtuel utilisant l'approche 'réseau de perméances'

L'idée générale est de définir un réseau de perméances dans les trois dimensions, limité à la périodicité de la machine, et de le coupler aux circuits électriques. Le circuit magnétique de la machine est décomposé en plusieurs parties, chacune étant représentée par une perméance s'appuyant sur les contours d'un tube de flux. Il faut par conséquent connaître la distribution du flux pour les différents points de fonctionnement et être capable de la retranscrire dans un réseau à *topologie fixe*.

C'est là que réside toute la difficulté de l'approche : être capable de prendre en considération les différents parcours du flux quelque soit le point de fonctionnement de la machine ?

Dans cet exemple, on a retenu pour l'obtention des perméances le calcul E.F. en magnétostatique (détailler au paragraphe II.2.4).

En prenant en compte la périodicité de la machine, nous en étudions uniquement un sixième : 2 griffes rotoriques et 6 dents statoriques. Nous avons choisi de diviser en 2 zones pour la prise en compte des effets 3D. Ainsi, nous modélisons le stator avec deux réseaux de perméances, un par zone, court-circuités par les perméances de culasse comme cela est représenté figure 2.a. Nous avons

également placé une partie du couplage stator-charge, celui-ci étant composé d'un redresseur triphasé à diodes et d'une résistance [CI.37].

Ceci nous conduit à utiliser 18 perméances d'entrefer par zone soit 36 perméances pour le modèle complet. Nous avons représenté, figure 2.b, ce réseau dans une vue axiale, l'alimentation de l'inducteur est réalisé par un élément de transformation permettant le couplage magnétique-électrique.

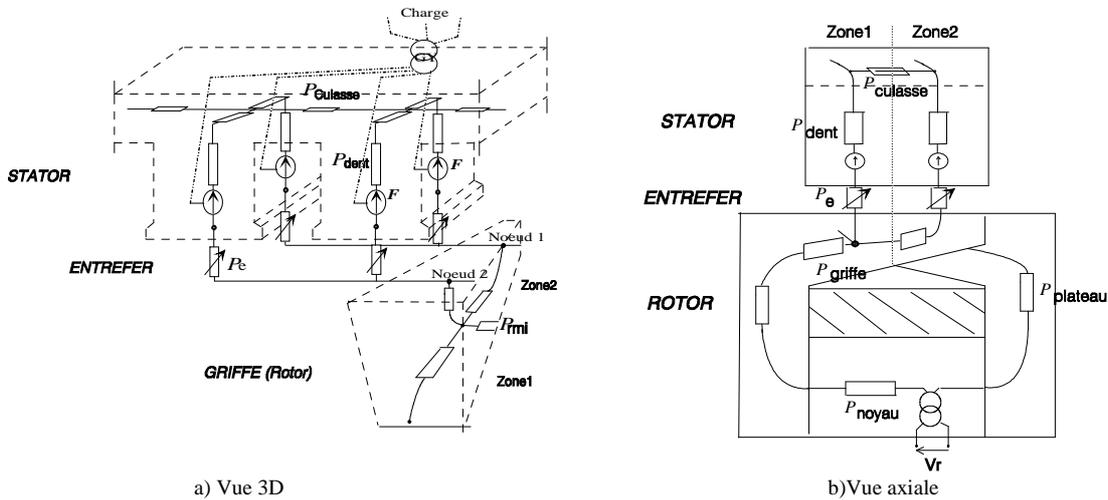


Figure 2. Une partie du réseau de perméances de l'alternateur à griffes

La modélisation de l'entrefer et la prise en compte de la saturation sont détaillées dans le paragraphe II.2. Notre choix repose sur la connexion entre chaque dent stator à un noeud de connexion du pôle rotor par une perméance d'entrefer. Le couplage magnétique-électrique a été détaillé au §II.2.6 et concerne le calcul et la position des sources de force magnétomotrice insérées dans ce cas au niveau des dents statoriques.

a) Validation du modèle 3D 'réseau de perméances'

Ce modèle 'RdP' a été validé sur deux types d'alternateurs de gammes différentes en comparant des résultats typiques comme la force électromotrice, le courant, le flux total capté par une phase en fonction du courant d'excitation [R2].

Dans un premier temps, nous avons fait des simulations à vide : relevé du flux maximal traversant une phase en fonction du courant d'excitation i pour une vitesse constante : $N=3000$ tours/minute. Un résultat est donné sur la figure 3.

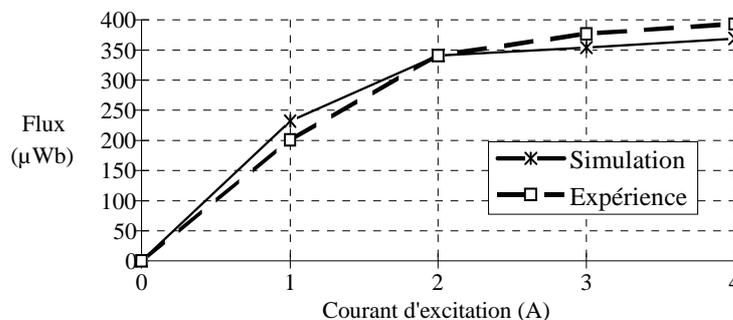


Figure 3 Flux maximal dans une phase statorique en fonction du courant d'excitation

Les résultats obtenus sont très satisfaisants avec une erreur faible dans la partie linéaire et une erreur inférieure à 10% dans la partie non-linéaire, la saturation étant celle due aux matériaux.

Sur la figure suivante, les forces électromotrices sur un pas polaire obtenues par des spires exploratrices sont comparées aux résultats expérimentaux. Les phases statoriques de l'alternateur sont connectées à un pont composé de six diodes suivi, dans notre étude, d'une résistance de charge. Deux cas de charges sont étudiés, I_{ch} étant le courant dans la charge résistive. La vitesse de rotation de l'alternateur est imposée à 3000 tr/min.

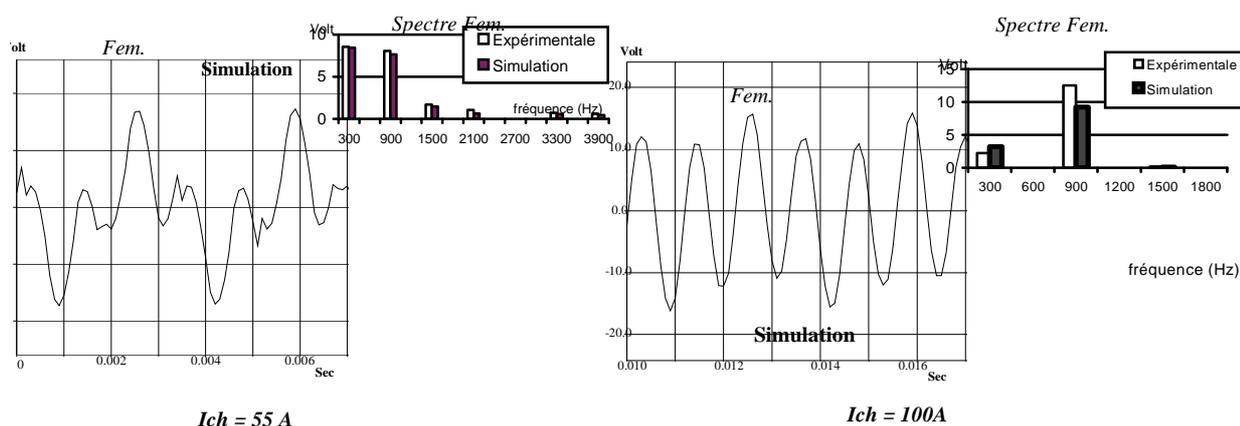


Figure 4. Fem pour différentes charges : $I_{ch} = 60A$ et $100A$, pour $N=3000$ tr/min.

Sur les grandeurs de sorties de l'alternateur, les résultats de simulations et les relevés expérimentaux sont quasi-identiques. Les tendances sont respectées pour différentes charges. Nous pouvons remarquer une distorsion importante de la fem. L'harmonique 3 augmente fortement avec le débit. Ces perturbations sont dues au pont de diodes. En effet, la machine étant très inductive, elle se comporte comme une source de courant ce qui est confirmé par la durée de conduction des diodes et se traduit par un empiètement important. L'étude du courant dans une phase montre que celui-ci est pratiquement sinusoïdal dès lors qu'il est supérieur à une trentaine d'Ampère.

Le modèle de l'alternateur donne de bons résultats et l'erreur n'atteint que 10% en plein champ pour un faible temps d'exécution : il faut moins d'une minute de calcul pour obtenir une période à 3000 tours/minute, réalisant ainsi pour la discrétisation choisie un bon compromis temps de calcul - précision. De plus, il nous a été possible de vérifier la bonne concordance des fems et du courant débité pour différentes vitesses allant jusqu'à 10000 tours/minute à vide comme en charge sur deux gammes d'alternateurs.

Ci-dessous, nous présentons un article publié à COMPUMAG [CI.13] qui concerne l'optimisation de la forme des griffes afin de limiter le bruit d'origine électromagnétique. Dans cet article, nous rappelons la procédure d'optimisation ainsi que la minimisation des bruits d'origine électromagnétique.

Numerical And Experimental Study Of The Pole Shape Influence On The Dynamics Of An Alternator.

M. Hecquet, M. Goueygou, P. Brochet.

Abstract -- A numerical procedure to optimize the pole shape of an automotive alternator is presented. This alternator is a claw-pole machine, that is modelled by an electrically coupled permeance network. Saturation, electronic commutations and rotor movement are take into account. Noise and vibration are important quality factors of the alternator and are mostly due to electromagnetic phenomena. Some geometric parameters of the claw are investigated and the Experimental Design Method is used to find a global optimum that would minimize vibration and noise levels. Consequently, numerical simulations and measurements are carefully compared, so as to validate the numerical procedure. A correlation between radial force, torque and vibration harmonics is also established.

Index-terms -- permeance network, claw-pole alternator, 3D dynamic modelling, radial forces, vibrations, acoustic measurements, harmonics.

(I.1.2)

Approche « Réseaux de perméances »

1.2. Modélisation d'un turbo-alternateur par RdP Prise en compte des effets 3D

L'article suivant reprend la démarche placée en partie II §II.2.4, rappelle la mise en équation et donne quelques résultats sur un prototype de taille réduite [CI.13] présenté à ICEM'04. Le second article donne quelques précisions sur la prise en compte des effets 3D [R15] présenté à Compumag'2005.

Numerical modelling of a turboalternator using Tooth Contours Method: CAD application

Dmitry Petrichenko, Michel Hecquet, Pascal Brochet, Vyacheslav Kuznetsov*, Daniel Laloy**

C.N.R.T. Réseaux et machines électriques du future, Lille (Projet 'Archimed')

L2EP, Ecole Centrale de Lille

Cite scientifique, BP48, 59651 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

Dimitry.Petrichenko@ec-lille.fr; Michel.Hecquet@ec-lille.fr; Pascal.Brochet@ec-lille.fr

* Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Dep. of Electromechanics
Krasnokazarmennaja, 13, Moscow, 111250, Russia

KuznetsovVA@mpei.ru

** Framatome ANP, 27 Rue de l'Industrie, BP189, 59573, Jeumont Cedex, France

Abstract – This article describes the approach of modelling a synchronous turboalternator using Tooth Contour Method. This method allows implementing electrical and magnetic coupling as well as mechanical coupling. Such processes as saturation, movement, 3D effects can be taken into account. The aim of this study is an application of this method to modelling 10-100 MW turboalternators.

Keywords – CAD application, reluctance network, magnetic circuit, magnetic field, air-gap permeance.

Design and simulation of turbo-alternators using coupled permeance network model

Dmitry Petrichenko, Michel Hecquet, Pascal Brochet, Vyacheslav Kuznetsov, Daniel Laloy

Abstract – The modelling of a turbo-alternator using permeance network is described. This approach allows implementing electrical and magnetic coupling as well as mechanical coupling. Such processes as saturation, movement, 3D effects are taken into account. The aim of this study is to set up a design model of 10 to 100 MW turbo-alternators. The method of taking into account of 3D effects is described. The first results of simulation were obtained. The experimental measurements validate the model.

Key words – CAD application, reluctance network, magnetic circuit, magnetic field, air-gap permeance, automatic generation of the permeance network.

INTRODUCTION

The recent high growth of the power of the computer systems, development of the software to solve complicated problems made it possible to use precise methods of calculations in electric machinery to obtain the magnetic fields analysis. The most spread nowadays finite element method still demands too much computing power to obtain the results in a short time. Thus in the applications of optimization, where the calculation time is very important, one should use methods maybe a little bit less precise than FEM but more quick and effective.

Being based on a permeance network methods [1], [2] Tooth Contour Method (TCM) [3] gives one fast calculation of magnetic circuit and, therefore, high performance calculation of steady-state and dynamic characteristics and transient analysis. This feature allows TCM to be used in CAD systems. The peculiarity of the method is in special air-gap permeances calculations and the electrical-magnetic coupling treatment. A software implementation of the method realizes an automatic parameterized permeance generation. The same circuit description tool can generate both electric and magnetic network, providing then the calculations of a machine coupled with electrical parts.

In the first part, the basis of the Tooth Contour Methods is given and the mathematical model of a turboalternator is presented along with a general representation of a magnetic circuit. This paper also pays attention on the method of taking into account the axial heterogeneity of a machine. Then the general description of software 'TurboTCM' is given. The simulation results are presented in the end of the

paper.

PERMEANCE NETWORK AND TOOTH CONTOUR METHOD

Different methods using magnetic equivalent circuit to represent the field inside the electrical machine are detailed in [3], [4]. The main advantage of this approach is a good compromise between the accuracy of field calculations and the computing time. In this method, the 3D effects of a field in the electrical machine are easily taken into account with accuracy enough for practical purposes [4].

The Tooth Contours Method represents one approach of permeance networks. It is based on theoretically validated representation of the total magnetic field in the air-gap as the sum of local magnetic fields of the particular elements of the so-called tooth contours [5]. Usually the tooth contour is considered to be an element formed by the conductors located in adjacent slots, but it may be also represented as any part of the core surface e.g., the pole-shoe may be divided into several "tooth" contours (Fig. 1).

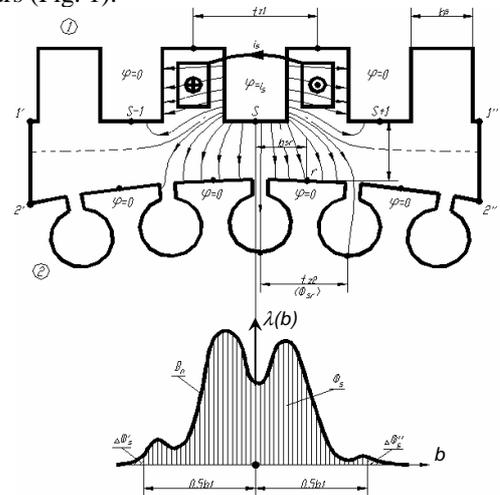


FIG. 11 TOOTH CONTOUR REPRESENTATION

The local magnetic fields of tooth contours are to be calculated under the artificial boundary conditions, called the Special Boundary Conditions (SBC), supposing that the permeability both of stator and rotor iron is infinitely large. This special field is localized in a small region, which usually does not exceed three or four tooth pitches and so it could be easily and quickly calculated. As a result, a mutual permeance between excited contour s of a stator and one of a non-excited rotor contours r are obtained as a function of their relative position $\lambda_{sr}(b_{sr})$, as shown on Fig.1.

(I.2)

Perméance d'entrefer globale
Couplage multi-physiques : électro-vibro-acoustique

2) Modélisation et optimisation électro-vibro-acoustique d'une machine asynchrone appliquée à la traction ferroviaire' (définition d'un nouveau rotor)

(Résumé [CI.10] & article [R14])

Lien avec les paragraphes (partie II §II.2. et II.3)

L'étude proposée a été réalisée dans le cadre de la thèse de Mr AIT-HAMMOUDA Amine [ref.] en relation avec Alstom-Transport 'Ornans' dans le cadre d'une convention CIFRE [Th.2].

Ces travaux ont été réalisés en partenariat avec l'IEMN et plus particulièrement M. Goueygou, Maître de Conférences au dépt. électronique et vibro-acoustique.

La problématique du bruit dans les transports ferroviaires est rappelée ainsi que les objectifs, puis le choix de l'approche est proposé. Enfin, de nombreuses comparaisons ont pu être effectuées par l'intermédiaire d'Alstom.

a) Contexte et objectif

Les moteurs de traction ferroviaire d'Alstom-Transport sont fabriqués sur le site d'Ornans (près de Besançon). Il est important de noter que le marché du ferroviaire reste encore un marché de petite série et que chaque contrat nécessite un développement nouveau ou une adaptation d'un moteur existant.

Il faut savoir qu'à l'heure actuelle, les moteurs de traction sont soumis à des normes acoustiques drastiques, chaque élément de la chaîne de traction recevant une allocation au niveau acoustique. Dans ce contexte, ALSTOM-Transport a pour objectif d'améliorer significativement le dimensionnement acoustique des systèmes de traction via la recherche du meilleur compromis entre acoustique, thermique et rendement électrique.

C'est un enjeu majeur de la compétitivité des matériels roulants ferroviaires. A titre d'exemple, à pleine vitesse train, le bruit des moteurs de traction auto-ventilés peut être du même niveau sonore que celui du contact roue-rail, voisin de 110 dBA;

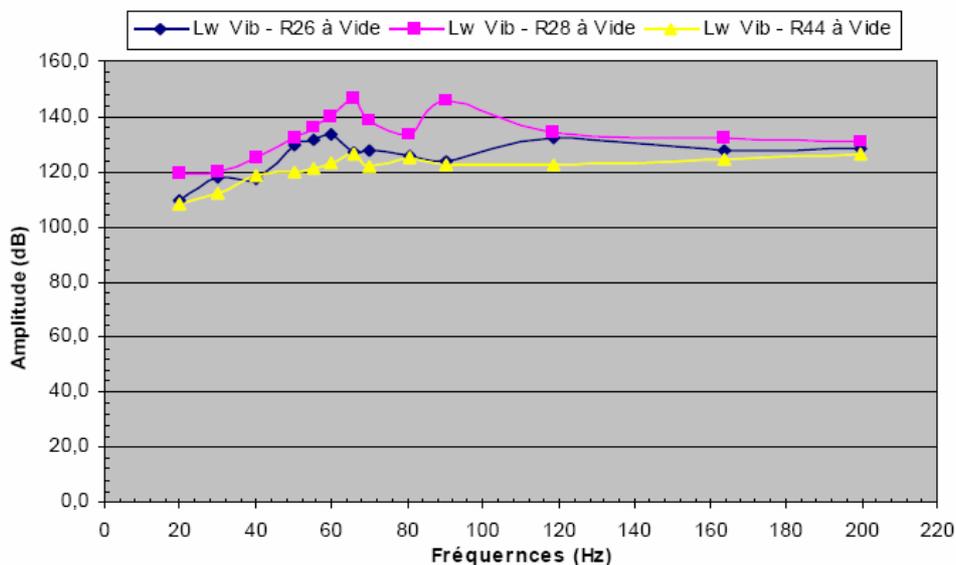
Par conséquent, il est fondamental pour Alstom-Transport de disposer d'un modèle d'aide à la conception permettant de s'assurer, dès cette phase, de la fiabilité d'un nouveau moteur. En effet, Le fonctionnement du moteur asynchrone, la plus part du temps à vitesse variable, s'accompagne d'une production inévitable de vibrations. Celles-ci peuvent être gênantes pour la machine elle-même mais aussi pour son environnement. Il est donc nécessaire pour le constructeur de tenir compte du bruit et des vibrations dès la phase de conception.

Ainsi, les conceptions mécanique et électromagnétique ne peuvent plus se mener indépendamment et la conception des machines requiert une approche multi-physique.

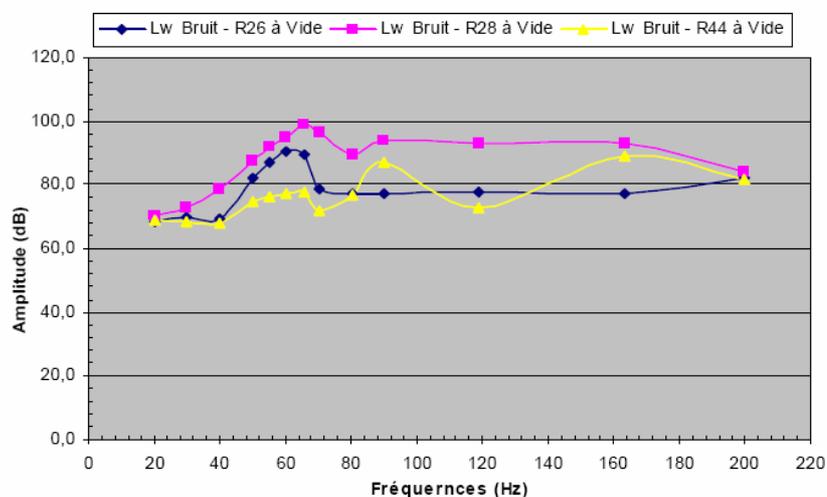
Des outils et méthodes d'analyse existants permettent effectivement d'étudier ces phénomènes couplés, comme par exemple la Méthode des Eléments Finis (M.E.F) en magnétodynamique avec couplage circuit. Cependant, l'enchaînement de ces modèles électromagnétiques, vibro-acoustique ou thermiques utilisant la M.E.F demande des temps de calculs considérables surtout dans le cas d'un couplage 'fort'. Ceci est d'ailleurs renforcé dans le cas d'une optimisation de la structure.

Notre objectif concerne la conception électromagnétique d'une machine asynchrone de traction ferroviaire d'une puissance élevée sous contraintes de minimisation du bruit aérien rayonné.

résultats de comparaisons sur trois rotors différents de 28 (machine initiale) – 26 (rotor disponible) et le 44 encoches (Zr).



Mesures vibratoires sur 3 rotors (réalisation d'un rotor 44 encoches [Th.2])



Mesures acoustiques sur 3 rotors

Ces mesures ont permis de valider notre modèle. Les résultats obtenus sur le rotor à 44 encoches montrent qu'effectivement, nous pouvions améliorer la machine existante (36-28).

Le RdP se base sur une perméance globale présentée en partie II §II.2.4. Le couplage vibro-acoustique est détaillé au §II.3.

L'article suivant [R14] présente des résultats pour une machine plus puissante de 750kW.

b) Choix de l'approche

Dans le but de répondre à ce problème, un développement de modèles multi-physiques de type analytique doit être privilégié dans le cadre d'une démarche de conception de machines moins bruyantes.

Il nous faut développer des modèles paramétrés électromagnétiques couplés aux modèles vibratoire et acoustique. En effet, se limiter à la détermination des forces est inutile au niveau acoustique. Vous pouvez réduire l'amplitude des harmoniques les plus importants sans pour autant réduire le niveau acoustique. Il suffit par exemple d'une amplitude très faible pour un harmonique de rang quelconque mais avec un mode faible (mode 2 par exemple) pour obtenir un niveau acoustique élevé. Il suffit pour cela que ce mode forcé correspond à une fréquence naturelle et à un mode identique de la structure.

De plus, il paraît inutile d'augmenter l'épaisseur de la culasse, cela pouvant dans le cas d'une application à vitesse variable augmenter le niveau acoustique de la machine.

En conclusion, savoir quelle raie réduire ne nécessite pas de connaître précisément son amplitude. Sa fréquence, par contre, doit être parfaitement déterminée.

c) Description de la machine étudiée

Les machines réalisées par Alstom-Transport sont à 90% des machines de type asynchrone. La gamme de puissance étudiée varie de 100 à 700kW.

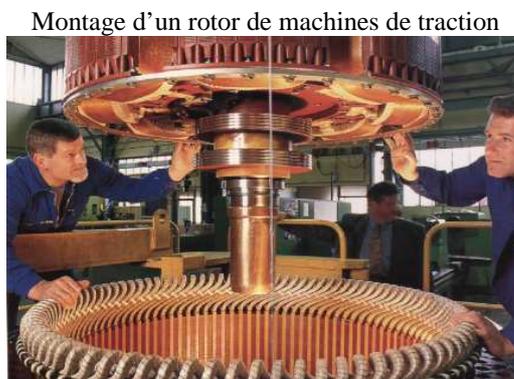


Figure 12 : Machines asynchrones appliquées à la traction ferroviaire.

Les machines asynchrones de traction chez Alstom-Transport sont à 80% à rotor droit du fait de leur conception (vrillage après réalisation du rotor complet).

Différentes machines ont été étudiées de 250 à 750kW. La description des paramètres et quelques résultats sont fournis au §III.2.1.2. Nous donnons ci-dessous uniquement les résultats de mesures suite à la réalisation d'un nouveau rotor comparé à des rotors existants [Th. 2].

Les résultats présentés ci-dessous sont repris de la thèse d'Amine Ait-Hammouda et concerne une machine de 250kW. Un prototype a été réalisé avec un stator comprenant 36 encoches stator (Z_s) et un nouveau rotor comprenant 44 encoches. Nous présentons ci-dessous les

Prediction of the electromagnetic noise of an asynchronous machine using experimental designs.

M.Hecquet, A.Ait-Hammouda, M.Goueygou*, P.Brochet, A.Randria**.

L2EP, Ecole Centrale de Lille, BP48, 59651 Villeneuve D'Ascq Cedex, France

* IEMN(vibro-acoustic dept.) Ecole Centrale de Lille.

** ALSTOM-TRANSPORT ORNANS.

e-mail: michel.hecquet@ec.lille.fr, ait-hammouda.amine@ec.lille.fr

Abstract – The aim of this paper is to use an analytical multi-physical model - electromagnetic, mechanic and acoustic - in order to predict the electromagnetic noise of an asynchronous machine. This machine operating at variable speed generates vibrations that can be harmful for the machine itself and its environment. Thus, it is necessary for the manufacturer to take into account noise and vibration at the design stage. Acoustic measurements are performed in order to validate our multi-physical model. Afterwards, the experimental design method is used to build response surfaces of the noise with respect to the main factors.

INTRODUCTION

The majority of electric machines function at variable speed which generally induces noise and vibrations for a speed or a given frequency. For manufacturing industries but also with the increasingly rigorous European standards, it is necessary to take into account noise and vibration at of the design stage.

A classical method to study electromagnetic phenomena is the finite element method (F.E.M) in magneto-dynamics, including coupling circuit. However, in the case of strong coupling, taking into account the electromagnetic, vibro-acoustic, and thermal models at the same time would need a considerable computing time. This would make the structure optimization practically impossible. In order to solve this problem, an analytical multi-physical approach is considered instead. The aim of this work is to develop and use an analytical multi-physical model - electromagnetic, mechanic and acoustic - of an asynchronous machine.

The complete model was coded using data-processing tool MATLAB, making it possible to obtain a fast and simple prediction model of the acoustic noise. Three models are presented: electromagnetic, mechanical and acoustic. For each part, comparisons with F.E.M. results and experiments have been made.

Lastly, a study of sensitivity is presented in order to deduce the influential - or significant - factors on the noise. For that, the technique of the experimental designs is used. More particularly, the modelling of the noise will be achieved. Several response surfaces are given; they represent the noise according to influential factors, with respect to different speeds of the machine. These surfaces are useful to deduce the parts of the design space to avoid.

ELECTROMAGNETIC MODEL OF THE ASYNCHRONOUS MACHINE

A. Induction and force in the air-gap

The method considered for calculation of induction in the air-gap is based on the product between the perméance of air-gap Λ and the magnetomotive force:

$$b = \Lambda mmf \quad (1)$$

The goal is to determine the analytical expressions of the magnetomotive force and the perméance, by considering the different harmonics due to the winding and the stator rotor slots, responsible of the origin of the electromagnetic noise in electrical machines.

B. Analytical expression of the perméance.

The air-gap perméance is related to the geometry of the stator - rotor slots:

1) *perméance related to the stator slots* : The air-gap perméance limited by a stator with slots and smooth rotor is given by:

$$\Lambda_{ks}(\alpha^s) = \sum_{k=1}^{+\infty} \Lambda_{ks} \cos(k_s N^s \alpha^s) \quad (2)$$

Where α^s is the angular position compared to the axis of stator reference, N^s the number of stator slots per pair of pole.

2) *perméance related to the rotor slots* : The air-gap perméance limited by a rotor with slots and one smooth stator is given by :

$$\Lambda_{kr}(\alpha^s, \theta_d) = \sum_{k=1}^{+\infty} \Lambda_{kr} \cos(k_r N^r \alpha^s - k_r N^r \theta_d) \quad (3)$$

Where θ_d is defined relative to the axes of two reference teeth, one for the stator and one for the rotor and N^r the number of rotor slots per pole pair.

(I.3)

Utilisation de la méthode des éléments finis comme
prototype virtuel
Prise en compte des courants induits dans un frein
linéaire à courant de Foucault

*3) Modélisation magnétodynamique 3D d'un frein linéaire à courant de Foucault
(FCF) par la M.E.F.*

Cette partie vient en complément sur les aspects ‘optimisation du FCF’ présentés en partie II § III, l’objectif étant la validation du prototype virtuel.

L’étude proposée a été effectuée en relation avec Alstom-Transport ‘Petite-Forêt et Ornans’ dans le cadre d’un appel d’offre régional [CR1 & CR4].

Nous commençons par rappeler brièvement le contexte de l’étude, les objectifs à atteindre et le choix de l’approche pour notre *prototype virtuel*.

Afin de confronter nos résultats de simulations à l’expérience, un banc expérimental fut réalisé. Ce point reste fondamental et renforce le troisième axe de notre équipe concernant la partie ‘caractérisation’.

Contexte et objectif

Dans les transports ferroviaires, et plus précisément en milieu urbain et suburbain, le matériel roulant doit de plus en plus permettre une augmentation du débit des voyageurs. Pour cela, des matériels 2 niveaux ont été créés entraînant une forte charge à l’essieu (jusqu’à 25 tonnes) et les vitesses ont été augmentées ce qui nécessite une forte motorisation et surtout une forte capacité de freinage. Les équipements de freinage actuels, tel le frein à friction, composants l’architecture frein d’une rame, doivent donc dissiper des énergies considérables et atteignent dans certaines conditions d’exploitation leurs limites (échauffements excessifs des roues).

La stratégie de freinage d’une rame repose dès lors sur l’emploi au maximum de leurs capacités des freins dits sans usure et indépendants de l’adhérence roue-rail (frein électrique). Les freins à courant de Foucault (F.C.F) répondent pleinement à ces deux critères.

Ils peuvent être utilisés notamment en freinage de service, qui représente la majorité des freinages, de façon optimale sur une plage de vitesses étendue en conjugaison avec les autres types de freins qui sont alors moins sollicités.

Notre objectif est d’optimiser les dimensions géométriques et les caractéristiques électriques d’un F.C.F linéaire pour le freinage de trains ayant une vitesse comprise entre 50 et 200km/h.

Ainsi, il nous faut obtenir une force de freinage suffisante sur une large plage de vitesse en respectant les contraintes d’encombrement total et surtout de maintien de la force d’attraction à un niveau acceptable à basse vitesse.

Dans un premier temps, uniquement, les parties modélisation et validation seront présentées. La partie ‘optimisation’ sera présentée au chapitre III.

Choix de l’approche

Une étude analytique de ce dispositif est difficile sans simplifications majeures, mais elle permet d’obtenir un pré-dimensionnement de la structure [Wia-73], [Sto-74], [Del-93]. Par contre, dans le cas de la prise en compte des phénomènes suivants : l’effet de peau, les trajectoires des courants induits dans le rail, la réaction magnétique d’induit, la saturation des matériaux et surtout la géométrie réelle du dispositif, il est nécessaire d’utiliser une méthode numérique permettant ainsi de répondre aux objectifs d’optimisation de la forme des pôles et du nombre de pôles. La méthode utilisée est la méthode des éléments finis en magnétodynamique 3D.

Pour la définition du prototype virtuel, il faut considérer un rail infiniment long. Le problème à résoudre est alors stationnaire dans le référentiel du train. Les courants induits dans le rail sont de la forme $\sigma(\mathbf{V} \wedge \mathbf{B})$, où σ est la conductivité du rail, \mathbf{V} la vitesse du train et \mathbf{B} l'induction créée par les bobines. Cette formulation est bien connue et de nombreux logiciels commerciaux la proposent en standard [Vec-92].

Principe de fonctionnement et présentation du banc expérimental

Ce système de freinage est simple et peut être vu comme un moteur linéaire. Son principe de fonctionnement repose sur la création de courants induits dans la partie conductrice (figure 13), dans notre cas un rail, par un champ magnétique d'amplitude variable.

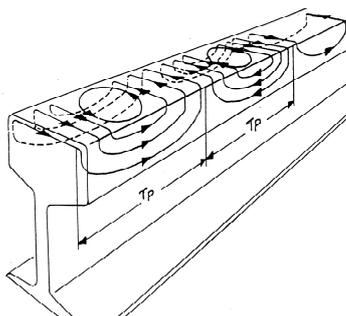


Figure 13. Vue du rail et du parcours tridimensionnel des courants induits
(Paramètre λ_p : pas polaire)

En effet, le frein électromagnétique est monté sur le boggie et se déplace par rapport au rail à la vitesse du train. Chaque pôle ou inducteur qui le compose, crée un champ d'amplitude fixe. Le rail ou induit voit donc apparaître un champ magnétique d'amplitude variable. Ceci provoque l'apparition de courants induits dans la masse métallique du rail : ce sont des courants de Foucault, qui s'opposent à la variation de flux [Lam-66] [Sto-74] [Wia-73]. L'interaction entre le champ inducteur et les courants induits crée une force dite de Lorenz. La direction de cette force suit la règle de Laplace.

On peut distinguer dans cette force 2 composantes, suivant leur orientation,

- une composante parallèle au rail, de sens opposé à celui de déplacement du train. Il s'agit d'une force retardatrice sur l'organe en mouvement : *la force de freinage* ;
- une composante normale au rail, dirigée du rail vers l'extérieur. Il s'agit d'une composante visant à éloigner l'inducteur de l'induit, c'est *la force de répulsion* ;

Enfin, de façon indissociable et permanente, un effort d'attraction magnétique vertical s'exerce entre l'inducteur et le rail. On notera que le fonctionnement particulier décrit ci-dessus implique que le dispositif de freinage est inopérant lorsque le train est à l'arrêt.

Le banc expérimental, présenté sur la figure 14, a été réalisé sous forme de roue permettant d'effectuer des essais en statique mais surtout en dynamique, roue réalisée et testée par l'INRETS [Inr-96]. Ainsi, le champignon du rail est enroulé sur une jante et l'inducteur est courbe. Une table dynamométrique donne la force d'attraction en statique mais aussi les forces en dynamique. La vitesse périphérique peut aller jusqu'à 200 km/h.

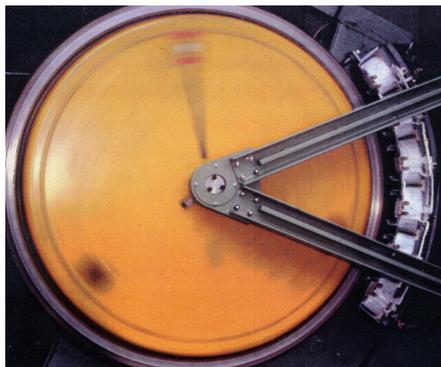


Figure 14. Vue du dispositif expérimental : modèle « roue »

Les mesures suivantes sont effectuées : flux en haut et bas du pôle, forces d'attraction et de freinage, ceci pour différentes valeurs de courant, de vitesse et d'épaisseur d'entrefer.

Modélisation éléments finis 3D

En ce qui concerne la simulation, un modèle éléments finis tridimensionnel constitué de 6 pôles est défini sous la forme d'un modèle « roue », représenté sur la figure 4. Les effets d'extrémités et effets de bord sont pris en considération. Ils s'avèrent non négligeables [R6].

Dans le modèle, les forces de freinage et de répulsion sont données par la relation : $F = J \wedge B$ et la force d'attraction par intégration du tenseur de Maxwell dans l'entrefer. Il est à noter que sa composante tangentielle redonne la même valeur pour la force de freinage.

Un modèle complet à 6 pôles a été défini sous OPERA-3D. Le modèle éléments finis est paramétré, permettant ainsi de définir rapidement une nouvelle structure.

Le maillage doit être relativement fin dans la zone où les courants induits se développent c.a.d dans « l'épaisseur de Peau » à la surface du rail. Une étude de sensibilité a montré l'importance d'un maillage : différents tests ont été effectués en procédant à un découpage du rail (voir figure ci-dessous appliquée à un FCF linéaire) afin de limiter le nombre de nœuds total (le rail étant considéré comme infini) [DEA : D5].

Trois zones sont représentées sur la figure 15 et correspondent à « l'épaisseur de Peau ». Ces zones sont paramétrées et une estimation de l'épaisseur δ est déterminée à partir de la relation analytique 'classique' de la fréquence de fonctionnement employée.

Une décomposition supplémentaire apparaît suivant l'axe x représenté sur la figure 15.b.

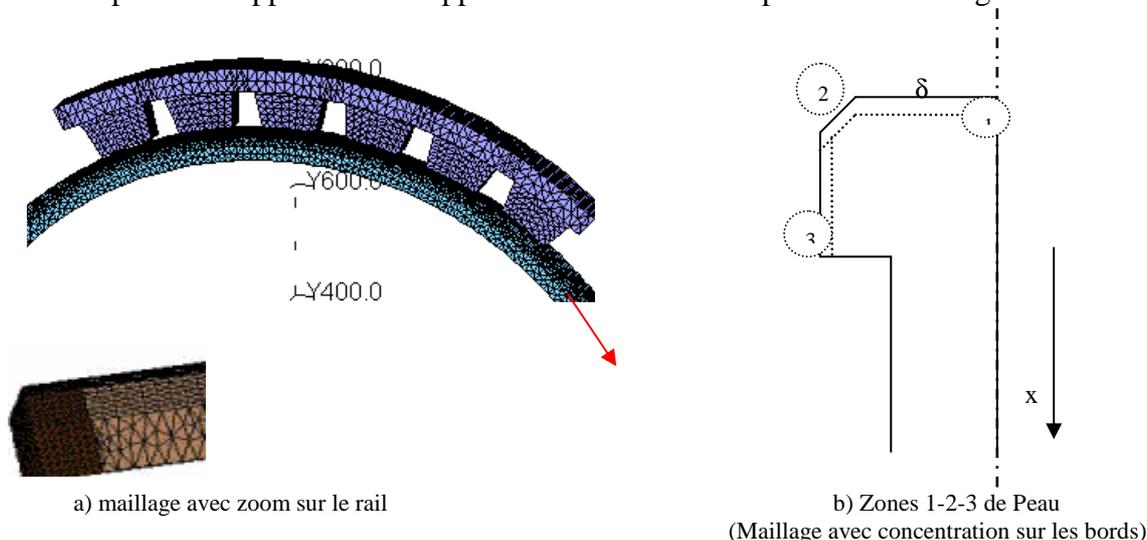
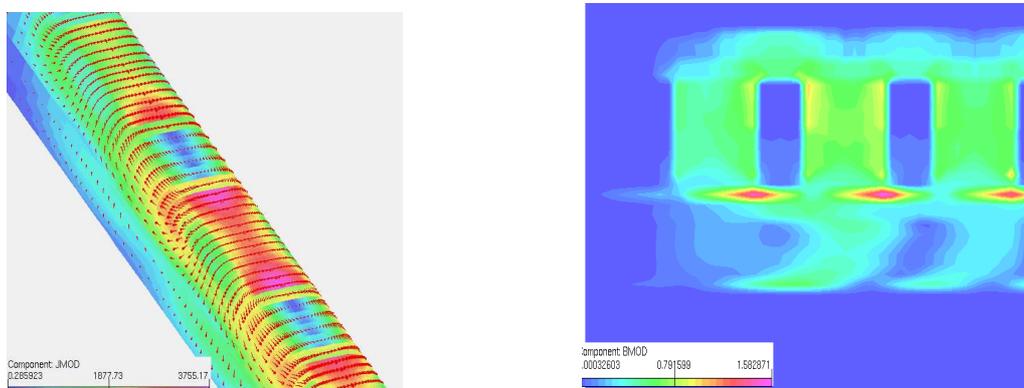


Figure 15. Maillage permettant la prise en compte des courants induits

Quelques résultats des simulations 3D sont présentés sur les figures suivantes. La distribution des courants induits dans le rail pour une vitesse $v=12.5\text{m/sec}$ est donnée ainsi que leurs effets sur la distribution du champ d'induction.



Gauche : Courants induits dans le rail; Droite : Induction au centre du dispositif
Figure 16. Simulations du frein linéaire pour une vitesse $v=12.5\text{m/sec}$

Cependant, étant donné la complexité du problème, un *calage par des essais expérimentaux* fut nécessaire : validation de la conductivité du rail imposée constante quelque soit le point de fonctionnement et de sa perméabilité fonction des N_i imposés et de la fréquence de fonctionnement.

Validation du modèle éléments finis

De premières comparaisons montrent le bon comportement du modèle en statique pour le calcul des flux et de la force d'attraction. La figure 17 donne l'évaluation du flux calculé et mesuré pour différentes valeurs de N_i (de 5000AT à 14000AT) et différentes valeurs d'entrefer de 9 à 15mm.

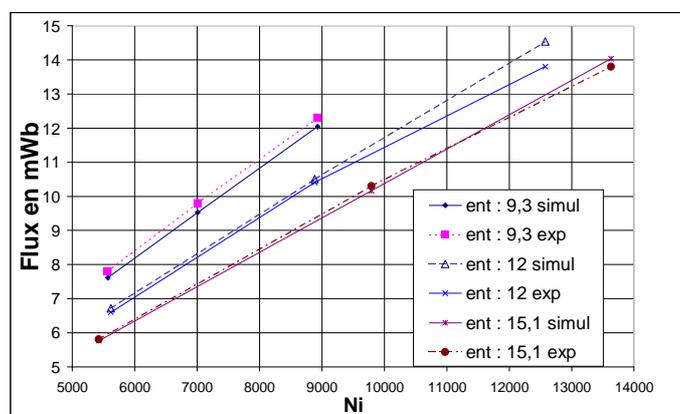
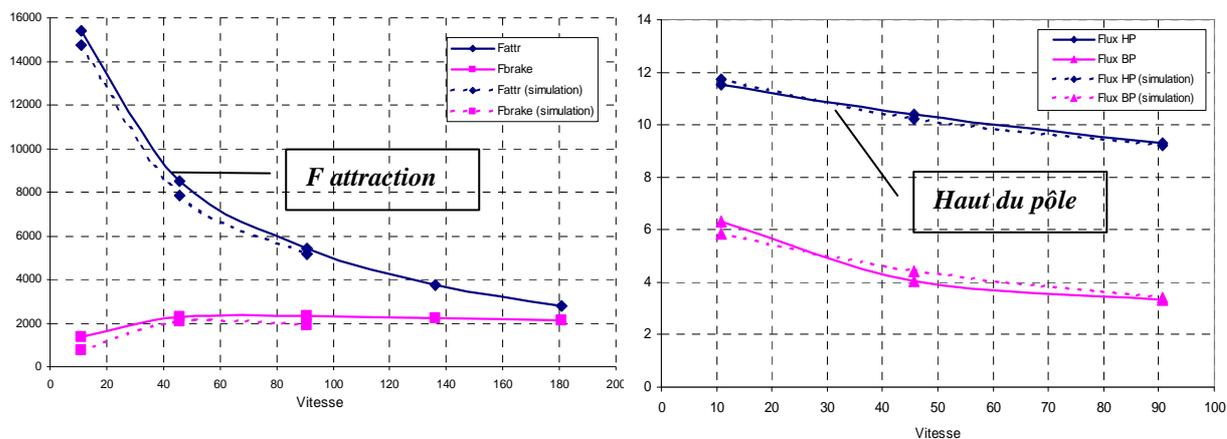


Figure 17. Vue du modèle éléments finis et comparaisons des flux en statique

En second lieu, une comparaison en dynamique est réalisée.

Les flux en dynamique en haut et en bas du pôle ainsi que les forces de freinage et d'attraction sont comparées et reportées sur la figure 18.



Forces de freinage et d'attraction Flux « haut et bas » de pôle
Figure 18. Comparaisons des résultats expérimentaux et de simulations (NI=10000AT)

Les résultats de simulations sont très proches des mesures expérimentales et ceci pour différentes valeurs d'ampères-tours et d'entrefer. Ces différentes comparaisons démontrent la faisabilité de l'étude en ce qui concerne la simulation d'un modèle 3D complet avec des temps de calcul raisonnables, de l'ordre de 10 à 15 heures en fonction de la vitesse de déplacement.

En effet, le calcul des courants induits est un problème difficile surtout dans le cas où la perméabilité ainsi que la vitesse de déplacement sont élevées : problème du coefficient nommé « Peclet number » à 1 » lié entre autres à la perméabilité du matériau, à la finesse du maillage et à la fréquence [VECT 92], [FUJ 98], [R8]. Cela impose pour les différents calculs d'avoir des modèles dont le maillage varie de 300000 à plus de 500000 nœuds pour satisfaire à cette condition.

Conclusion sur l'approche numérique pour l'étude d'un F.C.F

La méthode des éléments finis a permis d'étudier une structure complexe en considérant de nombreux phénomènes ainsi que certains paramètres. En premier lieu, le calage de notre prototype virtuel a été réalisé sur des essais en statique et en dynamique à faible vitesse (<200 km/h). Afin de s'assurer de la validité des résultats, il a été nécessaire d'effectuer une étude de sensibilité sur le maillage et de respecter un découpage rigoureux afin de prendre en considération la circulation des courants induits.

L'intérêt de cette première partie sur l'étude d'un frein à courants de Foucault a permis de valider les caractéristiques utilisées pour les matériaux : la perméabilité μ et la conductivité σ .

Une seconde partie présente l'optimisation d'un FCF mais *linéaire* dans le cadre d'une application au T.E.R. (trains régionaux) en conservant les acquis sur les matériaux utilisés et la démarche de discrétisation du maillage (détaillée dans la partie II, § III sur l'optimisation par plans d'expériences).

L'inconvénient de l'approche concernant les temps de calculs : 10 à 15h pour un point de fonctionnement, il faudra par conséquent trouver des méthodes d'optimisation autres que celles de type algorithmique. **Cette partie a été détaillée dans le chapitre III.**

Références

- [Del-93] P. Delsalle, "Rapport interne sur les Freins à Courants de Foucault – approche analytique", Mars 93.
- [Fuj-98] Fujita M., Tokumasu T., Yamada T., "3-Dimensional Electromagnetic Analysis and Design of an eddy-current rail brake system", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.34, N°5, pp3548-3551, September 98.
- [Inr-96] Inrets-96, "Frein linéaire à courants de Foucault : Rapport d'essais d'un prototype de frein", 1996-1997, Rapport interne Alstom-Ornans.
- [Lam-66] Lammeraner J., Stafel M., "Eddy currents", Iliffe Books Ltd. - London (SNTL), 1966.
- [Seo-01] Seok Myeong J., Sang Do C., Jung Ho L., "The Characteristics Analysis of Eddy-Current Brake System using Halbach Array of Permanent Magnet", " , Compumag 2001, Evian, June 2001, Vol. 3, pp 132-133.
- [Sem-01] Semyung Wang, Sunggon Na, Jungpyo Hong, 'Dynamic analysis of eddy current braking system using FEM.', Compumag 2001, Evian, June 2001, Vol.3, pp84-85.
- [Sto-74] Stoll R. L., "The analysis of eddy currents", Clarendon press – Oxford, Monographs in electrical and electronic engineering, 1974.
- [Vec-92] Vector Fields software: Tosca and Elektra 3D and Pc-opera 2D, Reference manuals, 1992 – Site web: <http://www.vectorfields.com/>.
- [Wia-73] A. Wiart, Machefert-Tassin Y., "Les Freins Linéaires à Courants de Foucault sur Rail", RGE 1973, Tome 82, N°5, Mai 73, pp.356-359.

ANNEXE 2

Plaque de l'équipe COME

(Plaquette réalisée par F. Gillon)



Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille

Equipe

Conception et Optimisation des Machines Electriques

Les travaux de l'équipe COME se situent au carrefour de la conversion électromécanique et des méthodologies de conception. Ils concernent plus particulièrement la conception optimale et l'ingénierie virtuelle des machines électriques.

L'équipe est constituée de 1 professeur, 4 maîtres de conférences et de 9 doctorants.

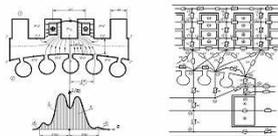


Photo du 5 octobre 2004

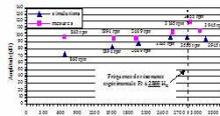
Thématiques

Prototypage virtuel

La modélisation du dispositif à concevoir est l'étape clé du processus de conception. Le modèle est l'ensemble organisé des connaissances acquises sur le dispositif. A partir des seules spécifications, il doit permettre de synthétiser le dispositif. L'électrotechnique fournit de nombreux modèles. La plupart doivent être adaptés, complétés et orientés par l'objectif de conception. Il est, entre autres, nécessaire de prendre en compte les phénomènes thermiques, mécaniques, aérodynamiques, vibratoire et acoustiques



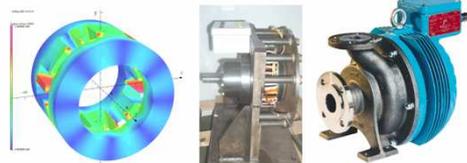
Exemple de représentation d'un réseau de perméances (MPEI).



Comparaison simulations / relevés expérimentaux sur l'amplitude de l'harmonique de rang douze (effet de denture) pour différentes vitesses de rotation (Spectre Vibratoire)

Réalisation

Cette activité est indispensable, d'une part pour valider les modèles et progresser dans la démarche de modélisation en se confrontant aux mesures et d'autre part pour se mettre en situation d'exploitation des méthodes et outils développés, et en assurant le retour d'expérience. L'accent est mis sur la réalisation de bancs de test, la caractérisation expérimentale des prototypes et la validation des démarches de conception. Les prototypes sont le plus souvent réalisés par nos partenaires industriels.

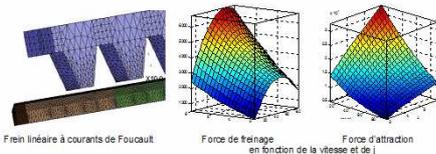


Structure à flux axial et bobinage concentré. On note la présence d'une dent intercalée. Au centre le prototype. A droite, une vue de la pompe dans laquelle s'intègre le moteur. On remarque la compacité exceptionnelle de l'ensemble.

Conception & Optimisation

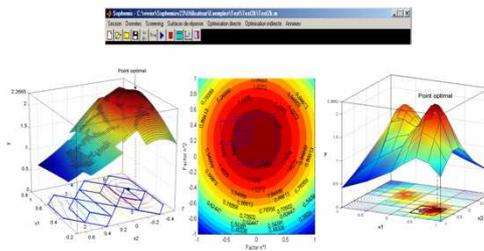
La malléabilité des prototypes virtuels développés permet la mise en œuvre des techniques de l'optimisation. Il est alors nécessaire non seulement de tester mais aussi de développer les méthodes de l'optimisation numérique les mieux adaptées à la conception électromagnétique des dispositifs électrotechniques. L'objectif poursuivi est de dégager des méthodes de conception et de proposer des outils logiciels adaptés.

- ☑ Méthodes d'optimisations directes
- ☑ Méthodes stochastiques
- ☑ Méthode des plans d'expériences



Frein linéaire à courants de Foucault Force de freinage en fonction de la vitesse et de j Force d'attraction

Etude d'un frein linéaire à courants de Foucault : Surfaces de réponse des forces de freinage et d'attraction.



Trois stratégies d'optimisation par plan d'expériences proposées par SOPHEMIS. De gauche à droite : glissement de plan, zoom successifs, exhaustive.

Collaborations :

Industrielles :

- ALSTOM Transport
- Framatome ANP- Jeumont

Universitaires :

- Moscow Power Engineering Institute (MPEI)
- Laboratoire de Mécanique et d'Energétique de l'Université de Valenciennes (LME).
- Technical University of Gdansk (TUG)
- Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENT)

Contact : Pascal Brochet, Ecole centrale de Lille

Tél : 03 20 33 54 28
Mail : pascal.brochet@ec-lille.fr



Hautes Etudes de Lille (HEI)



Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL)



Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers centre de Lille



Ecole Centrale de Lille (EC Lille)

ANNEXE 3

Résumé Programme 'FUTURELEC3'

Programme FUTURELEC 3

Objet

‘Machines Electriques à Faible Impact Environnemental pour les transports du futur’.
Démarrage en Octobre 2004.

Partenariat

ALSTOM TARNSPORT : Ornans (G. TRIPOT - A. RANDRIA)
Tarbes (L. NICOD)
Charleroi (JE MASSELUS)

LABORATOIRES: L2EP, LME

(Financement : Etat, Région Nord Pas de Calais, Feder)

Coordination : Michel HECQUET

Objectif des thèses correspondant aux opérations 1 et 2.

Thèse 1 : Aurélie FASQUELLE

**Opération 1 : Conception et Optimisation Multi-objectif : Electro-vibro-acoustique et
Thermique de machines électriques de traction »
‘COMET’**

Les objectifs généraux du projet :

Notre objectif concerne la conception électromagnétique et thermique d’une machine asynchrone de traction ferroviaire d’une puissance élevée sous contraintes de minimisation du bruit aérien rayonné et du niveau de température.

Il faudra prendre en considération la réduction des encombrements et des masses, des coûts et des nuisances comme le bruit et les vibrations ; d’autre part d’apporter une réponse concrète et générale au problème scientifique de l’optimisation multi-physique et multi-objectif dans le contexte de la conception en électrotechnique qui est nécessairement multi-physique.

Thèses 2 & 3 : F. MOUSSOUNI et S. KREAWAN :

Opération 2

CONCEPTION OPTIMALE SYSTEMIQUE DE CHAÎNES DE TRACTION FERROVIAIRE (OSCAR)

Ce projet s'inscrit dans les actions de recherche technologique menées par le CNRT 'Réseaux et Machines Electriques du Futur'.

A ce titre, il a deux ambitions :

- d'une part de développer des chaînes de traction ferroviaires optimisées améliorant les performances technico-économiques et environnementales des systèmes de transport public. En effet, aujourd'hui, la démarche de conception des chaînes de tractions ferroviaires n'utilise pas le potentiel des techniques d'optimisation. Appliquer ces outils aux métiers ferroviaire (électronique de puissance, thermique, mécanique, acoustique, coûts, fiabilité, etc...) permet de créer des produits plus adéquats aux besoins tant du point de vue économique qu'environnemental.

- d'autre part d'apporter les outils nécessaires en terme d'optimisation globale et multi-objectif.

L'objectif recherché par ALSTOM-TRANSPORT est d'utiliser autant que possible les outils actuels de conception et d'optimisation afin de les inclure dans une démarche de conception optimale globale.

Il sera ainsi nécessaire de recenser ces outils et d'appréhender les méthodes actuelles de dimensionnement. Une première bibliothèque de modèles (Cycle de fonctionnement, moteurs électriques, convertisseurs, thermiques, réducteurs) en sera déduite.

Ainsi, deux sujets complémentaires sont proposés. Le premier sujet (Thèse de S. Kreawan), s'intéressera aux développements de modèles adaptés à la démarche globale d'optimisation de la chaîne de traction et à la modélisation systémique, tandis que le deuxième sujet (F. Moussouni) approfondira les outils d'optimisation et méthodes nécessaires pour gérer des problèmes de grandes dimensions avec des facteurs de types discrets et continus.

ANNEXE 4

Outil 'SOPHEMIS'

(Thèse de S. VIVIER [Th.2])

OUTIL 'SOPHEMIS'

SOPHEMIS : Supervieur d'OPTimisation de macHines Electriques ModelliséeS

■ Sophemis: intérêt

Automatise le lancement des simulations

Automatise la récupération et le traitement des résultats

Permet le calcul de Plans d'Expériences

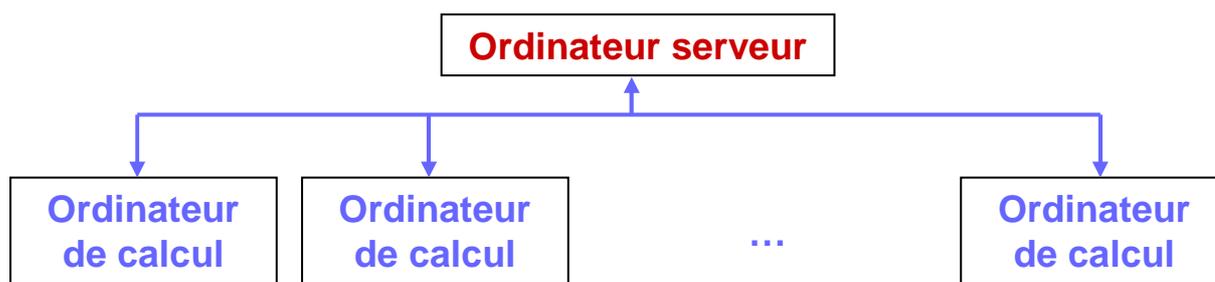
Permet l'application d'algorithmes d'optimisation (par PE, ...)

Interface sous Matlab®

Interface avec EXCEL et OPERA® (Code éléments finis)

■ Sophemis: caractéristiques

Permet de calcul distribué (réparti sur plusieurs ordinateurs)



L'application Sophemis possède des fonctionnalités pouvant être regroupées en 3 parties :

➤ Evaluation des réponses

Sophemis permet de réaliser chaque expérience virtuelle de manière totalement automatique. Les fonctions réponses peuvent être issues de fonctions analytiques ou de simulations éléments finis.

➤ Réalisation des calculs

De la même manière, le déroulement des calculs (plans d'expériences, optimisations) est également totalement automatique. Il suffit de fixer les paramètres caractéristiques et de lancer les calculs : l'intervention de l'utilisateur n'est alors plus nécessaire.

➤ Exploitation des résultats

Une fois les calculs achevés, l'exploitation des résultats peut être menée. On considérera ici :

- l'analyse des données de simulation ;
- la représentation graphique des données de simulation.

Sophemis peut également être caractérisé par d'autres points importants, tels que :

- le lancement de séries de simulations sur plusieurs ordinateurs distants (calcul distribué avec configuration maître-esclave);
- la modularité complète de l'application (toutes les fonctionnalités de Sophemis sont vues comme des briques élémentaires ajoutées à un noyau fixe);
- l'existence d'une aide HTML renseignant sur le fonctionnement général, les fonctions mathématiques employées et sur la programmation interne permettant son fonctionnement.

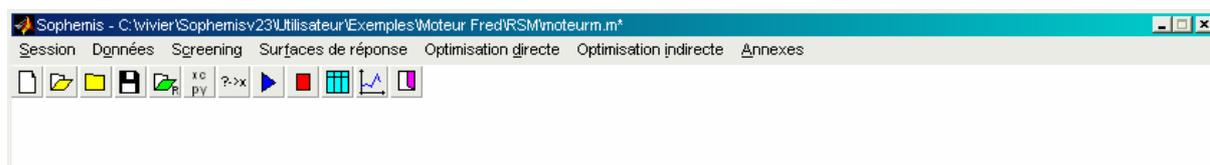
Interface – aspect visuel

L'application Sophemis se présente comme la réunion de 2 fenêtres.

La *fenêtre principale* possède une barre de menu et une autre de boutons. Sa fonction est de donner accès aux différentes commandes de l'application. Cette fenêtre ne sert pas à l'affichage des données, il s'agit uniquement d'une console.

La seconde fenêtre (ou *fenêtre secondaire*) permet d'afficher les informations données par l'expérimentateur pour la réalisation de ses calculs.

Fenêtre principale



Vue de la fenêtre principale de Sophemis (*exemple*)

La barre de menu est l'accès privilégié aux commandes de l'application.

Le contenu de ces menus peut être modifié par l'ajout ou la suppression de modules

Le tableau suivant donne le contenu de tous les menus et sous-menus. Les items indiqués en italique sont des fonctionnalités apportées par des modules. Certains modules sont cités dans plusieurs sous-menus, car ils peuvent être utilisés dans différentes configurations.

Des items de menu peuvent devenir inaccessibles (ils apparaissent alors en grisé). Cela tient au fait que les fonctionnalités sous-jacentes ne peuvent être appliquées dans ces situations. Ainsi, par exemple, il sera impossible de calculer et d'afficher les effets des facteurs principaux si le dernier calcul réalisé a été celui d'un plan de RSM.

Liste des items des menus et sous-menus de Sophemis

Session	Nouvelle		
	Ouvrir		
	Enregistrer		
	Enregistrer sous ...		
	Fermer		
	Charger un fichier de résultats		
	Calculs multi-ordinateurs		
	Outils		Répertoire par défaut
			Fenêtre des paramètres
			Editer un fichier de session
		Editer le fichier de session courant	
		Editer un fichier de résultats	
		Editer le fichier de résultats courant	
	Sauvegarder les résultats en mémoire		
	Quitter		
Données	Origine des données		
	Variables		
	Contraintes		
	Modèles		
	Fonction réponse		
Screening	Sélectionner plan		
	Plans fractionnaires		
	Calculs	Résidus	
		Effets	
		ANOVA	
Représentations graphiques	Effets principaux et Interactions (Hist.)		
	Représentation de Daniel		
	Effets		
Surfaces de réponse	Sélectionner plan		
	Etudier l'optimalité		
	Créer une matrice D-optimale		
	Créer une matrice D-optimale approximative		
	Calculs	Résidus / Observations	
		Analyse statistiques	
		Meilleurs modèles	
		Calculer la réponse	
		Calculer la fonction de variance	
		ANOVA sur modèles	
	Analyse canonique		
	Représentations graphiques	Réponse calculée – réponse mesurée	
		3 facteurs – $\alpha=2$	
		2 facteurs	
3 facteurs par interpolations			
2 facteurs par interpolations			
Représenter la fonction de variance			
Optimisation directe	Sélectionner méthode		
	Convertir en surfaces de réponse		
	Calculs	Calculer la réponse (interpolation)	
		Toutes les réponses	
Représentations graphiques	3 facteurs par interpolations		
	2 facteurs par interpolations		
Optimisation indirecte	Sélectionner méthode		
	Fonction d'optimisation		
	Représenter la fonction d'optimisation		
	Calculs	Calculer la réponse (interpolation)	
		Toutes les réponses	
Représentations graphiques	3 facteurs par interpolations		
	2 facteurs par interpolations		
Annexes	Options ...		
	MatOptTools		
	Aide générale HTML		
	A Propos ...		