



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers ParisTech researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/10304>

#### **To cite this version :**

Jean-Frederic CHARPENTIER - Habilitation à Diriger les Recherches : Contribution à la modélisation analytique des systèmes électromagnétiques basse fréquence au sein de leur environnement en vue de leur conception - 2010

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository  
Administrator : [archiveouverte@ensam.eu](mailto:archiveouverte@ensam.eu)



# UBO

université de bretagne  
occidentale



Mémoire d'HDR / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE  
OCCIDENTALE

*sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne*

en vue d'obtenir  
l'Habilitation à Diriger les Recherches  
préparée à l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale (EA 3634)

présentée par

**Charpentier  
Jean-Frédéric**

## Contribution à la modélisation analytique des systèmes électromagnétiques basse fréquence au sein de leur environnement en vue de leur conception



**soutenue le 30 novembre 2010**  
devant le jury composé de :

**Bernard Multon**

Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, rapporteur

**Alain Nicolas**

Professeur à l'Ecole Centrale de Lyon, rapporteur

**Pascal Brochet**

Professeur à l'Ecole Centrale de Lille, rapporteur

**Christian Brosseau**

Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale, Examineur

**Mohamed El Hachemi Benbouzid**

Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale, Examineur

**Stephane Clenet**

Professeur aux Arts et Métiers Paris Tech, Examineur

## *Avant Propos*

*Ce document est présenté en deux parties qui peuvent être consultées indépendamment. La première est une notice bibliographique qui décrit succinctement mes activités de recherche, mes activités administratives et mes activités d'enseignement. La deuxième partie est une tentative de synthèse des différents travaux de recherche dans lesquels je me suis investi à partir de mon doctorat. Cette deuxième partie se termine par des perspectives de recherche dans le contexte particulier de l'IRENav .*

*Le travail présenté ici, regroupe des travaux personnels mais aussi des travaux issus de co-encadrement ou de supervision. Ainsi les docteurs et futurs docteurs **Javier Rios-Quesada, Franck Sculler, Seifeddine Benelghali, Laurent Drouen et Fatiha Mekri** ainsi que des étudiants que j'ai encadrés en Master Recherche et DEA, **Philippe de Oliveira, Fabrice Quénéhervé, Laurent Baldeck, Gwenael Bonizec, Arnaud Thoreux et Aro Ramarotafika** ont participé à ces travaux. Ce document n'aurait pas de sens sans leur contribution. Pour situer les contributions de chacun, je me suis efforcé de citer les références des mémoires et des publications les plus significatives tout au long du texte.*

## Remerciements

*Je tiens tout d'abord à remercier*

- **M. Bernard Multon**, professeur à l'ENS de Cachan antenne de Bretagne pour avoir accepté de rapporter sur ce document et ce malgré le fait qu'il soit toujours extrêmement sollicité pour de nombreux jurys et expertises. Je tiens à dire que le privilège de pouvoir échanger avec Bernard Multon, depuis plusieurs années à l'occasion de rencontres et lors des travaux du CNU, a beaucoup apporté à ma réflexion personnelle.
- **M. Alain Nicolas**, professeur à l'Ecole Centrale de Lyon, Directeur de l'Ecole Doctorale EEA de Lyon, Président de la section 63 du CNU, pour m'avoir fait l'honneur de rapporter sur ce travail malgré les lourdes charges qui sont les siennes. J'ai particulièrement apprécié la discussion scientifique quasi-philosophique que nous avons eue à l'occasion de ma soutenance.
- **M. Pascal Brochet**, professeur à l'Ecole Centrale de Lille, pour avoir accepté, après avoir examiné ma thèse en 1996, cette nouvelle mission de rapporter sur ce travail. J'ai particulièrement apprécié sa vision pragmatique et l'éclairage scientifique qu'il a donné sur mes travaux.
- **M. Christian Brosseau**, Professeur à l'UBO, pour avoir accepté de présider ce jury d'HDR, et pour avoir apporté, toujours avec humour, sa vision de physicien sur mes travaux.

*Je tiens à remercier toutes les personnes avec qui j'ai été amené à travailler au cours de ces dernières années.*

*Tout d'abord, le travail présenté ici, est en mon sens la synthèse d'un travail collectif, qui doit beaucoup aux étudiants que j'ai encadrés et co-encadrés et aux post-doctorants que j'ai supervisés. J'éprouve une profonde gratitude pour les docteurs et futurs docteurs, **Javier Rios-Quesada, Franck Sculler, Seifeddine Benelghali, Laurent Drouen et Fatiha Mekri** ainsi que pour les étudiants que j'ai encadrés en Master Recherche et DEA, **Philippe de Oliveira, Fabrice Quénéhervé, Laurent Baldeck, Gwenael Bonizec, Arnaud Thoreux et Aro Ramarotafika**. Ils ont été la cheville ouvrière de l'essentiel des travaux présentés ici et ce document n'aurait pas de sens sans leurs contributions.*

*Que les collègues électrotechniciens avec lesquels j'ai collaboré de manière étroite au cours de ces dernières années soient également remerciés. Je pense notamment à mes camarades lillois, **Eric Semail et Stéphane Clenet**, et brestois, **Mohamed Benbouzid**, qui ont permis de donner une dimension supplémentaire à ces travaux. **Stéphane** et **Mohamed** ont su également me conseiller et me soutenir dans les phases de rédaction de ce mémoire et de préparation de la soutenance. Je tiens à les remercier également pour avoir accepté de participer au Jury de cette HDR.*

*Je tiens également à remercier l'ensemble des enseignants-chercheurs et du personnel de l'Ecole Navale en général et de l'IRENav, en particulier, qui m'ont supporté depuis 2002. J'ai une pensée particulière pour **Jacques-André Astolfi, Frédéric Hauville, Thomas Damay et Christophe Claramunt** avec lesquels nous avons élaboré des projets transverses autour des énergies de la mer malgré (ou grâce) à nos différences de culture scientifique.*

*Je tiens également à remercier la Marine Nationale qui m'a permis de développer mes travaux d'enseignement et de recherche dans un environnement atypique mais favorable au sein de ce fier et attachant vaisseau de pierre qu'est « la baille ». Malgré les différences de culture professionnelle, j'ai apprécié les qualités de droiture, le sens du service, les qualités humaines et l'humour toujours indispensable des marins qui servaient ce bateau pas comme les autres.*

*Je tiens également à remercier **Philippe Elies et Maurad Berkouk** qui ont été mes compagnons de travail durant mes premières années de carrière au LEMB à l'UBO. Ils ont alors été un soutien dans un contexte de travail qui était parfois complexe.*

*Je tiens également à remercier **Michel Lajoie-Mazenc, Yvan Lefevre, Philippe Viarouge et Jérôme Cros** qui m'ont supervisé en thèse et en post-doctorat. Ils ont toujours constitué des références indiscutables pour moi en termes d'éthique scientifique, d'approche de l'enseignement et de la recherche et de capacité d'innovation.*

*Enfin, je tiens à remercier particulièrement, ma compagne depuis 1989, **Céline Gabillet**, qui m'a toujours encouragé, soutenu (et supporté) à la maison comme au travail ainsi que mon fils **Malo** qui a du souvent s'accommoder d'un papa très occupé.*

# Table des Matières

<b>Partie A : NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	1
D) <i>Curriculum vitae bref</i> .....	2
1.1 Etat Civil.....	2
1.2 Cursus.....	2
II) <i>Résumé des activités de recherche</i> .....	3
1 Présentation globale des activités.....	3
1.1 Activités de 1993 à fin 2001.....	3
1.2 Activités depuis début 2002.....	4
Bilan general chiffré des Activités de recherche depuis 1993.....	4
2 De 1993 à 1996 Activités de recherche au L.E.E.I. (INP Toulouse/ENSEEIH).....	4
1993 : DEA de Genie Electrique : étude des micromachines électrostatiques.....	4
1993-1996 : Doctorat : Modelisation des ensembles convertisseurs machines electriques.....	4
2.1 De novembre 1996 à septembre 1997 : Stage post-doctoral (LEEPCI, Université Laval (Québec)) : Modélisation et optimisation de structures magnétiques.....	5
2.2 De 1997 à décembre 2001, Activités de recherche au L.E.M.B. (UBO- IUT de Brest) : Modélisation et optimisation de systèmes magnéto-mécaniques et de machines spéciales.....	6
2.2.1 Cadre de recherche.....	6
2.2.2 Thème concernant les systèmes magnéto-mécaniques à aimants permanents.....	6
2.2.3 Thème concernant la conception et modélisation de machines à aimants permanents.....	7
2.3 Activités depuis début 2002 à l'IRENav.....	8
2.3.1 Cadre de recherche.....	8
2.3.2 Problématique de recherche.....	8
2.3.3 Travaux menés et en cours de réalisation a l'IRENAV (EA 3634).....	9
2.3.4 Bilan sur la période 2002-2009.....	14
2.4 Activités de rayonnement et d'expertise scientifique.....	14
2.4.1 Activités d'expertise scientifique.....	14
2.4.2 Activités de rayonnement scientifique.....	15
2.5 Activités de recherche Collaboratives.....	16
2.5.1 Collaborations académiques.....	16
2.5.2 Collaborations scientifiques industrielles.....	17
III) <i>Résumé des activités d'enseignement</i> .....	17
1 Présentation synthétique de mon service d'enseignement.....	17
2 Activités de coordination et de mise en place d'enseignements.....	18
2.1 Activités de coordination de l'enseignement de génie électrique.....	18
2.2 Activités de mise en place d'enseignement.....	19
IV) <i>Responsabilités administratives et Collectives</i> .....	20
1 Responsabilités Administratives à caractère Pédagogique.....	20
2 Commissions de Spécialistes et comités de sélection.....	20
3 Responsabilités Nationales.....	20
V) <i>Liste de publications et travaux</i> .....	21
1 Articles publiés dans des revues internationales.....	21
2 Articles publiés dans des conférences internationales.....	22
3 Communications dans des conférences nationales.....	24
4 Revue nationale :.....	24
5 Rapports de contrats industriels.....	24
6 Mémoires de thèse et de Master Recherche encadrés.....	24
<b>Partie B : RAPPORT DE SYNTHÈSE</b> .....	26

I)	<i>Genèse et Contexte de mes activités de Recherche</i> .....	27
1	Introduction.....	27
2	Travaux sur le calcul du champ numérique. ....	27
3	Evolution du contexte de mes activités de recherche.....	32
4	Conclusion .....	34
II)	<i>Utilisation de Modèles analytiques basés sur la résolution des équations aux dérivées partielles de Maxwell</i> .....	36
1	Introduction.....	36
2	Rappels sur la représentation et calcul des grandeurs de base d'une machine à aimants à pôles lisses à aimants déposés en surface.....	36
2.1	Hypothèses de base.....	37
2.2	Représentation du bobinage.....	38
2.3	Représentation des aimants .....	40
2.4	Expression des grandeurs globales.....	41
2.4.1	Expressions des flux vus par le bobinage .....	41
2.4.2	Expression de la Force électromotrice et du couple électromagnétique.....	42
2.5	Prise en compte des effets locaux de denture.....	42
3	Résolution au premier ordre du champ dans l'entrefer pour une machine à pôles lisses à aimantation radiale.....	43
3.1	Principes des calculs.....	43
3.2	Application à des problèmes de dimensionnement ou d'optimisation multi physiques.....	45
3.2.1	Généralités.....	45
3.2.2	Exemple d'un dimensionnement optimal d'un ensemble machine hélice de type RIM-Driven pour la propulsion.....	46
3.2.3	Pré dimensionnement multi-physique d'un système de stockage inertiel.....	47
4	Utilisation de modèles basés sur la résolution analytique par séparation de variables de l'équation de la magnétostatique.....	49
4.1	Présentation du principe de résolution.....	49
4.1.1	Hypothèses .....	49
4.1.2	Expression de l'équation de la magnétostatique.....	50
4.2	Application au calcul du champ dans des structures particulières.....	50
4.2.1	Application aux machines tournantes à pôles lisses à aimants permanents déposés en surface.....	50
4.2.2	Application au calcul du champ d'induit d'une machine linéaire à stator long.....	59
5	Conclusion .....	64
III)	<i>Utilisation de méthodes de calcul de champ de type intégration spatiale de sources élémentaires dans le vide</i> .....	66
1	Introduction.....	66
2	Représentation des sources de champ.....	66
2.1	Aimants permanents.....	66
2.1.1	Approche Coulombienne.....	66
2.1.2	Approche Ampérienne.....	67
2.2	Bobinages.....	68
2.3	Prise en compte de culasses ferromagnétiques au sein d'un entrefer.....	68
3	Calcul du champ dans les zones d'interaction.....	70
3.1	Calcul des champs créés par une répartition de charges.....	70
3.2	Cas d'une répartition de courants.....	71
4	Calcul par la représentation des aimants par les masses magnétiques des caractéristiques de machines électriques non conventionnelles.....	71
4.1	Calcul du champ à vide sur une machine discoïde à aimants.....	72
4.2	Calcul du Champ à vide dans une machine linéaire à aimants permanents à stator long et navette courte.....	74
4.3	Calcul de la FEM et optimisation dimensionnelle d'une machine à aimants prismatiques.....	76
4.4	Etude de machines monophasées spéciales à bobinages triangulaires et à aimants triangulaires, rectangulaires ou trapézoïdaux.....	79
4.5	Prise en compte des effets d'extrémités dans une machine courte à grand entrefer.....	84
4.6	Exemple de calcul à partir de la représentation des sources par des courants : calcul du champ dans le bobinage supraconducteur d'un propulseur MHD de navire.....	86

5	Calcul des forces magnétiques dans des systèmes magnéto mécaniques passifs à aimants.....	89
5.1	Généralités.....	89
5.2	Principe du calcul des forces.....	90
5.3	Configurations particulières.....	91
5.4	Validation numérique des méthodes sur des cas tests.....	93
5.5	Exemples de calculs d'accouplements et d'engrenages magnétiques.....	96
6	Conclusion.....	102
IV)	<i>Perspectives de recherche</i> .....	103
1	Bilan des travaux menés sur la modélisation et évolution future de ces travaux.....	103
2	Perspectives sur la conception et la modélisation de systèmes électromagnétiques non conventionnels pour les applications maritimes.....	104
2.1	Perspective sur l'étude de structures électromagnétiques non conventionnelles pouvant être intégrées avec des systèmes hydrodynamiques pour des applications maritimes.....	104
2.1.1	Travaux à venir sur la modélisation et la conception de systèmes machines hélices.....	104
2.1.2	Poursuite des travaux menés à l'IRENav sur les turbines à axe transverse.....	108
2.1.3	Perspectives sur l'étude et la modélisation de systèmes électromagnétiques de contrôle d'écoulements.....	110
2.2	Vers des machines polyphasées pouvant répondre aux exigences particulières de la propulsion navale.....	112
2.2.1	Vers des concepts permettant une meilleure gestion des modes dégradés.....	113
2.2.2	Vers des machines polyphasées conçues pour l'alimentation multi machines par un même onduleur.....	113
2.3	Des techniques de dimensionnement systématique à des techniques d'optimisation élaborées.....	114
3	Vers la conception et la modélisation globale des systèmes en environnement maritime.....	114
3.1	Participation à la modélisation globale de la chaîne d'énergie des systèmes d'énergie renouvelable marine.....	115
3.2	Implications transverses dans la création de systèmes d'information géographique pour les systèmes d'énergie renouvelable marine.....	119
4	Conclusion sur les perspectives.....	121
V)	<i>Annexes</i> .....	122
1	Expression du potentiel vecteur dans le cas d'une machine linéaire.....	122
2	Expression du champ créé par une plaque chargée magnétiquement.....	123
3	Expression de l'induction créé par deux nappes parallèles de courant (cas du propulseur magnétohydrodynamique).....	124
	Bibliographie.....	125

## **Partie A : NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE**

# I) Curriculum vitae bref

## 1.1 Etat Civil

Charpentier Jean-Frédéric

Né le 6/12/1969 à Tananarive (Madagascar)

Maître de Conférences à l'Ecole Navale/ IRENAV (EA 3634)

Adresse Professionnelle :

Institut de Recherche de l'Ecole Navale (IRENAV)

BRCM BREST ECOLE NAVALE ET GROUPE DES ECOLES DU POULMIC

CC 600 - 29240 BREST Cedex 9 - FRANCE

Tel : +33 (0) 2 98 23 38 69

Fax : +33 (0) 2 98 23 38 57

<http://www.ecole-navale.fr/-J-F-Charpentier-.html>

email : [jean-frederic.charpentier@ecole-navale.fr](mailto:jean-frederic.charpentier@ecole-navale.fr)

Adresse personnelle : 26 route de l'Aber 29160 CROZON

## 1.2 Cursus

**1987-1990** : Classes Préparatoires scientifiques aux Grandes Ecoles (Lycée Montaigne Bordeaux).

**1990-1993** : **Etudes d'Ingénieur à l'ENSEEIH de Toulouse (option Electrotechnique-Automatique).**

**1993** : **DEA de Génie Electrique de l'INP Toulouse en parallèle du diplôme d'ingénieur de l'ENSEEIH.**

**1993-1996 Doctorat (INPT/ENSEEIH/LEEI)**

-Préparation d'un doctorat, soutenu en octobre 1996, au LEEI/ENSEEIH sur la modélisation des ensembles convertisseurs statiques/machines électriques (TH avec félicitations).

-Activités d'enseignement en électrotechnique/automatique en tant que vacataire à l'ENSEEIH de Toulouse (formation ingénieur, environ 100h/an).

**1996-1997** : **Année post-doctorale à l'Université Laval à Québec au Canada.**

-Activités de recherche sur la conception optimale de machines électriques.

-Activités d'enseignement en génie électrique à l'Université Laval (Bsc et Msc génie électrique, environ 30h).

-Activités industrielles contractuelles

**1997-2002** : **Maître de conférences à l'Université de Bretagne Occidentale (Brest)**

-Activités de recherche au LEMB/IUT de Brest sur la conception de systèmes électromécaniques.

-Activités d'enseignement en génie électrique à l'Université de Bretagne Occidentale (IUT, licence et maîtrise EEA).

## **2002 : Mutation sur un poste de maître de conférences à l'ENSAM en délégation à l'Ecole Navale.**

### **Depuis 2002: Maître de conférences à l'Ecole Navale**

- Activités de recherche au sein du groupe M2EN de l'IRENAV (EA 3634) sur les systèmes de conversion d'énergie en environnement naval.
- Activités d'enseignement à l'Ecole Navale en génie électrique.
- Responsabilités pédagogiques (coordination de l'ensemble des activités liés à la conversion d'énergie électrique)
- Activités administratives en tant qu'adjoint au Directeur de l'Enseignement Scientifique (2005-2007) puis en tant que responsable de la VA (option) Génie Energétique (2007-2010) puis en tant que coordonateur pour l'Ecole Navale du Master spécialisé Energies Marines Renouvelables (2010...).
- Activités de recherche contractuelle

## **II)Résumé des activités de recherche**

Dans ce document je m'attacherai tout d'abord à décrire globalement l'ensemble de mes activités de recherche depuis le début de mes travaux en tant qu'étudiant de 3<sup>ème</sup> cycle jusqu'à aujourd'hui. Je me consacrerai ensuite à la description plus en détail de mes activités de recherche depuis ma nomination en 1997 en tant que maître de conférences à l'Université de Bretagne Occidentale (UBO) puis à l'école Navale à partir de 2002.

### **1 Présentation globale des activités**

#### **1.1 Activités de 1993 à fin 2001**

De 1993 à 1996 j'ai préparé un DEA soutenu en 1993 puis un doctorat soutenu en octobre 1996 (TH avec félicitations) au LEEI (INPT/ENSEEIH) sous la direction de M. Lajoie-Mazenc (DR CNRS). Mon doctorat portait sur la modélisation des ensembles convertisseurs statiques/machines électriques par couplage des équations du champ et du circuit électrique.

De 1996 à 1997 j'ai effectué une année post doctorale au LEEPCI (Université Laval, Québec, Canada). J'y ai travaillé sur la conception optimale de structures électromagnétiques dans le cadre d'un contrat FCAR (Font de Recherche Canadien).

De 1997 à janvier 2002, en tant que maître de conférences à l'IUT de Brest (Université de Bretagne Occidentale) où j'avais été nommé en septembre 1997, j'ai effectué mes activités de recherche au sein du Laboratoire d'Electrotechnique et de Magnétisme de Brest (LEMB) dirigé par le Pr. Lemarquand. Au LEMB, je me suis investi dans la mise en place et le développement de deux thématiques de recherche. La première portait sur la modélisation analytique et numérique et la conception optimale de systèmes magnétomécaniques à aimants permanents. La deuxième portait sur la modélisation et la conception de machines électriques à aimants permanents. L'activité du LEMB s'est arrêtée fin 2001 suite au non-renouvellement de la reconnaissance du laboratoire par le Conseil Scientifique de l'Université de Bretagne Occidentale en septembre 2001 et à une restructuration des activités de recherche à l'IUT de Brest.

## 1.2 Activités depuis début 2002

Depuis janvier 2002, j'exerce des activités de recherche à l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale (IRENav EA 3634). J'ai tout d'abord travaillé en tant que chercheur invité de janvier 2002 à septembre 2002. Puis, suite à ma mutation (septembre 2002) sur un poste à l'ENSAM en délégation à l'Ecole Navale de Brest, je travaille maintenant à l'IRENav en tant que maître de conférences à l'Ecole Navale.

Au sein du groupe de recherche sur la mécanique et l'énergétique en environnement naval (M2EN) de l'IRENav qui comprend 2 axes principaux (hydrodynamique et conversion d'énergie), je coordonne l'axe de recherche sur la conversion d'énergie. Les activités de cet axe de recherche concernent la conception de machines électriques et de dispositifs électromagnétiques en environnement naval et les systèmes de récupérations d'énergie marine. Les participants aux activités de cet axe sont actuellement au nombre de 6 (3 maîtres de conférences : F. Hauville, T. Damay (mécanique) et JF Charpentier (électrotechnique), 2 ATER : F. Mekri et T. Azib (électrotechnique, depuis la rentrée 2010) et 3 doctorants : B. Paillard (mécanique en fin de thèse), L. Drouen (électrotechnique, en fin de thèse) et depuis la rentrée 2010S. Djebbari (électrotechnique)

### **Bilan general chiffré des Activités de recherche depuis 1993**

<b>Publications</b>	<b>23 articles en revues internationales, 1 article en revue nationale, 33 communications internationales, 6 communications nationales</b>
<b>Thèses encadrées soutenues</b>	<b>3 : J. Rios Quesada (40%, octobre 2002), F. Sculler (55%, décembre 2006), S. Benelghali (50%, décembre 2009),</b>
<b>Thèses encadrées en cours</b>	<b>2 : S. Djebbari (50%, soutenance prévue 2013) L. Drouen (55%, soutenance prévue décembre 2010)</b>
<b>Master Recherche ou DEA encadrés</b>	<b>6 : P. De Oliveira (UBO 98-99), F. Quénéhervé(INPT,2005), G. Bonizec(INPT, 2008), L.Baldeck(INPT 2009), A. Thoreux (INPL 2009), Aro RAMAROTAFIKA (AM-PT,2010)</b>

## 2 De 1993 à 1996 Activités de recherche au L.E.E.I. (INP Toulouse/ENSEEIH)

### **1993 : DEA de Genie Electrique : étude des micromachines électrostatiques**

Ce travail concernait l'étude des micromachines électrostatiques. Il s'intitulait "Modélisation et simulation de micro actionneurs électrostatiques".

### **1993-1996 : Doctorat : Modelisation des ensembles convertisseurs machines électriques**

J'ai entrepris à partir de 1993 des travaux de recherche au L.E.E.I. à Toulouse dans le groupe Machines et actionneurs à commutation électronique sous la direction de M. Lajoie-Mazenc. Ces travaux se sont inscrits dans le cadre de la préparation d'une thèse de doctorat que j'ai soutenue le 8 octobre 1996 sous le titre " Modélisation des ensembles

convertisseurs statiques machines électriques par couplage des équations du champ électromagnétique et du circuit électrique”.

Lors de ce travail qui portait sur la modélisation des ensembles convertisseurs machines électriques, une méthode générale de mise en équation systématique du système couplé constitué des équations du champ électromagnétique dans la machine électrique et des équations du circuit qui l'alimente a été élaborée. De plus une méthode originale permettant l'étude du comportement haute fréquence des éléments bobinés utilisés dans les convertisseurs statiques a été proposée. Ces méthodes ont été implémentées dans des codes de calculs (EFCAD) et ont été validées expérimentalement.

---

Ces travaux effectués au cours de mon séjour au LEEI ont fait l'objet de 4 publications dans des revues internationales [R1] [R2],[R3],[R5] et de 5 communications dans des congrès internationaux avec comités de lecture [C1] [C2],[C3],[C4],[C5].

---

## ***2.1 De novembre 1996 à septembre 1997 : Stage post-doctoral (LEEPCI, Université Laval (Québec)) : Modélisation et optimisation de structures magnétiques***

J'ai effectué une année post-doctorale au L.E.E.P.C.I. (Laboratoire d'Electronique de Puissance et de Commande Industrielle) à l'Université Laval à Québec (Canada) en collaboration avec les professeurs P. Viarouge et J. Cros.

Ce travail s'inscrivait dans le cadre d'une action concertée sur l'efficacité énergétique, financée par le soutien à la recherche du Québec (FCAR), par Hydro-Québec et par le ministère de l'énergie du Québec. Ce projet concernait la conception optimale de moteurs à haut rendement pour les applications électro-domestiques.

Le but de ce travail était d'élaborer et de mettre en œuvre des procédures de conception des machines électriques qui associent les méthodes d'optimisation non linéaires avec contraintes et les techniques de calcul du champ. On veut ainsi pouvoir optimiser le dimensionnement d'une machine électrique afin de satisfaire un cahier des charges prédéfini en se basant sur une modélisation par calcul du champ.

Dans un premier temps, nous avons mis en place des procédures qui permettent d'identifier une loi de maillage optimal (maillage qui minimise l'erreur de calcul sur une grandeur caractéristique) pour chaque type de structure électromagnétique. La connaissance de cette loi pour un type de machine permet de générer un maillage optimal quelles que soient les dimensions caractéristiques de la structure. C'est un outil préalable à l'utilisation du calcul des champs dans les procédures d'optimisation dimensionnelle des machines électriques.

Des procédures pour optimiser les dimensions des machines électriques et des structures magnétiques en fonction d'un ou plusieurs critères ont alors été réalisées. Ces outils associent des procédures d'optimisation non linéaire avec contraintes, des codes de calcul du champ et des procédures de modélisation des comportements thermiques des dispositifs. Ces procédures ont ensuite été validées par la réalisation de prototypes.

---

Globalement, ces travaux de recherche menés au LEEPCI ont fait l'objet de 3 communications dans des congrès internationaux avec comités de lecture [C7], [C8], [C9].

---

## **2.2 De 1997 à décembre 2001, Activités de recherche au L.E.M.B. (UBO- IUT de Brest) : Modélisation et optimisation de systèmes magnétomécaniques et de machines spéciales**

### **2.2.1 Cadre de recherche**

De septembre 1997 à décembre 2001, j'ai travaillé au LEMB (Laboratoire d'Electrotechnique et de Magnétisme de Brest) dirigé par le Pr. Lemarquand. (J'avais intégré, en septembre 1997, cette petite équipe créée en septembre 1996 à l'IUT de Brest du fait de ma nomination en tant que maître de conférences dans cet établissement). Je me suis investi au sein de ce laboratoire pour créer et développer deux thèmes de recherche : le premier concerne la modélisation et le développement de systèmes magnéto mécaniques à aimants permanents et le deuxième, la modélisation et la conception de machines synchrones à aimants permanents non conventionnelles.

Au début de l'année universitaire 2001-2002 la reconnaissance de l'équipe par le Conseil Scientifique de l'Université de Bretagne Occidentale n'a pas été reconduite. L'activité du laboratoire a cessé fin 2001.

---

Globalement les travaux de recherche que j'ai entrepris au LEMB ont conduit à 8 publications dans des revues internationales [R4,R6,R7,R8,R9,R10,R11,R12], 2 communications dans des congrès[C10,C11] et une communication invitée [CI1]

---

Les thèmes de recherche abordés au LEMB sont décrits succinctement à la suite.

### **2.2.2 Thème concernant les systèmes magnéto mécaniques à aimants permanents**

J'ai développé une activité de recherche sur la modélisation et le dimensionnement des dispositifs magnéto mécaniques. Je me suis particulièrement intéressé aux accouplements et aux engrenages synchrones à aimants permanents. Ces dispositifs permettent de transmettre un couple entre deux rotors sans aucun contact. Sur chacun des deux rotors sont disposés des aimants permanents. Les forces qui s'exercent à distance entre les aimants du dispositif permettent de transmettre le mouvement d'un rotor à l'autre. Les principaux critères de performance de ces dispositifs sont leur couple de décrochage qui est le couple maximal pouvant être transmis, leur coût (lié au volume d'aimant) et leur inertie. L'utilisation de ces dispositifs se développe depuis deux décennies grâce à l'évolution des matériaux magnétiques et en particulier grâce à l'augmentation significative des performances des aimants permanents de type « terres rares ».

Le but de mon travail était de contribuer à l'amélioration des performances de ce type de dispositifs en optimisant leur dimensionnement et en proposant des structures originales.

Le dimensionnement de ces dispositifs passe classiquement par un calcul du champ électromagnétique dans la structure, en utilisant la méthode des éléments finis 2D ou 3D. Nous nous sommes donc intéressés à une modélisation plus simple de ces structures. Nous avons notamment développé des procédures basées sur la représentation des aimants permanents par le modèle des masses magnétiques. Cette approche permet de calculer les forces s'exerçant entre deux aimants, soit analytiquement dans un certain nombre de cas particuliers, soit numériquement dans les autres cas. Les procédures développées permettent alors de calculer rapidement et avec une très grande précision les

caractéristiques magnéto-mécaniques des accouplements et engrenages synchrones à aimants permanents. Grâce à leur simplicité de mise en œuvre, ces outils ont pu être associés à des procédures d'optimisation non-linéaires avec contraintes. Cette approche à tout d'abord permis d'optimiser le dimensionnement des structures classiques d'accouplements, puis de mettre en évidence des structures originales particulièrement intéressantes en terme de performance, de volume d'aimant et d'inertie. Je me suis également intéressé à des cahiers des charges correspondant à des applications particulières (vissage, comportement vibratoires, efforts mécaniques parasites). Cette étude a conduit à la mise en évidence de structures originales d'accouplements et d'engrenages magnétiques.

### **2.2.3 Thème concernant la conception et modélisation de machines à aimants permanents**

#### **2.2.3.1 Problématique de Recherche**

Je me suis également investi dans un thème de recherche concernant la modélisation et la conception de machines électriques à aimants permanents non conventionnelles.

Du fait de l'évolution des matériaux magnétiques doux et en particulier du fait de l'émergence de matériaux doux composites utilisant la technologie des poudres, il est en effet possible d'envisager de construire de nouveaux types de machines. L'isotropie magnétique de ces matériaux permet en effet d'envisager des solutions où le champ magnétique suit un trajet tridimensionnel au sein de la machine.

#### **2.2.3.2 Encadrement de travaux d'un étudiant de doctorat (J Rios-Quesada) : étude d'un alternateur monophasé à aimants permanents et stator en poudre de fer à faible encombrement axial**

Dans le cadre de ce thème de recherche sur les machines à aimants permanents, j'ai participé à l'encadrement d'un étudiant de doctorat (40%). Celui-ci a soutenu sa thèse en octobre 2002.

Ce travail portait sur l'étude et le dimensionnement de machines à aimants permanents à structure tridimensionnelle et à faible encombrement axial. L'optimisation d'une machine à faible encombrement axial représente un enjeu important en vue de l'intégration des machines dans leur environnement. Il est par exemple très intéressant d'utiliser une machine à faible encombrement axial afin de fabriquer un alternateur-démarrateur placé dans la cloche d'embrayage d'une automobile. Au cours de ce travail les travaux suivants ont été effectués.

- Des modèles simplifiés permettant de calculer, dans une première approche, les performances d'une machine à aimants permanents à structure 3D, ont été élaborés.
- Plusieurs types de machines associant des rotors avec des aimants de forme triangulaire et rectangulaire et des stators dont les bobinages utilisent des géométries particulières ont notamment été étudiés et comparés. Une solution associant des aimants rectangulaires et des bobinages triangulaires a été retenue.
- Un démonstrateur a été élaboré. Le stator de ce démonstrateur est fabriqué dans un matériau composite doux issu de la technologie des poudres et comporte un bobinage triangulaire. L'élaboration de ce prototype a permis de valider expérimentalement les calculs et les choix effectués.

J Rios-Quesada est actuellement Ingénieur de R et D dans la société Moving Magnet Technologies

## **2.3 Activités depuis début 2002 à l'IRENav**

### **2.3.1 Cadre de recherche**

Depuis janvier 2002, j'effectue mes activités de recherche à l'IRENav (Institut de Recherche de l'Ecole Navale, EA 3634) dirigé par le Pr. Claramunt. Ce laboratoire aux thématiques pluridisciplinaires comprend environ 60 personnes. Mes activités s'intègrent dans celles du groupe de recherche en Mécanique et Energétique en Environnement Naval, dirigé par le MDC HDR J.A. Astolfi (environ 30 personnes). Certaines des actions de cette équipe concernent par exemple l'hydrodynamique, d'autres la conception optimale d'hélices. Il semble alors naturel, pour ce groupe, de s'intéresser également à la problématique de la motorisation électrique des systèmes de propulsion et aux chaînes d'énergies renouvelables marines.

Je suis responsable au sein de l'IRENav d'un axe de recherche concernant la conception et la modélisation de chaînes de conversion électromécanique en environnement naval. Les applications liées à ces activités concernent la propulsion électrique et les systèmes de récupération de l'énergie des courants marins. Du fait du nombre limité de chercheurs en génie électrique sur cette thématique (2 ATER un doctorant et moi-même en 2010) cette action s'appuie sur des collaborations avec des centres de recherche en électrotechnique. Nous avons établi une collaboration étroite avec le L2EP/ENSAM de Lille (sur la conception et la modélisation de machine) ainsi qu'avec le Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes, LBMS (collaboration avec l'équipe du Pr. Benbouzid sur la modélisation et la commande des chaînes de conversion de l'énergie des courants marins). Il est à noter que ces activités collaboratives concernant les hydroliennes sur la place Brestoise, ont donné lieu à la publication d'un article de synthèse dans la revue 3EI [RN].

D'autres collaborations sont en place avec des laboratoires comme le LEEPCI (Québec) (sur les machines linéaires et le calcul optimal des machines à aimants permanents). Nous sommes également en train de mettre en place des collaborations de recherche sur la modélisation des systèmes d'énergie en environnement maritime avec l'équipe de Génie Electrique de la Shanghai maritime University (Pr. Tang).

Les actions menées reposent également sur une volonté de développer des axes pluridisciplinaires mettant en jeu en plus de l'électrotechnique les autres compétences du groupe et de nos partenaires (hydrodynamique, conception mécanique, commande, détection de défauts).

### **2.3.2 Problématique de recherche**

Je m'intéresse à la problématique de la conception de machines électriques en environnement naval.

Dans ce cadre, je m'intéresse aux machines électriques de propulsion qui se développent avec l'avènement des navires tout électriques. La conception de ce type de machine doit répondre à un cahier des charges très exigeant en termes de compacité, de comportement vibratoire et de compatibilité électromagnétique ainsi qu'en termes de fiabilité aux défauts. Le mode de fonctionnement de ce type de machine correspond à des forts couples et des basses vitesses (de l'ordre de quelques centaines de tours minutes). Ceci m'a amené à m'intéresser à des solutions innovantes utilisant des machines à aimants permanents.

La modélisation et la conception de systèmes électromécaniques dédiés à la récupération des courants marins font partie également de mes axes de recherche. Il est à

noter que ces systèmes ont un certain nombre de problématiques communes avec les systèmes propulsifs tels que la compacité dans le cas des systèmes à entraînement direct et la fiabilité aux défauts.

Nous nous intéressons également aux machines spéciales permettant de répondre à des besoins spécifiques de l'environnement naval : machines linéaires pouvant être utilisées pour le catapultage d'aéronefs sur porte-avions, alternateurs rapides pour une production d'énergie compacte, dispositifs magnétomécaniques spéciaux, systèmes inertiels pour le stockage de l'énergie électrique à bord.

### **2.3.3 Travaux menés et en cours de réalisation a l'IRENAV (EA 3634)**

#### **2.3.3.1 Travaux menés dans le cadre de l'encadrement de thèses.**

J'ai tout d'abord co-encadré la thèse de F. Sculler (co direction 55%) (Thèse soutenue en 2006) et S. BenElghali (50%, thèse soutenue en décembre 2009). et je coencadre actuellement 2 étudiants en doctorat à l'IRENAV: L. Drouen depuis novembre 2005 (55%, soutenance prévue en décembre 2010) et S. Djebbari (soutenance prévue en 2013). F. Sculler, L. Drouen et S. Djebbari ont été financés par le biais de contrats de travail d'Assistants d'Enseignement et de Recherche (AER) avec la marine nationale de 4 ans. Ce contrat comprend en plus de la préparation d'un doctorat, un service d'enseignement de 150h/an à l'Ecole Navale. Ce service d'enseignement conséquent est à mettre en relation avec la durée importante du financement (4 ans) sous ce statut. S. BenElghali a lui été financé par une bourse de Brest Métropole Océane (communauté urbaine de Brest).

#### **-Doctorat de F. Sculler : modélisation conception de machines à aimants polyphasées alimentées par des onduleurs de tension.**

Franck Sculler a préparé un doctorat à l'IRENAV sur la modélisation et la conception de machines polyphasées alimentées par des onduleurs de tension. La direction et le co encadrement de la thèse sont effectués par le biais d'une collaboration étroite avec le L2EP/ENSAM de Lille (Directeur : Pr Clenet, co-encadrant E. Semail).

Ces machines sont particulièrement intéressantes dans le cadre de la propulsion navale pour des raisons de résistance aux défauts et de fractionnement de la puissance. Cette action est passé par une collaboration avec l'équipe « Modélisation » du L2EP de Lille (Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille) qui possède des compétences dans ce domaine. S. Clenet (directeur de thèse) et E. Semail (co encadrant), respectivement professeur et maître de conférences à l'ENSAM ont participé à l'encadrement de M. Sculler. L'association des compétences du L2EP en terme d'analyse et de commande de telles machines (analyse multi machine) avec les compétences que j'ai acquises en terme de conception et de modélisation de machine (optimisation, méthodes de calcul analytique et par éléments finis du champ électromagnétique) a permis une collaboration scientifique fructueuse.

Les travaux menés nous ont permis de développer un certain nombre d'outils et de méthodes d'analyse et de modélisation des systèmes d'entraînement polyphasés basés sur des machines à aimants permanents à pôles lisses.

Une méthode générale d'analyse et de calcul des performances de ces systèmes a notamment été développée. Elle repose sur l'association des méthodes d'analyse multi machines avec des méthodes de calcul analytique du champ dans l'entrefer. Elle amène notamment à étendre les concepts d'analyse multi machine développés au L2EP de Lille pour les systèmes polyphasés aux caractéristiques internes de la structure

électromagnétique de la machine (définition de bobinages et d'aimantation multi machine)

Cette méthode, associée à des techniques d'optimisation et de modélisation analytique a permis la mise en évidence de stratégies particulièrement intéressantes pour la conception de l'ensemble convertisseur-machine-commande. Nous avons, par exemple, montré qu'il était ainsi possible d'augmenter la compacité et la redondance et de diminuer considérablement les couples pulsatoires des systèmes d'entraînement pour un cahier des charges donné. Ces travaux ont été complétés par des validations expérimentales

Il est à noter que F. Scuiller a effectué, grâce à l'obtention d'une bourse franco-québécoise, au cours du printemps 2006 un séjour d'échange d'un mois au LEEPCI (Université Laval Québec) pour compléter ces travaux sur la modélisation analytique du couple de détente par une validation expérimentale.

Il a obtenu le prix Béziers récompensant les meilleures thèses des Arts et Métiers.

Ces travaux sur les machines polyphasées ont également été le support d'une collaboration industrielle avec la société Jeumont-Electric.

Franck Scuiller est actuellement Ingénieur de R et D dans la société DCNS.

---

-Les travaux menés sur ce sujet ont fait l'objet de deux communications nationales, 6 communications en congrès international et 3 articles de revue [CN2, CN4, C15, C18, C19, C21, C24, C30, R14, R18, R22].

---

### **-Doctorat de L. Drouen : Modélisation et conception multiphysique systèmes Machine/hélices marines.**

Laurent Drouen a préparé son doctorat à l'IRENav de novembre 2005 à août 2009. Il a été embauché par la société ALSTOM en septembre 2009 et finalise actuellement son mémoire de thèse en parallèle avec son travail d'ingénieur. Sa soutenance est prévue en décembre 2010. La direction et le coencadrement de la thèse ont également été effectués par le biais d'une collaboration avec le L2EP/ENSAM de Lille (Directeur : Pr. Clenet, co-encadrant : E. Semail).

Son sujet de recherche concerne la conception globale de systèmes associant des machines électriques et des hélices marines. Il a développé un environnement de conception multi physique d'un système machine électrique hélice marine pour des applications de propulsion navales et de récupération d'énergie des courants de marée (hydroliennes). Nous nous sommes particulièrement intéressés à des systèmes à entraînement circonférentiel (RIM DRIVEN en anglais) où l'hélice constitue le rotor d'une machine synchrone à aimants permanents qui est située dans une carène entourant l'hélice. Dans ce système l'entrefer est immergé dans l'eau de mer et le comportement hydrodynamique de la turbine est très fortement lié à la structure de la machine. Il est donc nécessaire de modéliser de manière couplée les phénomènes hydrodynamiques, électromagnétiques et thermiques au sein du système. Un outil a été développé qui intègre et couple ces différents modèles et permet le dimensionnement optimal de systèmes où la machine électrique est totalement intégrée dans la structure hydrodynamique. Un démonstrateur est en cours de fabrication en collaboration avec des industriels (DCNS et Jeumont-Electric). Il est également à noter que ces travaux ont soutenu un contrat de recherche avec la société DCNS sur le pré dimensionnement de systèmes de propulsion Rim-Driven.

---

-Les travaux menés sur ce sujet ont fait l'objet de deux communications nationales, 3 communications en congrès international et une revue nationale [C22, C25, C27, CN4, CN5, RN].

---

**-Doctorat de S. Benelghali : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie d'une hydrolienne et de sa commande.**

Seif Benelghali a préparé son doctorat au LBMS d'octobre 2006 à septembre 2009. Il a été embauché comme ATER à l'Ecole Navale de octobre 2009 à juillet 2010. La direction et le coencadrement de la thèse sont effectués par le biais d'une collaboration étroite avec le LBMS (Pr. Benbouzid)

L'objectif de ce travail est de concevoir et d'implanter un outil de simulation capable de prévoir le comportement d'une hydrolienne dans son environnement. Cet outil pourra être utilisé pour le dimensionnement et l'évaluation de la rentabilité d'installations hydroliennes. Chaque partie du système a été modélisée sous forme d'un bloc indépendant sous Matlab/simulink favorisant le test et l'évaluation de différentes topologies de systèmes hydroliens. Ainsi la ressource (courants de marée), les turbines à axe vertical et différents types de systèmes générateurs/convertisseurs ont été modélisés et associés. Cet outil a permis sur des cahiers des charges de sites réalistes d'évaluer les performances de différents systèmes (comme par exemple les entraînements à base de génératrices synchrones et asynchrones à double alimentation) et de tester des stratégies de commande élaborés (commandes linéaires et non linéaires, commandes sans capteur de vitesse de courant). L'outil a été validé expérimentalement sur un banc émulateur du GE2LAB.

S. Benelghali est, depuis septembre 2010, maître de conférences à l'Université de Marseille.

---

-Les travaux menés sur ce sujet ont fait l'objet de 1 communication nationale [CN6], 6 communications internationales [C20,C23,C26,C28,C29,C32] et 5 articles en revue internationales [R17,R19, R20, R21,R23].

---

**-Doctorat de S. Djebbari (début de la thèse septembre 2010)**

Le sujet de cette thèse qui vient de commencer concerne la conception de machines électriques spéciales destinées à être associées à des hélices marines dans le cadre de système de turbines marines (hydroliennes) ou de propulseurs. Un environnement de modélisation et de conception multi physique de machines à aimants à entrefer radial associées à des hélices a été mis en place lors de travaux menés lors de la thèse de L. Drouen. Cet environnement logiciel permet d'étudier et dimensionner des systèmes de turbines hydroliennes ou de propulsion pour des technologies où la machine est en nacelle (POD) ou des technologies où les parties actives de la machine occupent la circonférence de l'hélice (système à entraînement circonférentiels « RIM Driven »). Un démonstrateur de ce type de technologie à entraînement circonférentiel pour une application hydrolienne est en cours de fabrication.

Les travaux menés montrent qu'il serait pertinent d'étendre cette étude à des topologies non conventionnelles de systèmes. Il serait par exemple possible d'utiliser dans

des structures à entraînement par la circonférence, des machines où les parties actives ne couvrent pas la totalité de la circonférence (machines par secteur).

L'utilisation de machines à entrefer axial permettrait également dans ce type de structures d'associer plusieurs hélices au sein d'un même dispositif. L'utilisation de machines polyphasées et de nouvelles technologies de matériaux magnétiques (aimants permanents et matériaux doux composites) et de bobinages non conventionnels peuvent également permettre, en déplaçant les contraintes de dimensionnement, de concevoir des structures originales pour ce type d'applications.

### ***2.3.3.2 Travaux menés dans le cadre de l'encadrement de Master Recherche.***

J'ai encadré en 2005 un étudiant de master recherche en Génie Electrique de l'INP Toulouse (F. Quénéhervé) sur la propulsion navale magnétohydrodynamique (MHD) Celui ci a élaboré des modèles de plusieurs types de propulseurs MHD. Ces modèles sont basés sur des calculs analytiques du champ électrique et magnétique dans le volume de la tuyère MHD. Ce travail comprend également l'intégration de ces modèles dans une procédure d'optimisation afin d'exhiber des règles de dimensionnement de systèmes MHD pour des cahiers des charges réalistes de navires. Cette procédure de dimensionnement optimal prend en compte des contraintes liées à l'hydrodynamique, à l'architecture navale, à la nature des supra conducteurs utilisés pour générer le champ magnétique et aux installations cryogéniques. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'obtenir des rendements de la chaîne de propulsion de l'ordre de 20 à 30% et un encombrement réaliste pour certains cahiers des charges correspondant à des navires de surface [CN3].

J'ai également encadré en 2008 un étudiant de master recherche en Génie Electrique de l'INP Toulouse (G. Bonizec) sur le développement de modèles de dimensionnement de systèmes de stockage inertiel d'énergie. Ce travail a permis d'intégrer des modèles au premier ordre mécanique du volant et électromagnétique de la machine d'entraînement et de récupération d'énergie au sein d'une procédure d'optimisation. Cet outil permet de pré dimensionner un système de stockage inertiel pour un cahier des charges donné et a été appliqué à des cahiers des charges de navire tout électrique dans le cadre d'une collaboration industrielle avec la société DCNS.

J'ai encadré en 2009 deux étudiants en master recherche en Génie Electrique.

Le premier L. Baldeck (MR INP Toulouse) a développé des modèles de machines par secteur (machines ou seules une partie de la circonférence du rotor et du stator comportent des parties actives). Ces modèles ont été associés à des procédures d'optimisation afin de répondre à des cahiers des charges de turbines hydroliennes à entraînement circonférentiel. Ceci a permis de démontrer qu'une hydrolienne dotée d'une génératrice par secteur peut comporter moins de volume de parties actives qu'un système doté d'une machine complète pour des performances similaires.

Le second, A. Thoreux (MR INP Nancy), a effectué son stage entre le LBMS (coencadrement du Pr. Benbouzid) et l'IRENav en collaboration avec la société AREVA-TA. Il a développé des modèles analytiques de fonctionnement de machines asynchrones en situation de fonctionnement dégradé (décalage axial et radial du rotor par rapport au stator) en utilisant la théorie des circuits magnétiquement couplés.

En 2010 j'ai été amené à co-encadrer avec le Pr. Claramunt du Groupe systèmes d'Information Géographique (SIG) de l'IRENav un étudiant en Master recherche des arts et Métiers Paris Tech, Aro RAMAROTAFIKA, Le Travail portait sur l'étude d'outils d'évaluation du potentiel hydrolien d'un site en fonction des technologies des machines

implantées. Il conjugait l'utilisation de méthodes d'analyse spatiale (SIG) avec la mise en évidence de critères de choix technologiques. L'objectif est alors de concevoir un logiciel expert pour l'aide à la décision pour l'implantation de systèmes hydroliens. Ce stage a constitué le premier pas dans l'élaboration d'un tel outil et les résultats se sont avérés très prometteurs. Nous espérons poursuivre ces travaux de recherche dans les prochains mois par le biais d'un doctorat.

### ***2.3.3.3 Travaux menés et réalisés sans encadrement de travaux de recherche d'étudiants de 3<sup>ème</sup> cycle***

J'effectue également un certain nombre de travaux à titre personnel ainsi qu'en collaboration avec des chercheurs contractuels post-doctorants.

J'ai ainsi mis en place une étude sur la conception de machines à aimants permanents à pôles lisses non conventionnelles utilisant des formes d'aimants et des aimantations non conventionnelles. Ces travaux se trouvent dans le prolongement de certains de mes travaux précédents sur les structures électromagnétiques. J'ai dans un premier temps élaboré des procédures de calcul semi-numérique basées sur une représentation des aimants par le modèle des masses magnétiques. J'ai aussi modifié certains modules de pré traitement de DIFIMEDI (code de calcul par différences finies 2D dédié au calcul du champ dans les machines) afin de pouvoir simuler ces structures de manière automatique. Les résultats obtenus par simulation montrent que ces structures sont particulièrement avantageuses en terme de performances et permettent par exemple de concevoir des machines à faible masse et à FEM trapézoïdales pour des applications grand public [C16].

J'ai également mis au point, des procédures de calcul analytique des machines à aimants permanents discoïdes à flux axial [R15, C13]. Ces machines peuvent être très intéressantes pour des applications telles que les alternateurs rapides ou les moteurs de propulsion navale. Les procédures développées permettent d'étudier de manière systématique et rapide les configurations classiques et des configurations basées sur l'utilisation d'anneaux de Halbach pour ce type de machine.

J'ai également effectué des travaux sur l'étude de structures originales de dispositifs magnétomécaniques dédiées à la propulsion navale [R13,C12]. Ce système original combine les fonctions de butée axiale et d'accouplement magnétique et doit permettre la transmission sans contact du couple de l'arbre moteur à l'arbre d'hélice tout en compensant l'effort sur l'hélice dû à la poussée propulsive. Ces travaux sur les systèmes magnétomécaniques et les machines discoïdes à flux axial ont été complétés par deux stages de fin d'étude d'ingénieur de 2 élèves de l'ENSEM de Casablanca (N. Fadli et J. Jennane) effectués à l'IRENav au printemps 2002.

J'ai également travaillé avec le Dr J. Rios-Quesada (Enseignant chercheur sous contrat à l'IRENav sur la période 2002-2005) à des travaux sur les machines linéaires spéciales dédiées à l'environnement naval. Les travaux menés portent sur la conception optimale de machines linéaires à aimants permanents pouvant être utilisées pour le catapultage des avions à bord des porte-avions. L'étude effectuée à l'aide de DIFIMEDI et Flux3D (code de calcul par différences finies 2D et par éléments finis 3D) porte sur l'optimisation de la structure de la navette mobile à aimants permanents et des bobinages et encoches du stator. Les résultats montrent que l'utilisation de structures d'aimantation non conventionnelles et de bobinages non classiques peut être avantageuse dans ce type de dispositifs en terme de performance globale et de minimisation des forces parasites liées à l'encochage [C14, R16]. Nous avons également mis en place des procédures de calcul analytique du champ dans ce type de dispositifs [C17]. Il est également à noter que

j'ai assuré le suivi avec le Pr. Viarouge (LEEPCI, Université Laval, Québec) d'un stage de fin d'étude de 2 élèves de l'école Navale effectué au Québec sur ce sujet. Ces travaux sur les machines linéaires ont également été complétés par un stage de Fin d'étude d'ingénieur d'un élève de l'école Polytechnique (Florian El Hadad, X2001) effectué à l'IRENav au printemps 2004.

Je travaille depuis 2 ans en collaboration avec le Dr. F. Mekri (ATER à l'IRENav depuis 3 ans). Dans le cadre de ces travaux menés en collaboration avec le L2EP de Lille nous nous sommes intéressés aux stratégies de contrôle en mode dégradé des machines à aimants permanents polyphasées. Ces travaux ont permis de mettre en œuvre de manière expérimentale des stratégies de commande optimale en cas d'ouverture de phase [C31,CN7]. Nous nous intéressons également avec le Dr Mekri et nos collègues du L2EP à la commande optimale de plusieurs machines polyphasées par un même onduleur.

### **2.3.4 Bilan sur la période 2002-2009**

Globalement les travaux de recherche que j'ai entrepris depuis janvier 2002 à l'IRENav ont conduit à 11 publications dans des revues internationales [R13 à R23], 21 communications dans des congrès internationaux [C12 à C32] et 6 communications nationales [CN2 à CN7] et une revue nationale[RN]

-J'ai coencadré la thèse de J. Rios-Quesada à l'université de Bretagne Occidentale (40%) soutenue en octobre 2002.

-J'ai co-encadré (55%) la thèse de doctorat de F. Scullier à l'IRENav soutenue en décembre 2006

-J'ai co-encadré la thèse de doctorat de S. Benelghali au LBMS soutenue en décembre 2009

-Je co-encadre la thèse de doctorat de L. Drouen à l'IRENav depuis novembre 2005 (soutenance prévue en décembre 2010).

-Je co-encadre la thèse de doctorat de S. Djebbari à l'IRENav depuis septembre 2010.

-J'ai assuré l'encadrement de 5 stages de Master Recherche en Génie Electrique (INPT,INPL et AM).

-J'effectue un certain nombre de travaux de recherche de manière personnelle et de manière collaborative avec des chercheurs confirmés ou post-doctoraux.

-J'ai assuré l'encadrement de 3 stages de fin d'étude d'ingénieur sur des activités de recherche

## **2.4 Activités de rayonnement et d'expertise scientifique**

### **2.4.1 Activités d'expertise scientifique**

Depuis mon arrivée à l'IRENav, les activités d'expertise scientifiques prennent une place de plus en plus importante dans l'ensemble de mon travail. Cela est dû en grande partie à la montée en puissance des thématiques liées à la conversion d'énergie électrique en milieu maritime (énergies renouvelables marines, propulsion électrique). Il est à noter que je ne peux malheureusement accepter toutes les sollicitations d'expertise qui me sont proposées préférant me concentrer sur les demandes concernant mes thématiques principales.

#### **2.4.1.1 Expertise d'articles**

J'ai été Rapporteur pour les revues IEEE-TMAG, IEEE-TIE, IEEE-TEC, IEEE-JOE, PIER Journal, EJEE (ex RIGE), Control Engineering Practice et pour plusieurs conférences internationales dans le domaine de l'électrotechnique. Cette activité de relecture représente un volume de 1 à 2 articles/mois).

#### **2.4.1.2 Activités d'expertise de dossiers.**

J'ai été mandaté en tant qu'expert sur plusieurs dossiers concernant des demandes de financement auprès d'organismes publics français ou étrangers. J'ai notamment effectué des expertises pour :

- Un dossier de financement sur le programme blanc ANR 2010 (Projet MAQUIH)
- Deux dossiers pour l'appel à propositions de l'ADEME sur Fonds démonstrateur de recherche en 2010- Appel à manifestations d'intérêt sur les Réseaux et systèmes électriques intelligents intégrant les énergies renouvelables (expertise en cours).
- Un dossier de demande d'allocation de recherche doctorale de la région Bretagne/ED SICMA (Université de Bretagne Occidentale) en 2009.
- Un dossier de demande d'allocations de recherche pour nouveaux chercheurs auprès du Fonds québécois de recherche sur la nature et les technologies à Québec en 2006.
- Un dossier de demande de subvention à la découverte du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) en 2009.

#### **2.4.1.3 Participation à des Jurys de thèses.**

J'ai eu l'occasion de participer à des jurys de thèse français ou étrangers ou à expertiser des rapports de recherche d'étudiants étrangers.

-J'ai participé en tant qu'examineur au jury de thèse de Brice Beltran : Thèse de l'Université de Bretagne occidentale « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », soutenue le 6 juillet 2010 à Brest.

-J'ai participé en tant que rapporteur au jury de la thèse de l'EPFL de Christophe Chabert « Etude et modélisation de convertisseurs multiniveaux à commutation douce en vue d'applications navales », soutenue le 30 avril 2003 à Lausanne.

-J'ai été rapporteur du mémoire de Maîtrise de recherche de l'Université Laval de L.E. Radaorozandry « conception et optimisation des machines synchrones avec des modèles analytiques en tenant compte de la saturation magnétique » 156pp- en février 2007.

-J'ai participé en tant qu'examineur aux jurys des thèses que j'ai co-encadrées (J. rios-Quesada-2002, F. Scuiller-2006 S. Benelghali-2009).

### **2.4.2 Activités de rayonnement scientifique**

#### **2.4.2.1 Communications invitées.**

-Communication invitée au concordat GENELEC, Evry sur Seine 13-14 octobre 2010

- Communication invitée à MITS 2009 en novembre 2009 à Shanghai « Marine Tidal Current Electric Power Generation Technology , State of the Art and Current Status »
- Tutorial invité aux étudiants de 3<sup>ème</sup> cycle et aux enseignants chercheurs de la Shanghai Maritime University en Novembre 2009 sur la modélisation des systèmes hydroliens.
- Communication invitée au Magneto Mechanical Symposium Ghent (Belgium) 27 may 1999, “Magnetic forces between Permanent Magnets - Application to Permanent Magnet devices”

#### **2.4.2.2 Participation à l'organisation de conférences.**

J'ai été membre du comité scientifique de EF 2009 à Compiègne, du comité d'organisation de la conférence TPOD 2006 à Brest (2nd International conference in technological advances in podded propulsion). J'ai également été Chairman, de 2 sessions à ELECTRIMACS 2008 à Québec, d'une session à IEMDC 2009 à Miami, d'une session à MITS 2009 à Shanghai.

#### **2.4.2.3 Activités de vulgarisation et de communication scientifiques.**

Je suis intervenu lors de manifestations destinées à la communication et la vulgarisation scientifique. Cela a été l'occasion de présenter mes activités de recherche et leur contexte à un public plus large que celui constitué des spécialistes de mon domaine.

J'ai ainsi effectué une présentation de nos activités de recherche sur « la récupération de l'énergie des courants marins » aux journées sciences et éthiques consacrées aux énergies de la mer diffusées en parallèle sur canal2C et France Culture en octobre 2007.

J'ai participé en tant qu'expert aux débats du Grenelle de l'environnement (session locale de Brest) en octobre 2007.

Je vais effectuer une présentation des systèmes d'extraction d'énergie renouvelable marine au 3ème concordat GENELEC. 13 & 14 octobre 2010, Ivry sur Seine organisé par la DGA et le CNRS.

Je vais effectuer une présentation sur l'avenir de la propulsion électrique à la journée thématique ECONAV à destination du monde maritime sur la propulsion navale. Mon intervention concernera le futur de la propulsion électrique. Cette manifestation est organisée le 30 septembre 2010 à Brest par le réseau ECONAV qui a pour but de favoriser l'émergence d'une filière navale et nautique durable.

Nous avons rédigé un article de synthèse avec les partenaires Brestois travaillant dans le domaine des hydroliennes publié dans la revue 3EI en mars 2008 [RN].

## **2.5 Activités de recherche Collaboratives**

### **2.5.1 Collaborations académiques**

Je collabore activement au niveau local avec le Laboratoire LBMS (équipe de M. Benbouzid). Cette collaboration se place dans le cadre des recherches sur les énergies marines et se traduit par le co-encadrement de 2 thèses (S. Benelghali et S. Djebbari) et de nombreux travaux communs.

Je collabore activement au niveau national National avec le L2EP de Lille (E. Semail et S. Clenet) sur les thématiques de la conception et la modélisation de machines

notamment polyphasée. Cette collaboration s'est traduite par le co-encadrement de deux thèses (L. Drouen et F. Scuiller) et par de nombreux travaux communs.

Je participe à l'animation du groupe « Hydrole » au sein du GDR SEED qui regroupe les acteurs recherche du grand ouest dans le domaine de l'hydrolien (IRENAA, IRENAV, LBMS, GREAH, IFREMER...)

Je collabore avec le LEEPCI à Québec et la Shanghai Maritime University. Ces collaborations internationales se traduisent par des échanges d'étudiants et de chercheurs.

### **2.5.2 Collaborations scientifiques industrielles**

J'ai Collaboré avec la société DCNS dans le cadre de 2 contrats de Recherche et Développement dont j'ai été responsable, sur les systèmes non conventionnels de propulsion électrique (2005-2006) (autres participants au contrat : J Rios-Quesada, L. Drouen) et sur les systèmes de stockage inertiel (2008, autre participant au contrat : G. Bonizec) .

J'ai développé une collaboration scientifique non contractuelle avec Jeumont-electric sur les machines de propulsion navale [C19, R18] en complément de la thèse de F. Scuiller.

J'ai collaboré avec AREVA-TA dans le cadre d'un contrat d'accompagnement d'un master recherche en commun (A Thoreux) en 2009 (autre participant: M. Benbouzid).

Je coordonne également avec les sociétés DCNS et Jeumont Electric la fabrication et les essais d'un démonstrateur commun de turbine hydrolienne à entraînement périphérique (Turbine « Rim Driven ») en relation avec la thématique de la thèse de L. Drouen. Ce démonstrateur servira de base commune d'essais et est partagé entre les 3 entités (IRENav, DCNS, Jeumont Electric).

## **III) Résumé des activités d'enseignement**

Depuis mon recrutement à l'Université de Bretagne Occidentale en 1997. J'ai assuré intégralement mon service d'enseignement en essayant de limiter la part de mes heures supplémentaires afin de garder une activité de recherche conséquente. Le paragraphe suivant se veut une présentation synthétique du service effectué correspondant à une année à l'Ecole Navale.

### **1 Présentation synthétique de mon service d'enseignement.**

Le tableau ci-dessous présente les enseignements que j'ai effectués lors de l'année 2008-2009 à l'Ecole Navale. Etant le seul enseignant permanent en génie électrique, ces enseignements sont concentrés autour de l'électrotechnique et la transformation d'énergie électrique. Il est à noter que j'assure également en plus de cours assez classiques dans leur thématique (machines électriques, électronique de puissance) des cours spécifiques pour les systèmes maritimes.

Au cours de l'année 2010-2011 je serais également amené à intervenir dans le nouveau Master Spécialisé de la CGE sur les énergies renouvelables marines à la hauteur d'une trentaine d'heures.

Il est également à noter que la part de TP est relativement faible car étant le seul permanent dans le domaine, j'ai été naturellement conduit, à mon regret à assurer une part plus importante de cours et de TD.

Enseignement	Type d'enseignement			Niveau
	Cours	TD	TP	
Electrotechnique navale basique (triphase, monophasé, base des réseaux)	5 h	5h	0	L3 - Ecole d'ingénieurs 1 <sup>ère</sup> année (Ecole Navale)
Génie Electrique (machines électriques)	20 h	8h	9h	L3 - Ecole d'ingénieurs 1 <sup>ère</sup> année (Ecole Navale)
Navire tout électrique	2h		0	L3 : Licence Professionnelle IUT de Brest
Electronique de Puissance	22h	10h	0	M1 - Ecole d'ingénieurs 2 <sup>ème</sup> année (Ecole Navale option énergétique)
Electronique de Puissance en environnement naval	12 h	5h	0	M1 – Master professionnel Ecole navale « Sciences et technologies » Mention : Génie de l'environnement Spécialité : Milieu maritime et opérations navales
Energie Renouvelable	3h		0	M1 - Ecole d'ingénieurs 2 <sup>ème</sup> année (Ecole Navale option énergétique)
Propulsion navale électrique Energie Renouvelables marine (association convertisseur machine)	12h	9h	0	M2 - Master recherche ENSAM Mention FISE : Fluides et Systèmes énergétiques Spécialité : Environnement naval
Electrotechnique navale perfectionnement (résaux de bord, étude de cas)	14 h	4h	0	M2 - Ecole d'ingénieurs 3 <sup>ème</sup> année (Ecole Navale)
Encadrement de projets			25	M2 - Ecole d'ingénieurs 3 <sup>ème</sup> année M1 - Ecole d'ingénieurs 2 <sup>ème</sup> année
<b>Totaux</b>	<b>90</b>	<b>41</b>	<b>34</b>	
<b>Totaux</b>	<b>198</b>			

## 2 Activités de coordination et de mise en place d'enseignements.

### 2.1 Activités de coordination de l'enseignement de génie électrique.

Les activités d'enseignement en génie électrique représentent un total d'environ 800h eq TD.

L'essentiel de ces heures est assuré par du personnel de type ATER ou doctorants sous contrat d'Assistant d'Enseignement et de Recherche. Ce contrat (Marine Nationale) permet de financer des étudiants en doctorat et comprend en plus de la recherche, un service d'enseignement de 150h/an à l'Ecole Navale. Ces enseignants chercheurs « juniors » (ATER et AER) assurent environ 480h sous forme de TP, de TD et de quelques cours. Nous disposons en effet de deux ARER et un AER ou de deux AER et d'un ATER selon les années pour ces enseignements.

Le reste des enseignements est assuré par moi-même (environ 200h) et par des intervenants extérieurs (environ de 100 a 120h).

Les intervenants extérieurs qui sont le plus souvent des spécialistes d'un domaine interviennent essentiellement sous forme de cours et de TD en fin de formation scientifique (modules de type voie d'approfondissement).

Etant le seul permanent je coordonne l'ensemble de ces activités et assure la formation pédagogique des AER et parfois des ATER sur les modules enseignés à l'Ecole Navale.

## ***2.2 Activités de mise en place d'enseignement.***

Avant 2002, les activités d'enseignement en génie électrique ne représentait qu'une très faible part de la formation à l'Ecole Navale et étaient assurés par des vacataires.

L'avènement au sein de la flotte militaire française, de navires « tout électrique » comme les Bâtiments de Projection et de Commandement de classe Mistral ou des Frégates Multi Missions de classe Aquitaine a conduit l'Ecole Navale à recruter un permanent dans le domaine afin de mettre en place un programme de formation pertinent et pérenne dans le domaine de la conversion d'énergie électrique afin de former les futurs officiers qui serviront sur ces navires. Cette volonté a permis mon recrutement en septembre 2002 suite à une mutation.

De ce fait je me suis consacré à mettre en place un programme de formation le plus complet possible qui permettrait à nos élèves officiers d'acquérir les notions nécessaires à la compréhension d'un système électrique complexe tel que l'on peut en trouver à bord de ces navires.

Ceci m'a conduit à élaborer et à mettre en place un ensemble de cours, de travaux dirigés et de travaux pratiques parfois en collaboration avec des AER ou des ATER. Ces modules d'enseignement concernent :

- Les bases des réseaux électriques (monophasé, triphasé, bases de la distribution électrique) : 5h Cours, 5h de TD, 1 manipulation de 3h de TP (volume vu par l'étudiant).
- Les machines électriques :Transformateurs, Machines à courant continu, Machines synchrones, Machines asynchrones (modèles classiques, utilisation sur les réseaux puissants, utilisation en vitesse variable) : 17h Cours, 13h de TD, 4 manipulations de TP (12h de TP au total) (volume vu par l'étudiant).
- L'électronique de puissance : composants, règles de commutation, hacheurs, redresseurs, commutateurs de courant, onduleurs de tension : 12h Cours,12h de TD ,2 séances de TP (6h de TP au total ) (volume vu par l'étudiant).
- Les réseaux des navires « tout électrique » : éléments topologie, stabilité, réglages : 6h cours 3h TD (volume vu par l'étudiant).

A ces enseignements qui sont assurés soit par moi-même soit par du personnel non permanent (AER, ATER) viennent se rajouter des modules qui ont été mis en place, à ma demande, par des intervenants extérieurs. Ces modules concernent les associations machines convertisseurs pour la propulsion navale (intervenants X. Kestelyn et E. Semail) et les systèmes d'énergies renouvelables avec un accent particulier sur les ENR marines (intervenants M. Benbouzid).

En plus de ces activités d'enseignement j'ai également été chargé par l'établissement de responsabilités administratives à caractère pédagogique. J'exerce ces activités depuis 2003 sans interruption. Elles sont détaillées dans la suite de ce document.

## **IV) Responsabilités administratives et Collectives**

### **1 Responsabilités Administratives à caractère Pédagogique**

J'ai été responsable (Intérim d'un collègue absent cette année là) de la voie d'approfondissement (VA) (option de 2<sup>ème</sup> année) Génie Energétique de l'Ecole Navale en 2003/2004.

J'ai été adjoint au Directeur de l'Enseignement Scientifique de l'Ecole Navale (septembre 2005-Septembre 2007). Ce rôle comprenait une participation active à l'organisation administrative et à l'animation pédagogique de la formation scientifique à l'Ecole Navale.

J'ai été responsable de la voie d'approfondissement (VA) Génie Energétique de l'Ecole Navale (2007-2010). Le rôle de responsable de la VA comprend l'organisation et l'animation pédagogique de l'option ainsi que la mise en œuvre des projets de fin d'étude d'ingénieur des élèves et l'organisation des soutenances de ces projets (composition des jury, relecture des rapports, évaluation).

Je suis responsable depuis 2008 pour l'Ecole navale de la mise en place Master Spécialisé de la CGE (Conférence des Grandes Ecoles ) sur les énergies renouvelables marine co acrédié par l'ENSIETA, l'Ecole Navale et Telecom Bretagne. J'ai, au cours de l'année 2008-2009, participé à l'animation du groupe de travail qui a permis de monter le dossier d'habilitation de ce Master. Je participe depuis son habilitation en 2010 au pilotage à l'animation et à l'organisation pédagogique de cette formation dont la première promotion comprend 13 étudiants.

### **2 Commissions de Spécialistes et comités de sélection**

J'ai été élu à la commission de spécialistes 61/63 de l'UBO de septembre 2001 à septembre 2002

J'ai été Elu à la commission de spécialistes 61/63/27 de l'ENSAM (2004-2008)

J'ai Participé à un comité de sélection 61/63 de l'UBO en 2009 et des Arts et Métiers Paris-Tech en 2010.

J'ai eu ainsi l'occasion de participer activement aux processus de sélection et de recrutements des enseignants chercheurs (examen et expertise des dossiers, auditions, délibérations) au sein de ses groupes de travail.

### **3 Responsabilités Nationales**

Je suis membre nommé de la section 63 du CNU depuis 2007. A ce titre je participe activement au travail de la section CNU pour la qualification et la promotion des maîtres de conférences (examen des dossiers, rapports, débats).

## V) Liste de publications et travaux

### 1 Articles publiés dans des revues internationales

- [R23] Ben Elghali, S.E.; Benbouzid, M.E.H.; Charpentier, J.F.; Ahmed-Ali, T.; Munteanu, I.; "Experimental Validation of a Marine Current Turbine Simulator: Application to a PMSG-Based System Second-Order Sliding Mode Control" sous presse à paraître dans IEEE Transactions on Industrial Electronics
- [R22] F. Scuiller, E. Semail, JF Charpentier, « General modeling of the windings for multi-phase AC machines. Application to the analytical estimation of the mutual stator inductances for smooth air gap machines », EPJ Applied physics, Vol 50 n°3 June 2010, DOI: 10.1051/epjap/2010058, 15pp
- [R21] S. E. Ben Elghali, MEH Benbouzid, T. Ahmed-Ali, and JF Charpentier, « High-Order Sliding Mode Control of a Marine Current Turbine Driven Doubly-Fed Induction Generator » IEEE- Journal on Oceanographic engineering, Vol35 issue 2, April 2010, pp 402-411
- [R20] S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, "Modélisation et commande d'une hydrolienne équipée d'une génératrice asynchrone double alimentation" EJEE (ex RIGE) volume 13 n°2/2010 avril 2010 pp 161-178.
- [R19] S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, "Modeling and Control of a Marine Current Turbine Driven Doubly-Fed Induction Generator » IET-Renewable Power Generation vol 4 issue 1 January 2010 pp1-11.
- [R18] F. Scuiller, E. Semail, J.F. Charpentier S. Clenet, P. Letellier, « Multi criteria based design approach of multiphase PM synchronous machine », - *IET Electric Power applications* Volume 3, Issue 2, March 2009 Page(s):102 - 110
- [R17] S.E. Ben Elghali, R. Balme, K. Le Saux, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, and F. Hauville, 2008. - A Simulation Model for the Evaluation of the Electrical Power Potential Harvested by a Marine Current Turbine in the Raz de Sein - *IEEE Journal on Oceanographic engineering*, Vol32 n° 4 Oct 2007, pp786-797
- [R16]-Rios-Quesada, J. and JF Charpentier, 2005. - Finite Difference study of unconventional Finite difference study of unconventional structures of PM linear machines for electromagnetic aircraft launch system. - *IEEE Trans on Magnetics*, vol 41 n°1 January 2005 pp 478-484
- [R15] Fadli, N., J. Jennane, J.F. Charpentier and J. Rios-Quesada, 2004- Semi-Analytical Study of 3 kinds of axial flux PM machine - *International Journal of applied electromagnetics and mechanics* vol 19 n°1-4-2004: 299-302
- [R14] Scuiller F., E. Semail, J.-F. Charpentier, S. Clenet, 2004. - Comparizon of Conventional and Unconventional 5-phase PM Motor Structures for Naval Applications - *IASME Transactions, ISSN 1790-031X, Issue2 Vol.1 April 2004 pp 365-371*
- [R13]-J.F. Charpentier J. Jennane and N. Fadli, 2003-, Study of Ironless Permanent Magnet Devices being Both a Coupling and an Axial Bearing for Naval Propulsion, *I.E.E.E. Transactions on Magnetics* Vol 39 n°5 Sept 2003 pp 3235-3238
- [R12]-J. Rios-Quesada, V. Lemarquand, J.F. Charpentier and G. Lemarquand, 2002- Study of triangular windings alternator, *I.E.E.E. Transactions on Magnetics* Vol 38 n°2 March 2002 pp 1361-1364.
- [R11]-J.F. Charpentier and G. Lemarquand, 2002- Optimization of Unconventional P.M. Couplings, *I.E.E.E. Transactions on Magnetics* vol 38 n° 2 March 2002 pp 1093-1097
- [R10]-J.F. Charpentier and G. Lemarquand, 2001- Study of the mechanical behavior of axially magnetized Permanent Magnet Gears, *I.E.E.E. Transactions on Magnetics* Vol 37 n° 3 May 2001 pp 1110-1118.
- [R9]-J.F. Charpentier and G. Lemarquand, 2001- Calculation of ironless Permanent magnet coupling using semi-numerical magnetic pole theory method, *Compel The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* Vol20 n°1 2001 pp 72-89
- [R8]-J. F. Charpentier and G. Lemarquand, 1999- A study of Permanent magnet couplings with Progressive magnetization using analytical exact formulation, *IEEE trans. on Magnetics*, Vol 35, no 5 September 1999 pp 4206-4217
- [R7]-V. Lemarquand, J. F. Charpentier and G. Lemarquand, 1999- Non Sinusoidal Torque of Permanent Magnet Couplings, *I.E.E.E. Transactions on Magnetics*, Vol 35, no 5 September 1999 pp 4200-4205.
- [R6]-J. F. Charpentier, G. Lemarquand - Optimal Design of cylindrical air-gap synchronous Permanent magnet Couplings, *I. E. E. Transactions on Magnetics* Vol 35 no 2 March 1999, pp 1037-1046.
- [R5]-J. F. Charpentier, Y. Lefèvre, H. Piquet, 1998-An Original and Natural method of coupling electromagnetic field equations with circuit equations put in a state form, *I. E. E. E. Transactions on Magnetics*, Vol 34 no 5, pp 2489-2492, Sept 1998

- [R4]-J. F. Charpentier, G. Lemarquand, 1998 - A Comparative Analysis of Permanent Magnet Type Bearingless synchronous Motors for fully magnetically Levitated Rotors, *Journal of Applied Physics* vol 83,no 11, pp. 7121-7123, 1 june 1998.
- [R3]-J. F. Charpentier, Y. Lefèvre, H. Piquet, 1997- Une méthode Générale pour modéliser les convertisseurs statiques associés à des dispositifs magnétiques, *Journal de Physique III* november 1997 pp 2225-2237
- [R2]-J. F. Charpentier, Y. Lefèvre, M. Lajoie-Mazenc, 1996 -A 2D Finite Element Formulation for the Study of the High Frequency Behavior of Wound Components. *I. E. E. E. Transactions on Magnetics*, vol 32, no 3, pp. 1098-1101, may 1996.
- [R1]-J. F. Charpentier, Y. Lefèvre, E. Sarraute and B. Trannoy, 1995- Synthesis and Modeling of an Electrostatic Induction Motor, *I.E.E.E. Transactions on Magnetics*, vol 31,no 3, pp. 1404-1407,may 1995.

## 2 Articles publiés dans des conférences internationales

- [C32] S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier Comparison of PMSG and DFIG for Marine Current Turbine Applications, IEEE- ICEM 2010- XIX International Conference on Electrical Machines , Rome, Italy, f 6th- 8th September 2010 6pp.
- [C31] F. Mekri, JF Charpentier, X. Kestelyn-« High Order Sliding mode optimal current control of Five Phase Permanent magnet Motor under Open Circuited phase Fault Conditions »- 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Sept 1-3 2010 Lille France, 6pp
- [C30] F. Scuiller, E. Semail, JF Charpentier, “Multi-star multi-phase winding for a high power naval propulsion machine with low ripple torques and high fault tolerant ability » 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Sept 1-3 2010 Lille France
- [C29] S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, T. Ahmed-Ali and I. Munteanu « High-Order Sliding Mode Control of a Marine Current Turbine Driven Permanent Magnet Synchronous Generator », IEMDC 2009, Miami Fl USA May 3,6 2009 (6pp in CDROM proceedings)
- [C28] S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid, T. Ahmed-Ali, J.F. Charpentier and F. Mekri 2008 - High-Order Sliding Mode Control of DFIG-Based Marine Current Turbine in Proceedings (CDROM)IECON 08 IEEE Industrial Electronics Society annual conference Orlando Floride 10-13 nov 2008
- [C27] S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, T. Ahmed-Ali, J.M. Gahery and A. Denis 2008 -Modeling and MPPT Sensorless Control of a DFIG-Based Marine Current Turbine, in Proceedings (CDROM) International Congress on Electrical Machines ICEM 2008Villamoura Portugal 6-9 sept 2008.
- [C26] L. Drouen, J.F. Charpentier, E. Semail, S. Clenet-2008- Investigations on the performances of the electrical generator of a rim-driven marine current turbine- in CDROM Proceedings of ICOE (International Congress on Ocean Energy ) Brest France 15-17 oct 2008
- [C25] S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid and J.F. Charpentier- Modeling and Control of a Marine Current Turbine Using a Doubly-Fed Induction Generator- in CDROM Proceedings of ICOE (International Congress on Ocean Energy ) Brest France 15-17 oct 2008
- [C24] L. Drouen, F. Hauville, J.F. Charpentier, E. Semail, S. Clenet,-A coupled electromagnetic and hydrodynamic design model for an integrated rim-driven naval propulsion system- in CDROM Proceedings Electrimacs 2008 international conference, June 8-11, Québec, Canada
- [C23] F. Scuiller, J.F. Charpentier, E. Semail, S. Clenet, 2007. - Comparison of two 5-phase Permanent Magnet machine winding configurations. Application on naval propulsion specifications - Electric Machines & Drives Conference, 2007.IEEE-IEMDC '07 Volume1,3-5May2007,pp.34-39
- [C22]L. Drouen, J.F. Charpentier, E. Semail, S. Clenet, 2007. - Study of an innovative electrical machine fitted to marine current turbines - IEEE-OCEAN 2007 Aberdeen Scotland June 2007 (6pp) in CD-Rom Proceedings
- [C21] F. Scuiller, J.F. Charpentier, E. Semail, S. Clenet, 2006. - A global design strategy for multiphase machine applied to the design of a 7-phase fractional slot concentrated winding PM machine - in Proceedings (CDROM) XVIII International Congress on Electrical Machines ICEM 2006 Chania Greece Sept 2006 (6pp)
- [C20] S.E. Ben Elghali, M.H.E. BenBouzid, J.F. Charpentier, 2007. - Marine Tidal Current Electric Power Generation Technology: State of the Art and Current status - IEEE IEMDC '07, Volume 2, 3-5 May 2007,pp. 1407-1412
- [C19] F. Scuiller, E. Semail, JF Charpentier S. Clenet, P. Letellier, 2006- Study of unconventional designs of multiphase PM Synchronous machines to increase the torque density for POD propulsion applications - accepted in TPOD 2006 2nd International conference in technological advances in podded propulsion , Brest France , October 2006
- [C18] F. Scuiller, JF Charpentier, S. Clenet, E. Semail, 2005 -A multiphase surface mounted permanent magnet motor design to reduce torque ripples and joule losses for naval applications-All Electric Ship

- 2005 5<sup>th</sup> International symposium October 2005 Versailles France (6p in CD rom Proceedings ISBN 2-912328-25-X)
- [C17] F. El Hadad, J Rios-Quesada, JF Charpentier , 2005- A new analytical tool for the systematic design of EMALS PM linear launch machine- All Electric Ship 2005 5<sup>th</sup> International symposium October 2005 Versailles France France (6p in CD rom Proceedings ISBN 2-912328-25-X)
- [C16] JF Charpentier, 2005-Analytical and numerical study of a new kind of PM Brushless Motor with Trapezoidal EMF for Low cost and Low inertia applications- IEEE International Electrical machine and Drive Conference (IEMDC 2005) may 2005, San Antonio Texas (8p in CD rom Proceedings ISBN 0-78038988-3)
- [C15] F. Scuiller, E. Semail, JF Charpentier S. Clenet, 2004- Comparison of conventional and unconventional 5-phase PM motor structures for naval applications- ELECTROSCIENCE AND TECHNOLOGY FOR NAVAL ENGINEERING and ALL-ELECTRIC SHIP, Athens Greece July 2004 in proceedings pp 89-94
- [C14] J. Rios-Quesada, JF Charpentier, 2004- Finite Difference study of unconventional Finite difference study of unconventional structures of PM linear machines for electromagnetic aircraft launch system-IEEE Electromagnetic Launch Technology Symposium, EML 2004 may 25-28 2004 Snowbird USA (in Proceedings pp 477-482 and in CDROM proceedings ISBN 07803-8291-9)
- [C13] N. Fadli, J. Jennane and J.F. Charpentier, 2003- - Semi-Analytical Study of 3 kinds of axial flux PM machine-International symposium on applied electromagnetics and mechanics ISEM 2003 12-14 may 03 Versailles France.in proceedings pp 190-191.
- [C12]-N. Fadli, J. Jennane and J.F. Charpentier,2003 - Semi-Analytical Study of Ironless Permanent Magnet Devices being Both a Coupling and an Axial Bearing for Naval Propulsion - INTERMAG 2003 in CDROM proceedings (paper n°:CR13) International Magnetics Conference, Boston March 30, April 3 2003.
- [C11]-J.F. Charpentier, G. Lemarquand, 2001- Optimization of Asymmetric P.M. couplings- Compumag 2001 in proceedings Vol4 pp160-161 IEEE Conference on Computation of Electromagnetic Field, Evian France July 2001.
- [C10]-J.F. Charpentier et G. lemarquand, 2000- Calculation of ironless Permanent magnet coupling using semi-numerical magnetic pole theory method - 5th Electric and Magnetic Field symposium (EMF 2000) Ghent (Belgium) 17-19 may 2000 in proceedings paper n° 20.
- [C9] -J. Cros, J.F. Charpentier, Ph. Viarouge, 1998-Optimal Design of Power Inductor with Cylindrical core- ICEM98,Istambul
- [C8]-J.F. Charpentier, J. Cros, Ph. Viarouge, 1998 Efficient Meshing Method for Iterative Optimal Design of Electromagnetic Devices , CEFC'98 Tucson, Arizona June 1- 3, 1998 in proceedings p 40 .
- [C7] - J.F. Charpentier, J. Cros, Ph. Viarouge, 1998-Determination of meshing laws in finite difference field calculation for the design of electromagnetic devices using constraint non linear optimization techniques- 4th International Workshop on Electric and Magnetic Field (EMF 98) 12-15 may 1998, Marseille, France, in proceedings pp 255-260.
- [C6]-J. F. Charpentier, G. Lemarquand, A Comparative Analysis of Permanent Magnet Type Bearingless synchronous Motors for fully magnetically Levitated Rotors, joint MMM-INTERMAG'98 Conference San Fransisco USA January 6-9 1998
- [C5]-J. F. Charpentier, Y. Lefèvre, H. Piquet, 1997-An Original and Natural method of coupling electromagnetic field equations with circuit equations put in a state form- COMPUMAG'97 Rio Brazil november 3-6 1997
- [C4]-J.F. Charpentier, Y. Lefèvre, H. Piquet, 1997-Modeling of Power Electronics Circuits Associated With Non-Linear Magnetic Devices, E. P. E.'97 (European Conference on Power Electronics and Applications), Trondheim, Norway, september 8-10 1997, in proceedings pp 2.309-2.314 .
- [C3]-J. F. Charpentier, Y. Lefèvre, H. Piquet, 1997-Une méthode Générale pour modéliser les convertisseurs statiques associés à des dispositifs magnétiques, NUMELEC'97 (Seconde Conférence Européenne sur les Méthodes Numériques en Electromagnétisme), Lyon, France, 19 au 21 mars 1997 .
- [C2]-J. F. Charpentier, Y. Lefèvre, M. Lajoie-Mazenc, 1995-A 2D Finite Element Formulation for the Study of the High Frequency Behavior of Wound Components, COMPUMAG'95 (10th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields), Berlin, Germany, July 10-13,1995
- [C1]-J. F. Charpentier, Y. Lefèvre, E. Sarraute and B. Trannoy, 1994- Synthesis and Modeling of an Electrostatic Induction Motor, C.E.F.C.'94 (sixth biennial I. E. E. E. Conference on Electromagnetic Field Computation), Grenoble, France, July 5-7, 1994)

### 3 Communications dans des conférences nationales

- [CN7] Fatiha Mekri, Jean-Frederic Charpentier, Xavier Kestelyn, E. Semail « Commande avec prise en compte de défauts d'ouverture de phase d'une machine pentaphasée à aimants associé à un onduleur de tension », EPF (Électronique de Puissance du Futur) 2010 -30 juin-2 juillet- Saint Nazaire
- [CN6] S.E. Ben Elghali, J. Bittard, C. Leon, J.F. Charpentier M.E.H. Benbouzid - Etude comparative d'une génératrice synchrone à aimants permanents et d'une génératrice asynchrone à double alimentation pour la génération d'énergie, EF 09 UTC Compiègne 24 et 25 septembre 2009
- [CN5] L. Drouen, JF Charpentier, E. Semail, S. Clenet-, « Modèle analytique intégrant des effets d'extrémités pour le prédimensionnement de machines courtes à grand entrefer » in CDROM proceedings Electrotechnique du Futur EF 09 UTC Compiègne 24 et 25 septembre 2009
- [CN4] L. Drouen, F. Scullier, JF Charpentier, E. Semail, S. Clenet-, Modèles analytiques pour le prédimensionnement de machines à aimants à basse vitesse, grand diamètre et grand entrefer-in CDROM proceedings Electrotechnique du Futur EF 07 Toulouse 6-7 sept 2007
- [CN3] F. Quenhervé, JF Charpentier, Modélisation et Conception de propulseurs magnétohydrodynamique en eau de mer par des voies analytique- in CDROM proceedings Electrotechnique du Futur EF 07 Toulouse 6-7 sept 2007
- [CN2] . Scullier, JF Charpentier, E. Semail, S. Clenet- Comparaison de bobinages polyphasés de machines synchrones à aimants permanents pour un cahier des charges de propulseur naval- in CDROM proceedings Electrotechnique du Futur EF 07 Toulouse 6-7 sept 2007
- [CN1] J. Rios Quesada, JF Charpentier, V. Lemarquand, G. Lemarquand- Calcul du couple d'une machine à aimants permanents par des considérations énergétiques, EF'99 (Electrotechnique du Futur), Lille 30-31 mars 1999 dans les actes pp 298-302.

### 4 Revue nationale :

- [RN] S.E. Ben Elghali, L. Drouen, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, J. A. Astolfi, F. Hauville- Les systèmes de génération d'énergie électrique à partir des courants de marées, Revue 3EI, Mars 2008 pp 73-85

### 5 Rapports de contrats industriels.

- [RC4] G. Bonizec, JF Charpentier- Description des modèles développés de pré-dimensionnement de Systèmes de Stockage inertiels et application aux cahiers des charges fournis par DCNS- Rapport de Contrat de Recherche avec la société DCNS décembre 2008
- [RC3] G. Bonizec, JF Charpentier- Etude bibliographique sur les Systèmes de Stockage inertiels d'énergie et leur application sur un réseau de bord de navire Rapport de Contrat de Recherche avec la société DCNS mars 2008
- [RC2] L. Drouen, JF Charpentier, J Rios Quesada -Etude de prédimensionnement d'un propulseur Rim Driven - Rapport de Contrat de Recherche avec la société DCNS octobre 2006
- [RC1] L. Drouen, JF Charpentier, J Rios Quesada- Etude bibliographique sur les systèmes propulsifs électriques à entraînement périphérique Rapport de Contrat de Recherche avec la société DCNS mai 2006

### 6 Mémoires de thèse et de Master Recherche encadrés.

#### Thèses :

- [T3] S.E. Benelghali "On multiphysics modeling and control of marine current turbine systems". Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale-8/12/2009.
- [T2] F. Scullier- développement d'outil de conception de machines polyphasées à aimants utilisant l'approche multimachine- Thèse de doctorat de l'ENSAM (13 décembre 2006)
- [T1] J. Rios-Quesada\_Contribution à l'étude d'un alternateur monophasé à aimants permanents et stator en poudre de fer à faible encombrement axial-Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale (10 octobre 2002)

### **Masters Recherche et DEA**

- [M6] Aro RAMAROTAFIKA- “ Etude d’outils d’évaluation du potentiel hydrolien d’un site en fonction des technologies de machines implantées »-Rapport de Master Recherche Arts et Métiers Paris-Tech IRENAv 2010
- [M5] A. Thoreux Etude de l’influence des effets de diverses disparités sur le fonctionnement et la stabilité d’un actionneur asynchrone. rapport de Master Recherche INP Lorraine ENSEM IRENAv 2009
- [M4] L. Baldeck Evaluation de la faisabilité d'une hydrolienne à entraînement circonférentiel à géométrie par secteurs rapport de Master Recherche INP Toulouse ENSEEIHT IRENAv 2009.
- [M3] G. Bonizec Stockage inertiel d'énergie sur un réseau de bord de navire –rapport de Master Recherche INP Toulouse ENSEEIHT IRENAv 2008
- [M2] F. Quénéhervé : Etude, modélisation et prédimensionnement d’un système de propulsion navale magnétohydrodynamique rapport de Master Recherche INP Toulouse ENSEEIHT IRENAv 2005.
- [M1] P. De Oliveira : étude de systèmes magnéto mécaniques rapport de DEA UBO LEMB 98-99.

## **Partie B : RAPPORT DE SYNTHÈSE**

# I) Genèse et Contexte de mes activités de Recherche

## 1 Introduction

L'objectif de cette partie est de situer ma démarche personnelle de recherche à travers la présentation d'une progression thématique. Cette progression m'a conduit, à partir de premiers travaux plutôt axés sur le développement et la mise en œuvre de modèles numériques génériques pour l'étude des structures électromagnétiques, à m'orienter progressivement vers le développement et l'utilisation de modèles dédiés à la conception et le dimensionnement des systèmes de conversion d'énergie électrique dans leur environnement. Cette évolution m'a progressivement conduit à m'intéresser à des outils de modélisation souvent basés sur une approche analytique.

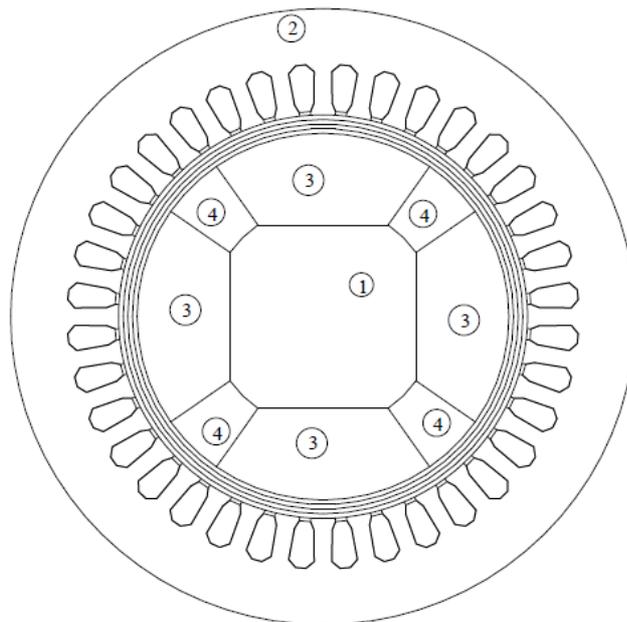
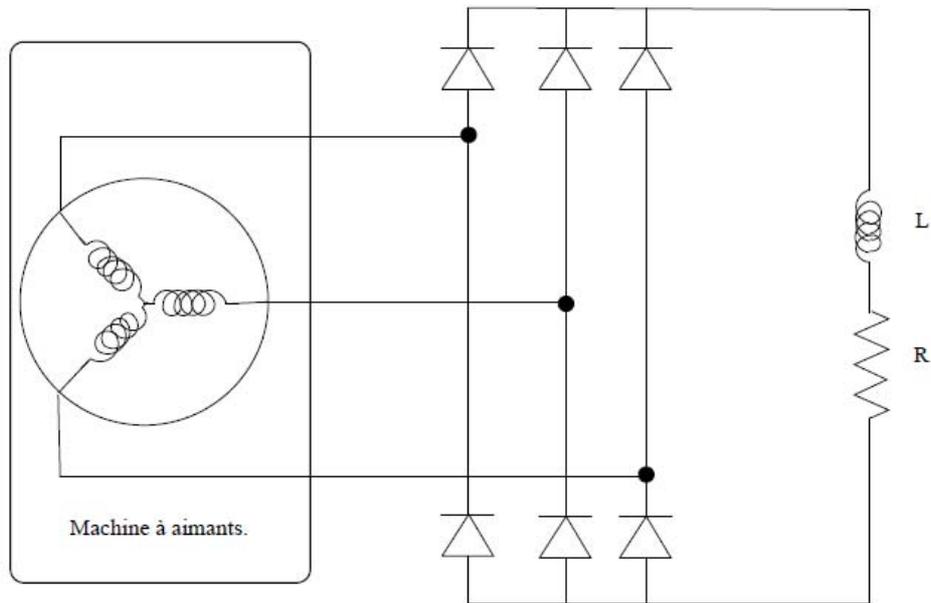
## 2 Travaux sur le calcul du champ numérique.

Au cours de mes premières activités de recherche, je me suis essentiellement consacré à la mise en œuvre de modèles numériques au cours de ma thèse de doctorat à l'INP Toulouse au LEEI de 1993 à 1996 [1].

L'objectif de cette thèse de doctorat, supervisée par Y. Lefevre et M. Lajoie Mazenc était alors de mettre au point des modèles permettant le couplage de méthodes de calculs de champs en éléments finis 2D dans les dispositifs magnétiques et des méthodes d'analyse des circuits électroniques des convertisseurs qui étaient connectés à ces dispositifs. Dans les années 90 la résolution de ce type de problème représentait un enjeu majeur pour le développement des codes de calculs par éléments finis [2-7]. L'approche que nous avons choisie se voulait globale et générique et a permis d'aboutir à un outil permettant de traiter un grand nombre de dispositifs et leur alimentation électronique par résolution simultanée des équations du champ et du circuit [8-10].

Cet outil permettait de simuler le comportement d'un ensemble constitué d'une structure électromagnétique et d'un circuit complexe. La structure électromagnétique pouvait comprendre des conducteurs alimentés ou non alimentés "massifs" ou "fins", des matériaux saturables et des parties mobiles. Cette structure magnétique pouvait être associée à tout type de circuit complexe pouvant comprendre des interrupteurs électroniques (convertisseur statique). Il était par exemple possible avec cet outil de qualifier et quantifier l'influence mutuelle de la présence de courants de Foucault dans les parties conductrices d'une machine synchrone et les commutations (par exemple les phénomènes d'empiétements) dans un redresseur ou un commutateur de courant qui lui était associé. Les Figures I.1, I.2, I.3 et I.4 présentent des exemples de ce type de simulation effectuée avec l'outil alors réalisé. Il s'agit ici de la simulation du comportement global d'un ensemble machine synchrone à aimants permanents associée à un redresseur. Les simulations sont effectuées dans le cas de la présence d'une frette conductrice ou non conductrice (figure I.1). Les résultats de la figure I.3 montrent

l'influence des courants de Foucault dans la frette conductrice sur les commutations du redresseur.



- ① Fer (rotor)
- ② Fer (stator)
- ③ Aimants
- ④ Cales amagnétiques

Figure I.1 Machine associée à un redresseur

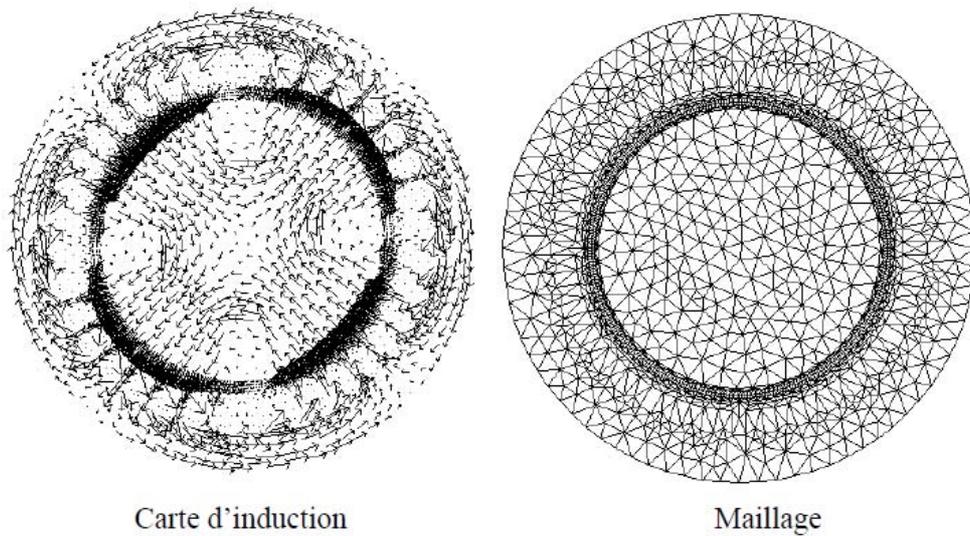


Figure I.2 Maillage et carte d'induction dans la machine

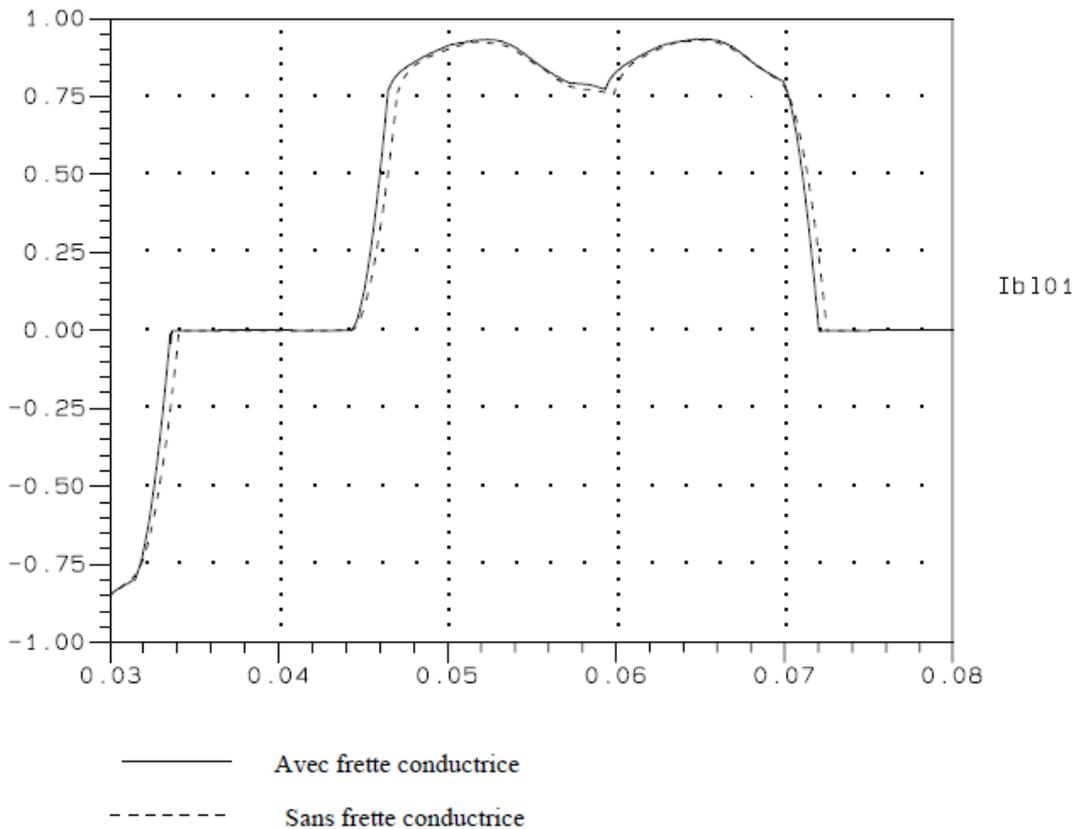


Figure I.3 Influence de la présence d'une frette conductrice sur les courants parcourant les bobinages de la machine (courants en p.u)

L'intérêt de ce type d'approche est évident pour étudier finement l'influence mutuelle des phénomènes électromagnétiques et du comportement convertisseur. Ce type de modèle avec un couplage fort entre les équations des convertisseurs et un calcul de champ en 2D et en 3D fait maintenant partie des offres standard des codes de calcul commerciaux [11,12,13].

A l'époque, je n'avais pas ou très peu d'expérience en tant qu'utilisateur de moyens de calculs pour la conception de systèmes. Cependant j'avais bien conscience que ce type d'outils numériques très performants mais très lourds nécessitait un investissement important de l'utilisateur en moyens de calcul, en temps et en expertise pour définir le problème, le résoudre et exploiter les résultats de manière pertinente.

Après avoir soutenu ma thèse en 1996, j'ai effectué un séjour post-doctoral d'un an au LEEPCI à l'Université Laval à Québec. Le sujet sur lequel j'ai travaillé était alors le couplage de méthodes d'optimisation non linéaires avec contraintes et d'outils numériques par différences finies 2D [14]. L'objectif d'une telle approche était de dimensionner de manière optimale des structures électromagnétiques. La méthode d'optimisation employée était basée sur la méthode des lagrangiens projetés (nous utilisons le package d'optimisation NPSOL). C'est une méthode d'optimisation de type gradient où les contraintes sont considérées comme des fonctions objectifs lorsque elles ne sont pas respectées [15]. Du côté de la modélisation électromagnétique, nous nous sommes basés sur des calculs de structures simples comme des bobines, des transformateurs ou des machines à aimants. Les calculs du champ dans les structures étaient alors effectués avec l'hypothèse de la magnétostatique 2D.

Les premiers essais que nous avons effectués nous ont montré que l'utilisation d'un tel couplage sans précaution particulière posait des problèmes de convergence de l'algorithme d'optimisation lorsque des maillages à faible densité étaient employés. En effet les différences de valeurs calculées sur les fonctions objectif et les contraintes non linéaires, entre 2 itérations, lorsque les dimensions changeaient légèrement n'étaient pas seulement liées à la variation des dimensions mais aussi à la dégradation ou à l'amélioration de la qualité du maillage de la structure magnétique. La solution d'utiliser des maillages très denses qui permettaient de minimiser ces problèmes conduisait à des temps de calcul prohibitifs.

Nous avons alors élaboré une stratégie permettant de générer une loi de maillage qui était identifiée pour une structure donnée. Cette loi était déterminée a priori avant le processus de dimensionnement en optimisant la densité des divisions de la grille sur un calcul du champ effectuée préalablement sur une structure type selon un critère énergétique [16,17]. La connaissance de cette loi permettait alors de déterminer des maillages dont la « qualité » variait peu lorsque les dimensions changeaient. Cette approche permettait une convergence plus aisée du processus d'optimisation dimensionnelle. La figure I.3 montre un exemple de ce processus de génération de maillage pour le cas très simple d'une bobine à noyau droit. Ce séjour post-doctoral m'a conduit à évoluer d'un rôle de concepteur de modèles numériques à celui d'utilisateur de modèles pour la conception. Il m'a permis de m'initier au processus de dimensionnement systématique des systèmes. Il m'a également fait prendre conscience des difficultés de l'utilisation du calcul du champ numérique dans des processus de dimensionnement systématique.

Bien que les cas traités aient été très simples (structures peu complexes, calcul en magnétostatique 2D), la mise en œuvre d'un couplage efficace entre un algorithme d'optimisation non linéaire avec contraintes et un procédé de calcul du champ numérique nécessitait des précautions particulières et l'élaboration d'un processus de maillage adapté et contrôlé si l'on voulait un bon compromis entre le temps de calcul, la stabilité et la précision.

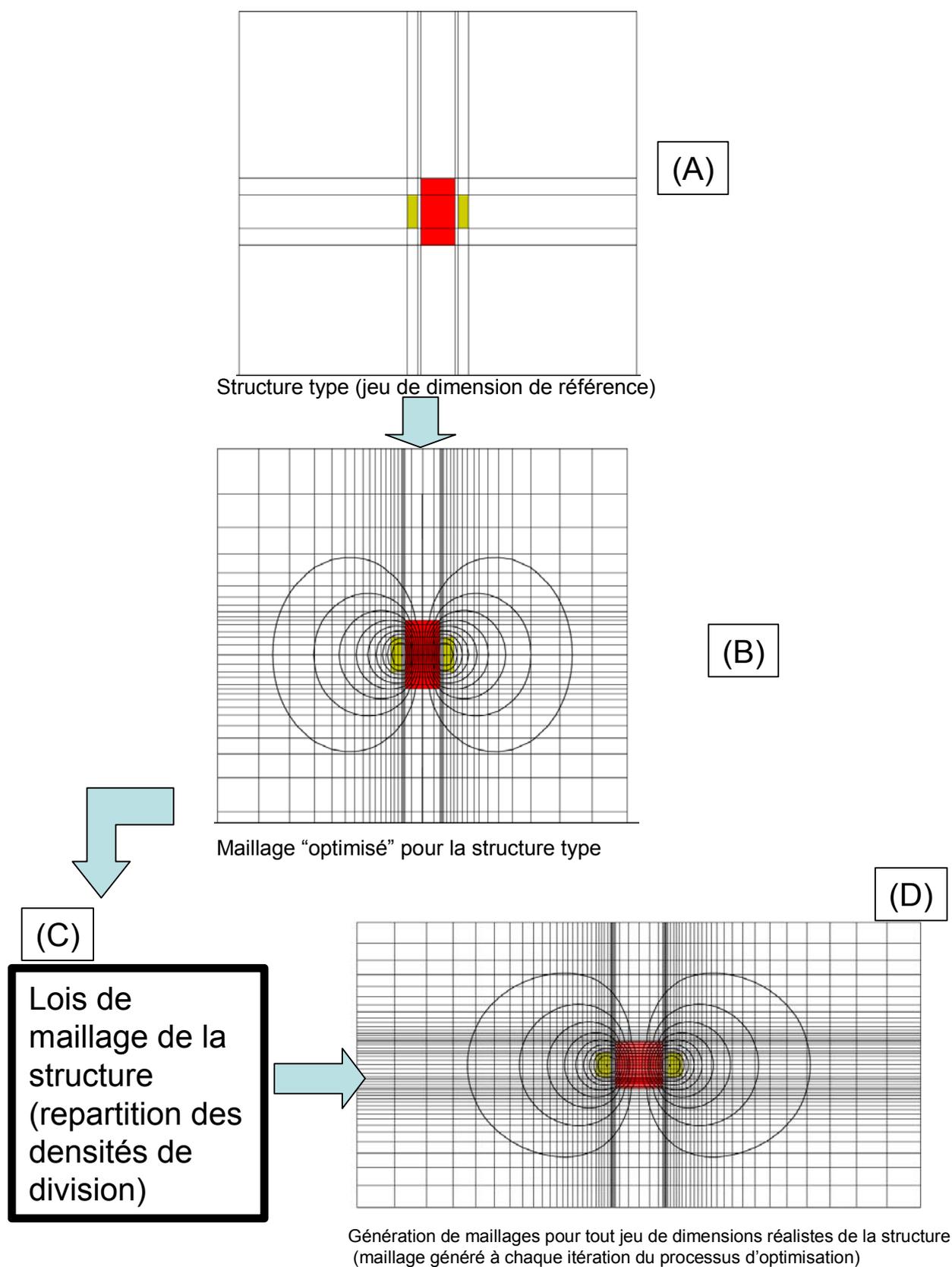


Figure I.4 : Exemple de processus de génération de maillage DF adapté à l'optimisation dimensionnelle

### **3 Evolution du contexte de mes activités de recherche**

A la suite de mon séjour post-doctoral à l'université Laval au Québec, j'ai débuté ma carrière d'enseignant chercheur en occupant un poste de maître de conférences à l'Université de Bretagne Occidentale de 1997 à 2002 au LEMB. J'y ai travaillé avec le Pr. G. Lemarquand qui dirigeait cette petite structure qui venait d'être créée (4 enseignants-chercheurs, 2 à 3 doctorants).

Mes travaux de recherches se sont alors plus orientés vers la recherche et le dimensionnement optimal de structures magnétiques. Nous nous intéressions soit à des machines électriques (par exemple au cours des travaux menés pendant la thèse de J. Rios-Quesada que j'ai co-encadré) soit à des systèmes magnéto-mécaniques à aimants permanents (accouplements, paliers et engrenages magnétiques à aimants) [18]. La plupart de ces structures étaient le siège de phénomènes électromagnétiques tridimensionnels. L'utilisation de codes de calcul numérique étaient limitée par leur lourdeur de mise en œuvre dans les cas 3D ainsi que par la nécessité d'avoir des maillages de très bonne qualité afin d'obtenir des calculs précis des forces dans le cas des systèmes magnéto mécaniques. De plus nous avons la volonté d'effectuer des investigations et des comparaisons systématiques de concepts conventionnels et non conventionnels. Nous souhaitions également dégager des règles de dimensionnement de ces systèmes. La voie choisie pour cette investigation systématique reposait donc soit sur un balayage des grandeurs de dimensionnement soit sur l'usage d'algorithmes d'optimisation non linéaire avec contraintes. Le calcul du champ numérique est apparu rapidement comme peu adapté à ce type d'approche. La lourdeur des calculs numériques conduisait à des temps de calculs souvent prohibitifs. La sensibilité des calculs à la qualité du maillage (qui évolue lors des variations dimensionnelles des structures) était particulièrement critique surtout dans le cas du calcul des forces dans les systèmes magnéto mécaniques. Ce type de calcul nécessite en effet un maillage de très bonne qualité dans les zones d'interaction (entrefer).

Ceci nous a conduit à nous intéresser à des approches analytiques ou semi analytiques qui apparaissaient intéressantes pour ce type d'approches. J'ai pu au cours de cette période, bénéficiant de l'expérience du LEMB dans le domaine, mettre en œuvre en particulier des méthodes de modélisation basées sur la représentation équivalente des sources de champ du système par un ensemble de sources de champ élémentaires (comme par exemple les masses magnétiques). Ce type de méthode sera présenté plus en détail dans la suite de ce document.

A partir de 2002, j'ai occupé suite à une mutation un poste de maître de conférences aux Arts et Métiers Paris Tech en délégation à l'Ecole Navale. J'ai muté sur ce poste qui me permettait de développer des activités de recherche et d'enseignement dans le contexte applicatif maritime. Mes activités de recherche se sont alors déroulées à l'IRENav (EA3634) au sein du groupe Mécanique et énergétique en environnement naval (M2EN).

Ce laboratoire a la particularité d'être axé autour d'un champ applicatif, l'environnement naval, plutôt que d'un champ disciplinaire comme c'est le cas traditionnellement pour la plupart des laboratoires de recherche [19]. Le laboratoire en général et le groupe M2EN en particulier a la particularité d'être très fortement pluridisciplinaire. Le groupe M2EN regroupe des spécialistes de l'hydrodynamique (écoulements turbulents, cavitation, modélisation et conception d'hélices), des spécialistes des techniques d'usinage et des spécialistes de l'électrotechnique (je suis le seul chercheur permanent dans ce domaine).

Le laboratoire comprend aussi dans ses autres composantes des spécialistes des systèmes d'information géographiques (informaticiens, géographes, biologistes marins) et

des spécialistes de l'acoustique sous marine (acousticiens et chercheurs en traitement du signal) [20].

Au sein du groupe M2EN, J'ai été progressivement conduit à coordonner l'axe concernant la conversion d'énergie. Cet axe concernait deux champs applicatifs : les systèmes d'énergie propulsion à bord des navires et les systèmes d'énergie renouvelables marines. L'isolement sur ma thématique de recherche du laboratoire pouvait paraître, pour mes recherches, un handicap évident. Cependant la diversité des thématiques traitées par l'institut me paraissait un avantage qui pouvait compenser largement cette situation. C'est pourquoi j'ai souhaité m'impliquer dans des activités de modélisation et de conception qui impliquait plusieurs domaines de recherche et cela afin de mettre en évidence des concepts nouveaux et de perfectionner des systèmes existants. Les travaux menés sur les systèmes propulsifs ont été principalement développés au cours des travaux des thèses de F. Sculler et L. Drouen et ceux sur les systèmes d'énergie renouvelable marine, au cours des thèses de L. Drouen et S. Benelghali, que j'ai co-encadrés à l'IRENav.

A titre d'exemple, si l'on considère un système d'extraction d'énergie renouvelable marine comme une hydrolienne, la conception, le dimensionnement ou la modélisation d'un tel dispositif nécessite de faire cohabiter des modèles concernant des domaines très différents comme on peut le constater à la figure I.5 qui présente le schéma global de la chaîne de conversion d'une hydrolienne et est issue de [21] (thèse de S. Benelghali). La prédiction de la ressource énergétique in situ nécessite des modèles qui font appel à l'océanographie physique et la météorologie. La prise en compte des contraintes d'installation des systèmes fait appel à la géologie et à la géographie et aux domaines des structures et ancrages offshore ainsi qu'à la tenue à la mer. Le comportement du capteur mécanique d'énergie (turbine dans le cas d'une hydrolienne) nécessite l'inclusion de modèles hydrodynamiques. La chaîne d'entraînement et le comportement des pièces mobiles peuvent faire appel à des modèles mécaniques plus ou moins complexes. Le convertisseur électromécanique son alimentation et sa commande nécessitent eux une modélisation électrotechnique, électromagnétique et thermique.

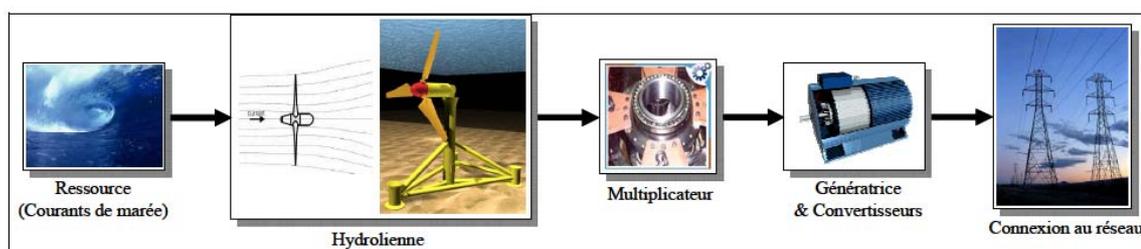


Figure I.5 : Schéma global de la chaîne de conversion d'une hydrolienne.

Pour l'étude de dispositifs non conventionnels de systèmes de récupération d'énergie marine ou de systèmes de propulsion de navire une approche globale est donc le plus souvent nécessaire. Elle peut être utilisée dans un but de conception (étude de nouveaux concepts), dans un but de dimensionnement des composants ou de modélisation globale du système. A titre d'exemple, la figure I.6 issue des travaux menés au cours du doctorat de L. Drouen illustre le principe de la conception d'une hydrolienne non conventionnelle dans son environnement. Cette approche intègre les aspects électromagnétiques, hydrodynamiques, thermiques ainsi que la caractérisation de la ressource sur un site. En effet une approche où l'on étudie un seul élément indépendamment des autres conduit dans la plupart des cas à des solutions mal adaptées à l'application. Il est à noter de plus que la conception et le dimensionnement des convertisseurs électromécaniques dans ces systèmes vont fortement dépendre des lois de

commandes choisies. Il est nécessaire de concevoir l'ensemble machine convertisseur commande comme un tout pour arriver à des résultats pertinents.

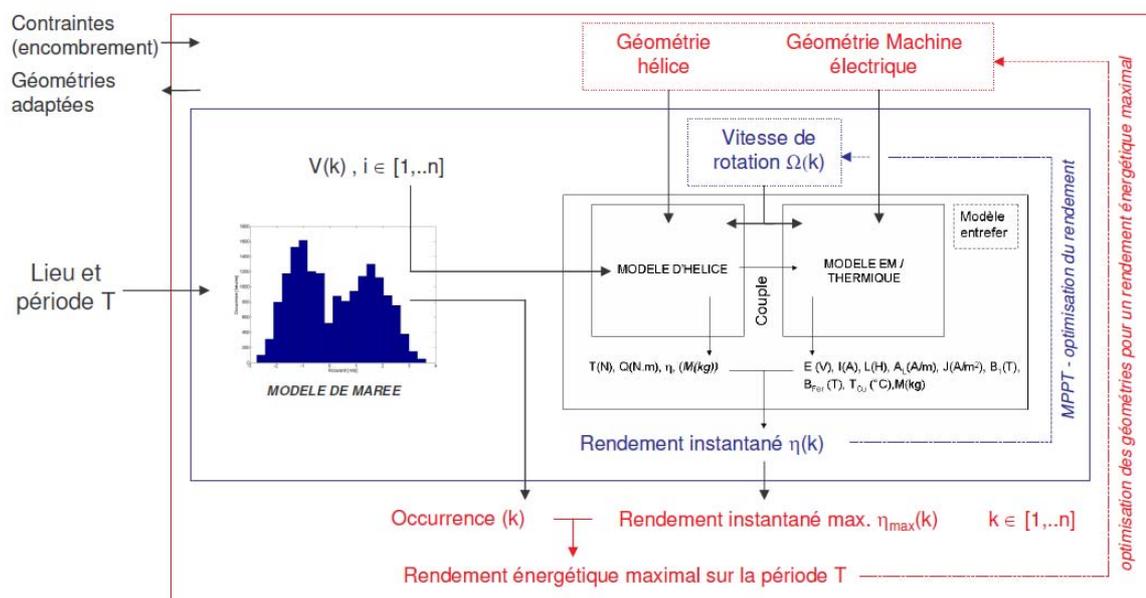


Figure I.6 : Principe du dimensionnement global multi physique d'une hydrolienne non conventionnelle (travaux de L. Drouen)

Afin de pouvoir développer une telle approche globale de modélisation multi physique il est nécessaire de disposer de modèles des composants des systèmes avec différents niveaux de précision. En effet, lors des phases de recherche des meilleures solutions architecturales et lors des premières phases de dimensionnement, il est nécessaire que les modèles à utiliser et à coupler soit suffisamment légers pour pouvoir tester et comparer un grand nombre de solutions de manière systématique (avec éventuellement l'utilisation de procédures d'optimisation). Il est également judicieux que ces modèles puissent facilement être utilisés pour une analyse qualitative. Pour toutes ces raisons une approche basée sur des formulations analytiques peut être particulièrement pertinente car elle répond parfaitement à ces critères. Ce type d'approche est totalement complémentaire de l'utilisation de moyens de calculs numériques. Les codes numériques permettent, de part leur côté générique, de valider les outils analytiques et les hypothèses simplificatrices qui permettent le calcul. De plus leur utilisation permet d'affiner les dernières phases de dimensionnement avant prototypage en effectuant des simulations au plus proche de la réalité.

C'est pour ces raisons que je me suis intéressé à la mise en œuvre de modèles analytiques des convertisseurs électromécaniques. Ces modèles analytiques permettent en effet une analyse qualitative et une intégration dans un modèle multi physique de conception et de dimensionnement

## 4 Conclusion

Le début de mes travaux de recherche m'a permis de travailler dans le domaine de la modélisation numérique des systèmes électromagnétiques. L'approche numérique présente l'avantage d'être générique car un même code de calcul permet d'étudier un très

grand nombre de structures, nécessite peu d'hypothèses simplificatrices et peut être d'une très grande précision si son utilisation est maîtrisée. Cependant elle n'est pas toujours compatible avec la mise en œuvre de processus de conception et de dimensionnement systématique. En effet la relative lourdeur du processus (en particulier dans les cas 3D) ainsi que la sensibilité des résultats à la variation des maillages rendent l'intégration de codes numériques dans de telles procédures souvent difficile. Il est également souvent difficile à partir de modèles numériques d'avoir une analyse qualitative directe des performances d'un système ce qui est très utile pour l'évaluation des concepts.

Je me suis intéressé progressivement aux applications maritimes. L'intégration de modèles des systèmes électromagnétiques au sein d'une démarche de conception ou de dimensionnement global est souvent nécessaire pour aborder les problématiques des systèmes de conversion d'énergie en environnement marin. Il est alors préférable de disposer d'outils de modélisation avec différents niveaux de précision et de complexité.

Pour toutes ces raisons j'ai été conduit à m'intéresser à des modèles des structures électromagnétiques basés sur une approche analytique. Cette approche est complémentaire de l'approche numérique. Elle présente les avantages de la simplicité, de la rapidité de calcul et de ne pas reposer sur une discrétisation de l'espace qui varie avec les dimensions des structures. Cependant son inconvénient majeur est qu'elle nécessite en général des hypothèses simplificatrices très fortes. Pour cette raison les modèles ne peuvent être génériques et les formulations doivent être adaptées à chaque cas traité et les hypothèses d'études qui conditionnent le domaine de validité et la précision des modèles doivent être bien maîtrisés. Si l'on s'intéresse à des structures non conventionnelles, il faut alors en général adapter un certain nombre de principes de calcul afin de mettre en œuvre un modèle permettant une représentation réaliste des phénomènes.

C'est ce type d'approche que je souhaite présenter et illustrer dans les deux parties suivantes. Une de ces parties sera alors consacrée à l'utilisation de modèles basés sur la résolution des équations de Maxwell de manière analytique soit sous leur forme intégrale soit sous leur forme locale. Une autre de ces parties sera consacrée à l'utilisation de modèles où les systèmes peuvent être représentés sous une forme simplifiée sous la forme de distributions de sources élémentaires de champ (sources magnétiques, densité de courant) dans le vide.

## **II) Utilisation de Modèles analytiques basés sur la résolution des équations aux dérivées partielles de Maxwell**

### **1 Introduction**

Les modèles présentés au cours de ce chapitre peuvent s'appliquer aux machines à aimants à pôles lisses (sans pièces polaires) et reposent sur une résolution directe des équations de Maxwell. Dans notre cas nous allons montrer que ces modèles, bien que de formulation relativement classique, peuvent être utilisés pour l'évaluation des performances et pour le dimensionnement rapide et systématique de systèmes souvent non conventionnels.

Le premier paragraphe sera ainsi consacré à la présentation des hypothèses de calcul communes à ces 2 modèles. Nous y présenterons également les expressions des grandeurs électromagnétiques caractéristiques des performances d'une machine qui peuvent être calculées à partir de la connaissance du champ dans l'entrefer.

Le deuxième paragraphe sera consacré à la présentation des modèles de 1<sup>er</sup> ordre qui permettent le calcul de ce champ. Ce premier modèle est basé sur la résolution des équations de Maxwell sous leur forme intégrale (Théorème généraux d'Ampère, de conservation du flux, de Faraday) avec des hypothèses très fortes sur le trajet du champ dans l'entrefer. Ce modèle permet alors de déterminer grossièrement, à partir d'un jeu d'équations très simples, les performances d'une structure de machines électrique à aimants permanents à pôles lisses. L'intérêt de l'utilisation de ce type de modèle sera présenté à travers quelques exemples d'étude de structures de systèmes prenant en compte plusieurs modèles physiques couplés.

Dans un troisième paragraphe nous présenterons un modèle analytique classique qui permet le calcul du champ en 2D dans l'entrefer et dans le volume d'aimant. En effet, dans certains cas, La machine peut être ramenée à une partie d'un système infiniment long, à couches à perméabilités homogène selon une de ses dimensions 2D. Il est alors possible de résoudre analytiquement l'équation de la magnétostatique en 2D dans ce système. Nous présenterons alors l'utilisation de ce type de formulation dans le cas d'une machine à aimant synchrone polyphasée tournante. L'utilisation de cette méthode est en effet particulièrement intéressante lorsqu'elle est associée au formalisme multi machine des machines polyphasées. Ce type de modèle sera également illustré par l'étude d'une machine linéaire à stator long utilisée pour le catapultage d'aéronefs pour porte-avions.

### **2 Rappels sur la représentation et calcul des grandeurs de base d'une machine à aimants à pôles lisses à aimants déposés en surface.**

Nous voulons ici présenter les machines sur lesquelles nous avons en général appliqué les modèles présentés. Ce sont des machines à pôles lisses à aimants déposés en surface. Nous présenterons tout d'abord succinctement la structure de ces machines. Nous

décrivons ensuite les hypothèses simplificatrices utilisées qui conduisent à calculer le champ magnétique dans une structure volontairement simplifiée.

Puis nous nous intéresserons à la représentation des sources de champs au sein du système (ces sources de champ sont les bobinages et les aimants permanents déposés en surface d'une culasse rotorique). Nous montrerons ensuite comment à partir de la connaissance du champ dans l'entrefer d'une telle structure il est possible de calculer les grandeurs qui sont l'image des performances de la machine (flux, forces électromotrices, couple électromagnétique, etc.)

## 2.1 Hypothèses de base

Nous nous intéressons dans ce chapitre à des machines à pôles lisses à aimants déposés en surface. Dans ce type de machine le rotor (ou la partie mobile pour les machines linéaires) ne présente pas de phénomènes de saillance. Les machines étudiées ici sont du type présenté à la figure II.1 pour les machines tournantes. La machine est alors considérée comme assimilable à une partie d'un système infiniment long (hypothèse 2D).

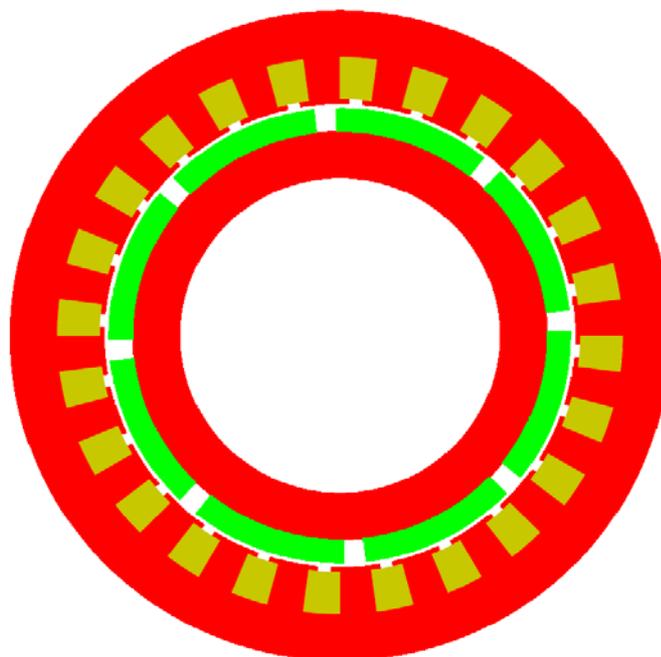


Figure II.1 : Exemple de machine à pôles lisses

Les méthodes que nous présentons ici supposent que le domaine d'étude ou le champ est calculé puisse être subdivisé en couches d'épaisseurs et de perméabilités homogènes suivant une des dimensions (cette dimension étant rayon sur les machines tournantes). Il semble évident que la culasse rotorique et la zone où sont localisés les aimants peuvent correspondre relativement facilement à cette définition. Ce n'est en général pas le cas de la zone où sont localisés les conducteurs statoriques qui est dans la plupart des cas hétérogène en terme de perméabilité du fait de la présence des encoches.

On est alors amené à assimiler la structure étudiée à une machine équivalente sans encoches au stator. Cela signifie que les courants contenus dans les encoches sont reportés sous forme de densité linéique sur la surface de la culasse statorique selon l'hypothèse du mur ferromagnétique (figure II.2) [22-27].

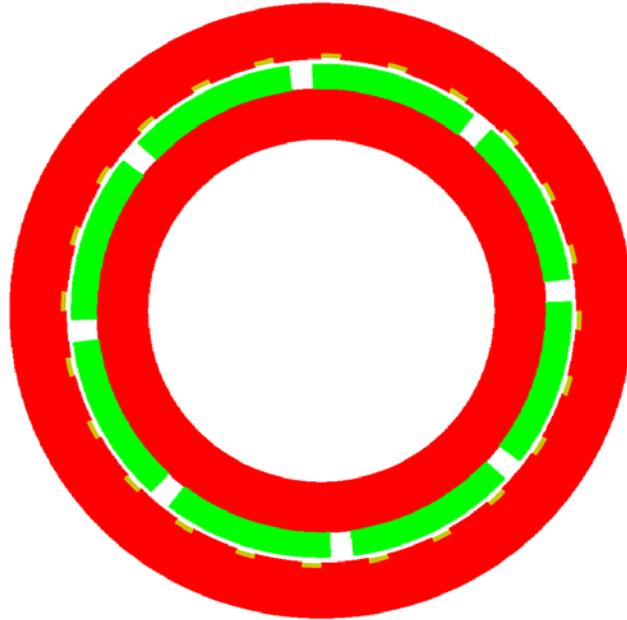


Figure II.2 Machine sans encoche équivalente à la machine de la figure II.1

Afin de simplifier les calculs, la perméabilité des culasses ferromagnétiques peut être assimilable à une perméabilité infinie. Ce point n'est pas obligatoire pour la résolution analytique du champ en 2D, où le champ peut être calculé dans ces culasses si elles sont homogènes, mais cette hypothèse conduit à une simplification des expressions. Un coefficient dit « de Carter » peut être introduit afin de prendre en compte l'influence moyenne de la perméance de la denture sur l'induction dans l'entrefer. L'expression de ce coefficient correcteur qui est issue d'une transformation conforme est détaillée par exemple dans [28,29].

Au cours des deux paragraphes suivants nous allons présenter les outils mathématiques qui permettent de décrire la topologie d'une machine à aimants permanents à pôles lisses. Nous nous intéresserons en particulier à la description de la topologie du bobinage et des aimants.

## 2.2 Représentation du bobinage

On peut décrire la répartition du bobinage d'une phase (qui est ici notée avec l'indice  $i$ ) par une fonction  $dc_i(\alpha)$  [23, 26, 30, 31]. Cette fonction décrit la densité de conducteur à la surface du stator en fonction de  $\alpha$  la position angulaire le long de la circonférence du stator (cette densité de conducteur est positive dans le cas de conducteurs aller, négative dans le cas de conducteurs retour). On a alors

$$\int_0^{2\pi} |dc_i(\alpha)| d\alpha = n \quad (\text{II.1})$$

$n$  est ici le nombre de conducteurs actifs par phase dans la machine.

Un autre outil mathématique peut être également utilisé pour décrire le bobinage d'une phase. Il est en effet possible de décrire le bobinage d'une phase par une fonction de tours  $n_i(\alpha)$  qui représente le nombre de conducteurs aller (positif) et retour (négatif) de la phase, comptés le long de la circonférence de la machine. Cette fonction n'est pas, *a priori*, à valeur moyenne nulle. La fonction  $dc_i(\alpha)$  est alors la dérivée de  $n_i(\alpha)$  par rapport à  $\alpha$ . Afin de se ramener à une fonction qui est l'image, au courant près, de la

force magnétomotrice de la phase, on est alors amené à définir une fonction de bobinage notée  $N_i(\alpha)$ . Cette fonction est la valeur alternative de  $n_i(\alpha)$  [32,33].

$$N_i(\alpha) = n_i(\alpha) - \langle n_i(\alpha) \rangle \quad (\text{II.2})$$

$\langle n_i(\alpha) \rangle$  est ici la valeur moyenne de  $n_i(\alpha)$

Ainsi si je considère une machine triphasée à bobinage diamétral à une encoche par pôle et par phase avec une ouverture d'encoche de  $1/6$  pôle La fonction  $dc_i(\alpha)$ ,  $n_i(\alpha)$  et  $N_i(\alpha)$  peuvent être représentées selon le schéma de la figure II.3.

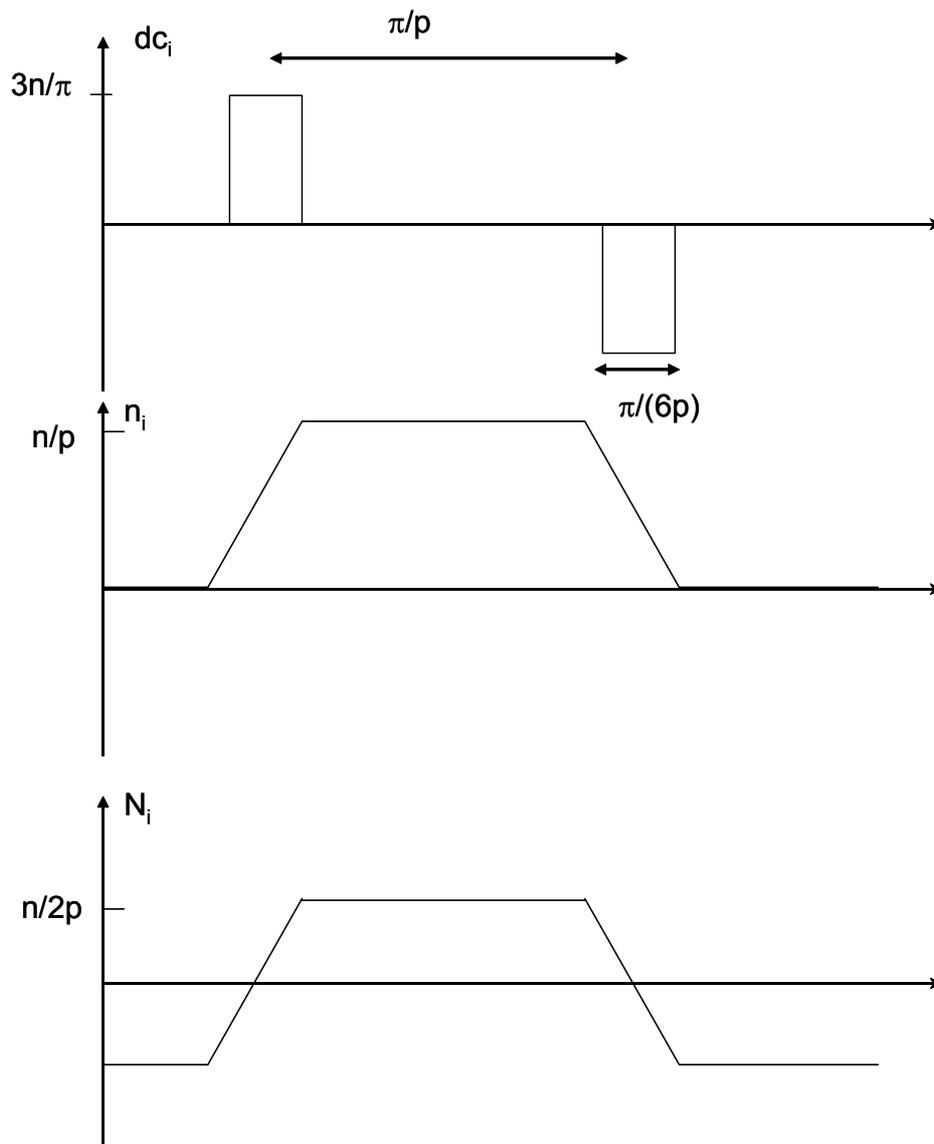


Figure II .3 Exemple de densité de conducteurs fonction de tours et fonction de bobinage d'une phase.

Ces fonctions sont périodiques de période  $\frac{2\pi}{PGCD(N_s, p)}$ , où  $p$  est le nombre de paires de pôles et  $N_s$  le nombre d'encoches de la machine. Chacune des fonctions de phase est décalée par rapport à la suivante de  $d.N_s \frac{2\pi}{N.PGCD(N_s, p)}$ , où  $d$  est un entier et  $N$  le nombre de phases de manière à former un bobinage équilibré.

Il est également envisageable de ramener les densités de conducteurs d'une encoche en un point centré sur l'encoche. Cela permet en première approximation de discrétiser les fonctions représentatives du bobinage.

Il est à noter qu'il est alors possible de définir connaissant le nombre d'encoches, une matrice de distribution  $D$  et de fonction de bobinage  $B$  qui représentent les valeurs discrètes sur l'espace des encoches (les matrices ont un nombre de ligne égal au nombre d'encoches). Chacune des colonnes représente alors la valeur discrète des fonctions  $dc_i(\alpha)$  et  $N_i(\alpha)$ . Ceci permet un traitement matriciel des grandeurs. Il est possible de remonter aux fonctions de bobinage réelles à partir de ces matrices à l'aide de l'utilisation de fonctions portes. Ce procédé est détaillé dans [27] et [34].

### 2.3 Représentation des aimants

Les outils mathématiques choisis pour la description des aimants sont deux fonctions périodiques  $f_{ar}$  et  $f_{at}$ , qui définissent la valeur de la composante de l'aimantation normale à l'entrefer (radiale dans le cas d'une machine tournante) et tangentielle à l'entrefer (ortho radiale dans le cas d'une machine tournante) en fonction de la position angulaire  $\alpha$ .

$$Mr(\alpha) = \begin{pmatrix} f_{ar}(\alpha) \\ f_{at}(\alpha) \end{pmatrix} \quad (II.3)$$

Ces fonctions sont, *a priori*,  $2\pi/p$  périodiques et sont également anti-périodiques. Elles peuvent être décomposés en série de Fourier

A titre d'exemple la figure II.4 issue de [27] présente l'évolution de ces fonctions pour une paire de pôles non conventionnels dont la répartition d'aimantation est inspirée des anneaux de Halbach [35-37].

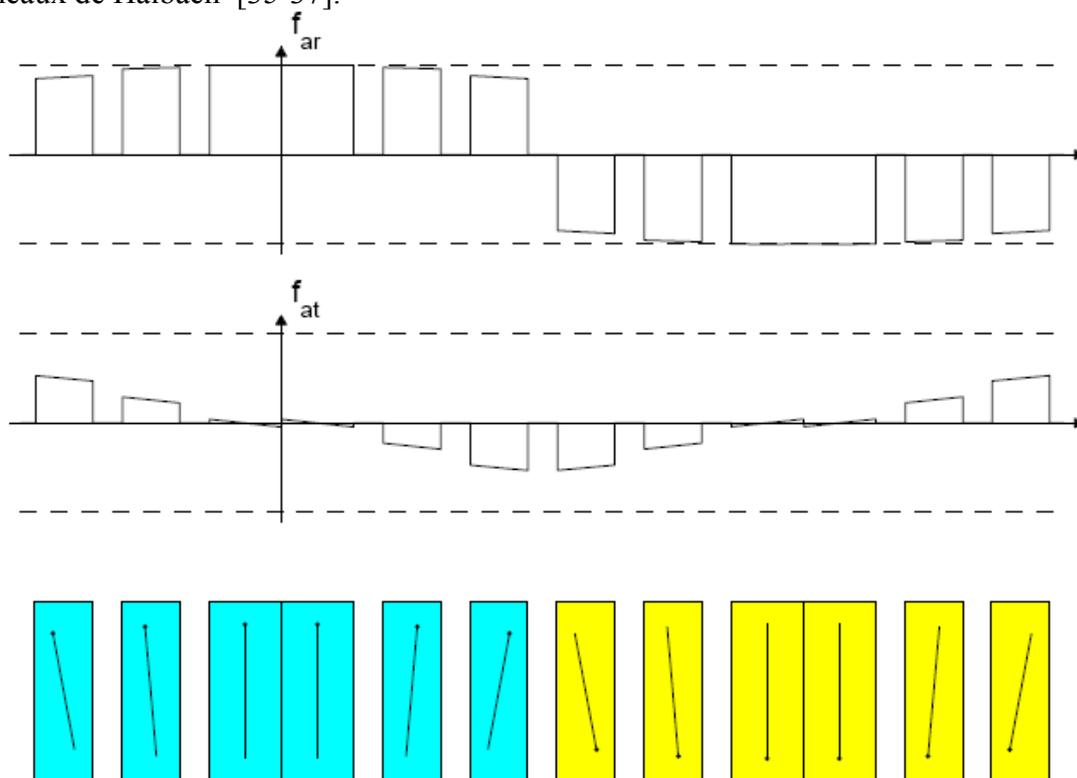


Figure II.4 : exemple de fonction d'aimantation (figure issue du mémoire de thèse de F. Scuiller [27])

Dans le cas particulier où les aimants sont radiaux la composante tangentielle de l'aimantation est nulle. La valeur de  $f_{ar}$  au niveau de chaque bloc d'aimant est alors égale

à l'aimantation rémanente signée par la polarité de l'aimant. Il est à noter que la représentation de cette aimantation par des fonctions de ce type permet d'optimiser la géométrie d'aimant. Il suffit en effet sous contrainte de déterminer les fonctions  $f_{ar}$  et  $f_{at}$  optimales pour un problème donné et d'évaluer dans un second temps la géométrie d'aimants qui permet d'obtenir ces formes d'ondes.

## 2.4 Expression des grandeurs globales.

L'objectif de ce paragraphe est à partir des fonctions mathématiques définies précédemment, et en supposant l'induction dans l'entrefer connue, d'exprimer les grandeurs globales qui sont en lien direct avec les performances électromagnétiques de la structure.

### 2.4.1 Expressions des flux vus par le bobinage

Le flux vu par un bobinage peut être considéré comme l'intégration du potentiel vecteur le long des conducteurs de ce bobinage. Ce flux peut alors s'exprimer comme la somme intégrale des contributions de chaque conducteur. La contribution de chaque conducteur est alors l'intégrale du potentiel vecteur le long de ce conducteur ce qui revient dans le cas 2D au produit du potentiel vecteur local  $A_s(\alpha)$  au niveau du stator par la longueur active de la structure (le potentiel vecteur est normal au plan d'étude et constant sur la longueur du fait de l'hypothèse 2D).

On obtient alors l'expression de ce flux (dans le cas cylindrique) sous la forme [26,30] :

$$\Phi_i = \int_0^{2\pi} A_s(\alpha) \cdot L \cdot dci(\alpha) \cdot R_s \cdot d\alpha \quad (\text{II.4})$$

$R_s$  étant le rayon d'alésage du stator et  $L$  la longueur axiale de la machine.

Cette expression permet un calcul direct du flux d'un bobinage à partir de la densité de conducteur et de la connaissance du potentiel vecteur.

Une autre expression du flux peut être déduite du flux coupé par un conducteur. Cette expression met alors en œuvre la fonction de tours et l'induction au niveau du stator  $B_s$  sous la forme:

$$\Phi_i = \int_0^{2\pi} B_s(\alpha) \cdot L \cdot ni(\alpha) \cdot R_s \cdot d\alpha \quad (\text{II.5})$$

Cette expression peut être ramenée à une expression utilisant la fonction de bobinage si l'induction  $B_s(\alpha)$  est à valeur moyenne nulle ce qui est fréquemment le cas :

$$\Phi_i = \int_0^{2\pi} B_s(\alpha) \cdot L \cdot Ni(\alpha) \cdot R_s \cdot d\alpha \quad (\text{II.6})$$

Il est à noter que cette dernière expression permet d'intégrer facilement les effets locaux de denture en remplaçant l'induction calculée sans encoche par son expression corrigée par la fonction de perméance  $\lambda(\alpha)$  ( définie au paragraphe 2.5).

$$\Phi_i = \int_0^{2\pi} \lambda(\alpha).B_s(\alpha).L.Ni(\alpha).R_s.d\alpha \quad (II.7)$$

### 2.4.2 Expression de la Force électromotrice et du couple électromagnétique.

La force électromotrice (FEM) de la machine peut être vue comme le flux créé par le rotor coupé par les conducteurs de la phase. On suppose que l'on connaît l'induction radiale  $Bes(\alpha, \theta)$  créée par le rotor, à l'interface stator entrefer, où sont disposées les densités de conducteurs pour une position  $\theta$  du rotor. Cette fonction ( $Bes(\alpha, \theta) = Bes(\alpha + \theta, 0)$ ) est en général  $2\pi/p$  périodique. Il est alors possible de déterminer la force électromotrice à vide  $E_i$  qui s'exerce sur une des phases de la machine en exprimant le flux coupé par les conducteurs de la phase soit :

$$E_i(t) = E_i(\theta(t)) = R_s L \Omega(t) \int_0^{2\pi} d c_i(\alpha) Bes(\alpha, \theta) d\alpha \quad (II.8)$$

où  $\Omega$  est ici la vitesse de la machine en rad/s.

Il est ainsi possible d'évaluer cette FEM à partir de la connaissance de l'induction au niveau de la culasse statorique soit directement (cas du modèle de 1<sup>er</sup> ordre) soit indirectement en obtenant  $Bes(\alpha, \theta)$  par dérivation à partir du potentiel vecteur (cas du modèle 2D).

Il est à noter que cette expression peut être déduite de la dérivation directe selon  $\theta$  de l'expression (II.4) ou (II.6) selon que l'on considère un mouvement relatif du rotor par rapport au stator ( $B_s$  dépend de  $\theta$ ) ou du stator par rapport au rotor ( $d_{ci}$  et  $Ni$  dépendent de  $\theta$ ).

Il est également possible à partir de la connaissance du potentiel vecteur de dériver directement l'expression de la FEM de la dérivation selon  $\theta$  de l'expression II.7 ce qui permet la aussi d'introduire les effets de denture.

Il est aussi possible d'obtenir cette expression à partir de la dérivation de II.4. Cette dernière solution ne permet alors pas d'introduire les effets de denture.

La connaissance des forces électromotrices de bobinage permet alors de calculer également le couple électromagnétique qui peut être vu comme la puissance électromagnétique que divise la vitesse de rotation de la machine soit :

$$C_{em}(t) = \frac{1}{\Omega(t)} \sum_{i=1, N} E_i(t) I_i(t) \quad (II.9)$$

$I_i(t)$  est le courant qui circule dans le bobinage  $i$  et  $N$  le nombre de phase.

On voit à partir de cet ensemble d'expressions que le calcul des grandeurs globales peut se faire facilement à partir de la connaissance du potentiel vecteur ou de l'induction au niveau de l'interface de l'entrefer et de la culasse statorique.

## 2.5 Prise en compte des effets locaux de denture.

Le calcul des grandeurs locales et globales caractéristiques des performances d'une structure à aimants permanents repose alors sur la connaissance du champ créé par les différentes sources dans l'entrefer et en particulier au niveau de la culasse statorique.

Si l'on peut calculer l'induction  $B_s(\alpha)$  au niveau de la culasse statorique pour une machine sans encoche, (qui est selon les hypothèses précédentes normale à la surface

statorique) et tenir compte de l'effet global de l'encoche grâce à l'introduction d'un coefficient de Carter, il est également possible de prendre partiellement en compte les effets locaux de la denture. En effet il est alors possible de moduler cette induction par une onde de perméance correctrice qui permet de prendre en compte les effets de denture. Cette méthode est détaillée dans [38, 25, 22]. On va alors supposer que les lignes de champ qui traversent les ouvertures d'encoche vont alors suivre un trajet supplémentaire, en général supposé circulaire, dans l'ouverture d'encoche. On est alors amené à corriger l'induction locale calculée sans encoches en la multipliant par une fonction de perméance  $\lambda(\alpha)$  avec

$$\lambda(\alpha) = \frac{gm}{gm + s(\alpha)} \quad (\text{II.10})$$

où  $gm$  est l'entrefer magnétique (hauteur d'aimant + entrefer mécanique) et  $s(\alpha)$  est le trajet rajouté au niveau des ouvertures d'encoches ( $s(\alpha)$  est nul en dehors des ouvertures d'encoche).

On a alors :

$$B_{sc}(\alpha) = \lambda(\alpha)B_s(\alpha) \quad (\text{II.11})$$

où  $B_{sc}$  est l'induction corrigée au niveau de la surface du stator.

Il est à noter que ce calcul permet de prendre en compte les effets de denture sur les phénomènes globaux (flux, FEM). Il permet également d'évaluer le couple de détente de la machine par calcul de la pression magnétique exercée sur chacun des becs d'encoche [38,39]. Cette méthode est également détaillée dans la thèse de Scuiller [27].

### 3 Résolution au premier ordre du champ dans l'entrefer pour une machine à pôles lisses à aimantation radiale.

#### 3.1 Principes des calculs

Les machines étudiées ici sont du type de celles décrites au paragraphe 1 et ne comportent que des aimants radiaux.

Au tout premier ordre, il est possible de faire l'hypothèse que les lignes de champ sont exclusivement radiales. Ce type de méthode est utilisé pour pré dimensionner une machine dans les premières phases de la conception [40-42].

On peut ainsi exprimer l'induction dans l'entrefer créée par les aimants radiaux et les bobinages en fonction des dimensions en utilisant le théorème d'Ampère. A titre d'exemple l'induction créée par les aimants est alors

$$B_e(r, \alpha) = f_{ar}(\alpha) * (e_a / e_a + g) \quad (\text{II.12})$$

$g$  est l'entrefer mécanique et  $e_a$  l'épaisseur d'aimant.

Cette fonction  $B_e$  prend une valeur constante  $\pm B_{em}$  en face des aimants et est nulle ailleurs. Cette expression peut être éventuellement corrigée par l'introduction du coefficient de Carter. Il est également possible d'obtenir une expression analogue qui prenne en compte la courbure de l'entrefer.

Dans le cas courant d'une machine présentant un bloc d'aimant par pôle de largeur angulaire  $\pi\beta/p$ , l'induction a alors la forme d'un signal 3 niveaux (figure II.5)

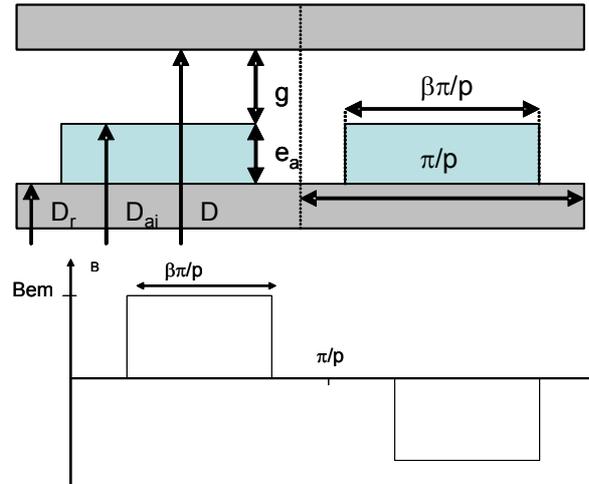


Figure II .5 induction dans l'entrefer

L'induction créée par une phase alimentée dans l'entrefer,  $B_i$ , peut être donnée quand à elle par :

$$B_i(\alpha, t) = \frac{\mu_0}{gm} Ni(\alpha)I_i(t) \quad (\text{II.13})$$

$\mu_0$  est la perméabilité du vide.

Il est alors possible à partir des expressions précédentes d'exprimer les forces électromotrices dans les bobinages et le couple électromagnétique en utilisant (II.8) et (II.9).

A titre d'exemple le couple électromagnétique,  $C_{em}$  moyen d'une machine à pôles lisses alimentée en courant sinusoïdaux est donnée par :

$$C_{em} = k_{bl} \sqrt{2} A_L B_{1e} (\pi D^2 L / 4) \cos \psi \quad (\text{II.14})$$

où  $A_L$  est la densité linéique de courant,  $B_{1e}$  est le 1<sup>er</sup> harmonique de l'induction créée par l'aimant au niveau de la surface du stator.  $K_{bl}$  est alors un coefficient de bobinage au 1<sup>er</sup> harmonique qui illustre à partir des équations II.5 le rapport du flux réel vu par le bobinage et celui vu par un bobinage théorique diamétral dans le cas d'une onde d'induction sinusoïdale de périodicité spatiale de 2 pôles.  $D$  est ici le diamètre statorique et  $\psi$  est le déphasage électrique entre les courants et la FEM. La valeur de  $B_{1e}$  peut alors être déterminée à partir de la forme d'onde de  $B_e$  (équation II.12). Pour un aimant par pôle de largeur relative  $\beta$  (figure II.5) on obtient par exemple

$$B_{1e} = B_{em} (4 / \pi) \sin(\beta\pi / 2) \quad (\text{II.15})$$

Cependant, dans un certain nombre de cas, l'hypothèse d'un trajet radial des lignes de champ est loin d'être vérifiée. C'est par exemple le cas si l'on se trouve en présence d'un grand entrefer, d'un grand diamètre et d'un grand nombre de paires de pôles. Dans ce cas les fuites de flux dans l'entrefer entre les pôles de la machine ne sont plus négligeables. Il est alors possible d'introduire dans l'expression (II.14) une expression directement issue du calcul de champ analytique 2D qui sera décrite au paragraphe suivant [22, 43].

$$B_{Ie} = 2 \frac{\mu_o}{\mu_a} (B_r / \mu_o) k_\beta \frac{p}{p^2 - 1} \left( \frac{R_s}{R_a} \right)^{p-1} \frac{(p-1)R_a^{2p} + 2R_r^{p+1}R_a^{p-1} - (p+1)R_r^{2p}}{\frac{\mu_a + 1}{\mu_a}(R_s^{2p} - R_r^{2p}) - \frac{\mu_a - 1}{\mu_a}(R_a^{2p} - R_s^{2p})(R_r/R_a)^{2p}} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$k_\beta = (4 / \pi) \sin(\beta\pi / 2) \quad (\text{II.17})$$

$R_s$  est le rayon d'alésage du stator ( $D/2$ ),  $R_a=(D/2-g)$  et  $\mu_a$  le rayon et la perméabilité des aimants,  $R_r$ , le rayon rotorique ( $D/2-(g+e_a)$ ) et  $p$  le nombre de paires de pôles. Cette expression peut être simplifiée dans le cas des machines à grand nombre de paires de pôles par l'approximation suivante :

$$B_{Ie} = \frac{2B_r k_\beta}{p} \frac{(p-1+2x-(p+1)x^2)R_{sa}^{p-1}}{(\mu_a+1)(R_{sa}^{2p}-x^2) - (\mu_a-1)(1-x^2)R_{sa}^{2p}} \quad (\text{II.18})$$

Avec  $x = R_{ra}^p$  et  $R_{ra}=R_r/R_a$ ,  $R_{sa}=R_s/R_a$ .

Ce qui conduit à une inversion possible du problème de la détermination de la hauteur d'aimant pour une induction dans l'entrefer donné [43]. Ceci est particulièrement intéressant dans le cas d'un pré dimensionnement direct de ces machines.

L'expression II.13, quand à elle associée à l'expression II.8, conduit à l'expression classique, en fonction des fonctions de bobinages, des inductances d'une machine.

$$L_{i,j} = \frac{\mu_o R_s L}{gm} \int_0^{2\pi} N_i(\alpha) N_j(\alpha) d\alpha \quad (\text{II.19})$$

où  $L_{i,j}$  est l'inductance mutuelle entre les phases  $i$  et  $j$ ,  $N_i$  et  $N_j$  sont les fonctions de bobinage associées aux phases  $i$  et  $j$ .

Cette expression peut s'exprimer simplement dans un certain nombre de cas de bobinage courants et ainsi permettre d'évaluer inductances et mutuelles qui induisent des contraintes de 1<sup>er</sup> ordre sur l'alimentation de la machine et sa commande [40,41].

Il est également possible en exprimant la conservation du flux dans des dents et les culasses d'exprimer en fonction des dimensions, les inductions maximales qui vont traverser les différentes parties du circuit magnétique considéré. Ceci permet par exemple d'évaluer les pertes fers dans ces parties et d'évaluer les risques de désaimantation. Il est alors possible en fonction des contraintes thermiques et des contraintes sur le niveau de saturation des matériaux de déterminer la géométrie d'une machine, pour un cahier des charges donné.

### 3.2 Application à des problèmes de dimensionnement ou d'optimisation multi physiques.

#### 3.2.1 Généralités.

Le modèle du 1<sup>er</sup> ordre défini précédemment a un intérêt direct lorsqu'il est associé à des modèles du même niveau de simplicité dans le cadre d'un pré dimensionnement global du système. Ces modèles associés peuvent par exemple décrire les aspects thermiques ou mécaniques ou concerner la chaîne d'entraînement ou l'alimentation qui est associée à la machine. Ce type d'approche peut être utilisé soit pour dégager des tendances, soit dans le cadre d'un processus d'optimisation non linéaire avec contraintes. L'ensemble des modèles couplés est alors associé à un jeu de contraintes et à une fonction objectif qui conditionne l'algorithme d'optimisation.

### 3.2.2 Exemple d'un dimensionnement optimal d'un ensemble machine hélice de type RIM-Driven pour la propulsion.

A titre d'exemple des travaux ont été menés dans le cadre de la thèse de L. Drouen sur l'optimisation globale d'un ensemble intégré machine hélice pour la propulsion navale de type « Rim-Driven » (ou à entraînement circonférentiel). Dans un tel système, le moteur à aimants permanents est intégré directement au sein de la carène qui entoure l'hélice de propulsion, comme montrée à la figure II.6 [44-49]. Ce type de système est notamment envisagé pour rendre les systèmes de type « pod » (ou propulseurs en nacelle) plus compacts et pour pouvoir ainsi atteindre des puissances supérieures à 20MW [49]

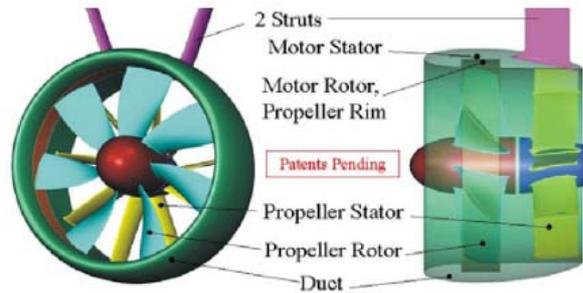


Figure II.6 : exemple de propulseur « pod » à entraînement circonférentiel [49]

Il y a, dans un tel dispositif, un couplage fort entre les dimensions de la machine électrique et les dimensions de l'hélice de propulsion qui ont en commun le diamètre le couple et la vitesse. Il est donc nécessaire, afin de trouver des solutions intéressantes, de coupler les modèles de performances hydrodynamiques de l'hélice à un modèle électromagnétique de la machine selon le schéma de la figure II.7.

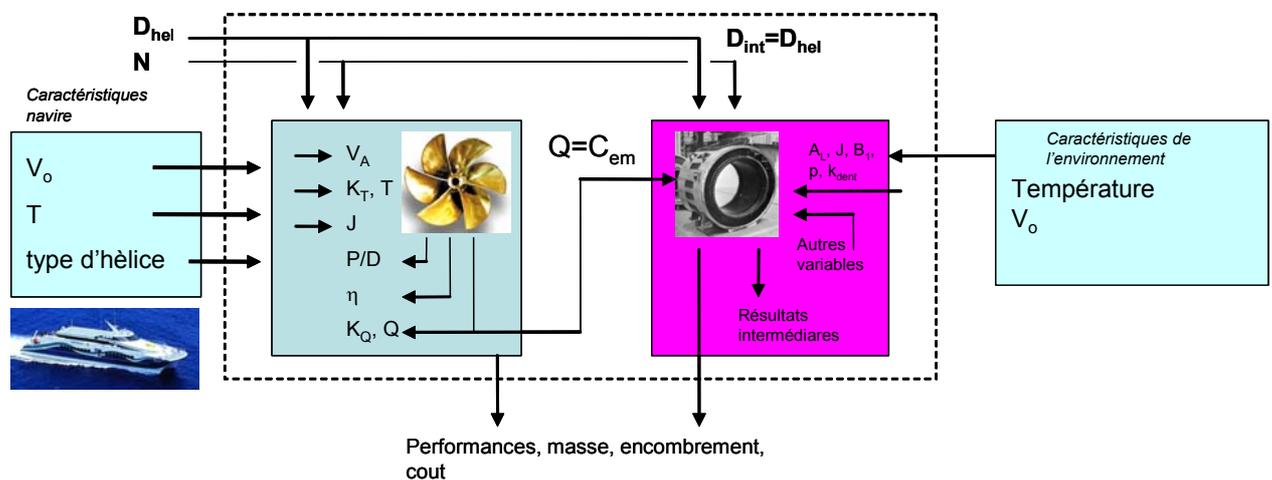


Figure II.7 Synoptique du modèle de dimensionnement (thèse de L. Drouen)

Dans cette procédure de dimensionnement systématique, développée au cours de la thèse de L. Drouen, le modèle électromagnétique utilisé est un modèle de premier ordre dont la rusticité correspond à celle du modèle hydrodynamique du propulseur. Le modèle de l'hélice est en effet basé sur l'interpolation et la mise à l'échelle, par des méthodes de similitude, de séries de résultats d'essais expérimentaux effectués en bassin d'essai de carènes [50]. Il est nécessaire ici que les modèles qui permettent d'estimer les performances hydrodynamiques et électromagnétiques du système soient du même ordre de précision et de complexité calculatoire.

L'utilisation de ce type de couplage de premier ordre permet ici par exemple de dégager de grandes tendances de dimensionnement qui sont à la base de l'acquisition d'une expertise pour le dimensionnement de ces systèmes. L'étude a par exemple montré que si l'on souhaitait avec des performances élevées minimiser la masse du rotor et des aimants, une solution qui s'écarte géométriquement du choix d'une hélice à performance optimale, est souhaitable [51].

### 3.2.3 *Pré dimensionnement multi-physique d'un système de stockage inertiel.*

Ce type d'approche a été également appliquée à une stratégie globale de pré dimensionnement multi physique de systèmes de stockage inertiels au cours du stage de Master Recherche de G. Bonizec que j'ai encadré et au cours d'un contrat de recherche avec la société DCNS. Dans ce type de systèmes, l'énergie est stockée dans un disque de grande inertie tournant à haute vitesse, associé à une machine électrique pilotée par un convertisseur statique qui permet à la fois de stocker (moteur) et de récupérer l'énergie (générateur) [52-56]. Un tel système est représenté à la figure II.8. Il est à noter que ce type de système est pressenti comme un des systèmes de stockage d'énergie les plus intéressants pour les applications navales [57,58]

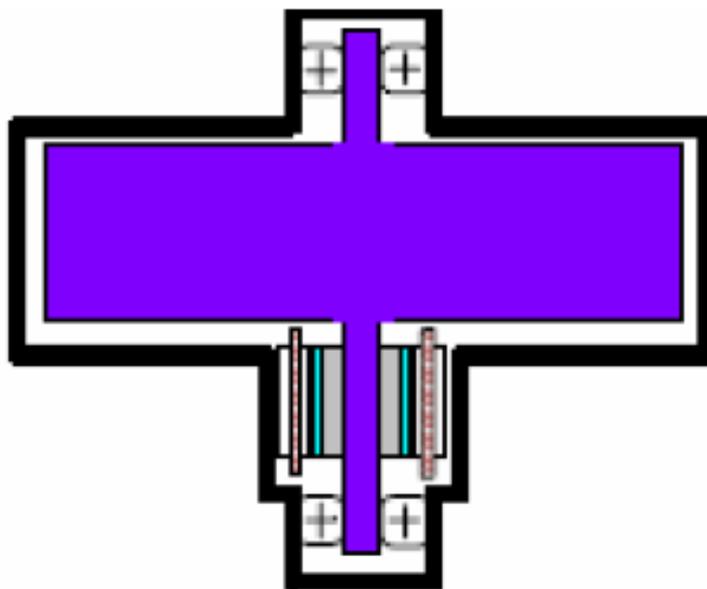
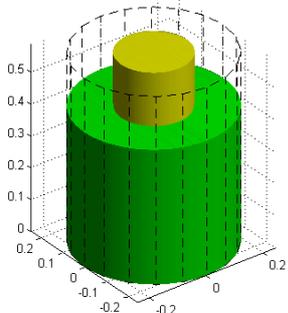
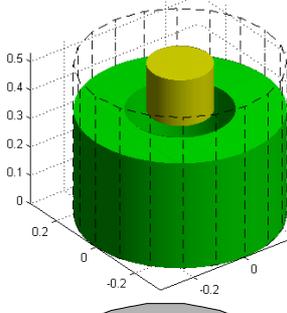


Figure II.8 Schéma de principe d'un système constitué d'un volant d'inertie relié à une machine électrique (figure issue de [52])

Un modèle mécanique, intégrant les contraintes liées à la rupture et à la fatigue des matériaux, ainsi que les contraintes liées à la stabilité mécanique du système est couplé au modèle électromagnétique précédemment décrit de la machine électrique ainsi qu'à un modèle thermique de premier ordre. L'association de ces 3 modèles dans une procédure d'optimisation non linéaire sous contraintes permet d'optimiser le volume global du système pour des cahiers des charges particuliers liés aux applications embarquées [59].

A titre d'exemple la figure II.9 issue du mémoire de master recherche de G. Bonizec [59] présente les résultats obtenus pour des volants composites et en acier pour un volant de 10kW avec un temps de décharge de 30 secondes. Ce cahier des charges correspond au cahier des charges d'alimentation non interruptibles d'équipements sensibles [59].

10kW / 30'							
Volant d'inertie en acier				Volant d'inertie en matériaux composites			
Couple max MSAP (Nm)	12,354	D (m)	0,1411	Couple max MSAP (Nm)	9,487	D (m)	0,1355
Diamètre extérieur MSAP (m)	0,229	la (mm)	8	Diamètre extérieur MSAP (m)	0,211	la (mm)	8
Longueur totale MSAP (m)	0,167	A (A/m)	$1,28 \cdot 10^4$	Longueur totale MSAP (m)	0,161	A (A/m)	$1,11 \cdot 10^4$
Volume total MSAP (m3)	0,007	J (A/m <sup>2</sup> )	$4,35 \cdot 10^6$	Volume total MSAP (m3)	0,006	J (A/m <sup>2</sup> )	$4,5 \cdot 10^6$
Masse MSAP (kg)	14,925	$\lambda=D/L$	2,5	Masse MSAP (kg)	11,986	$\lambda=D/L$	2,5
Diamètre extérieur volant (m)	0,488	p	2	Diamètre extérieur volant (m)	0,665	p	2
Longueur volant (m)	0,422	By (T)	0,95	Longueur volant (m)	0,368	By (T)	0,94
Volume volant (m3)	0,079	Bt (T)	0,97	Volume volant (m3)	0,128	Bt (T)	1,1
Masse volant (kg)	615,789	$\Omega$ (tr/min)	15459	Masse volant (kg)	153,850	$\Omega$ (tr/min)	20131
Diamètre SSI (m)	0,187	kc	1,0088	Diamètre SSI (m)	0,347	kc	1,01
Hauteur SSI (m)	0,590	h (W/m/°C)	100	Hauteur SSI (m)	0,529	h (W/m/°C)	100
Volume SSI (m3)	0,110	ke	0,28	Volume SSI (m3)	0,184	ke	0,36
Masse SSI (kg)	630,714			Masse SSI (kg)	165,836		

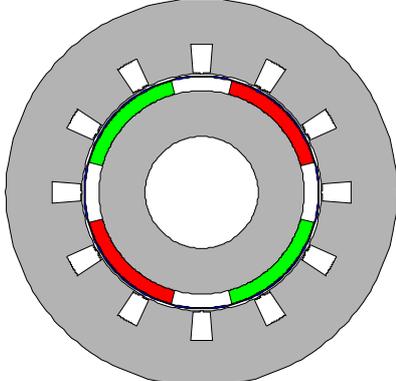
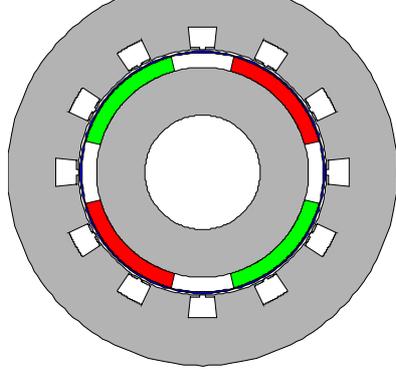



Figure II.9 : Optimisation du volume d'un système de stockage inertiel (figure issue de [59])

## **4 Utilisation de modèles basés sur la résolution analytique par séparation de variables de l'équation de la magnétostatique.**

### **4.1 Présentation du principe de résolution.**

La méthode de calcul analytique que nous présentons ici a été détaillée selon diverses versions dans de nombreuses publications comme [23-25, 27, 30, 60, 61]. Nous nous contenterons ici d'en exposer les grands principes dans le cadre d'une hypothèse magnétostatique. Il est à noter que des calculs magnétodynamiques sont également possibles [62]. Il est également possible de prendre en compte d'autres géométries de machines sous certaines hypothèses simplificatrices comme dans [63] où cette méthodologie est appliquée au cas des machines à entrefer axial. Nous ne présenterons dans ce document que le cas magnétostatique appliqué à des machines tournantes ou linéaires.

La méthode décrite ici repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices. Ces hypothèses simplificatrices font que ce mode de résolution est particulièrement adapté aux machines tournantes ainsi qu'aux machines linéaires de grande longueur à aimants permanents à pôles lisses. Des exemples d'utilisation de cette méthode sur ces deux types de systèmes seront présentés dans la dernière partie de ce paragraphe.

#### **4.1.1 Hypothèses**

Nous allons ici détailler les hypothèses nécessaires à la mise en œuvre de cette méthode.

La première hypothèse est que le système soit invariable par translation selon une longueur suffisamment grande pour qu'il puisse être considéré comme une partie finie d'un système infiniment long. Cette hypothèse dite hypothèse bidimensionnelle ou 2D est classique dans la modélisation des machines électriques conventionnelles ou les effets de bords aux bouts de la machine sont souvent négligés.

Il est ensuite nécessaire que le système étudié puisse être simplifié afin qu'il ne comporte que des zones à géométrie simple de perméabilité homogène.

La perméabilité magnétique du système ne doit dépendre alors que de la dimension normale aux surfaces des culasses de la machine. Cette dimension est le rayon dans le cas d'une machine tournante et la dimension transversale dans le cas d'une machine linéaire.

Ainsi le système peut alors être considéré comme un ensemble de zones de perméabilité constante soit concentriques (dans le cas des machines tournantes), soit parallèles dans le cas des machines linéaires.

Enfin une troisième hypothèse concerne la périodicité spatiale du système. Il est nécessaire que l'on puisse considérer que le système étudié comporte une périodicité spatiale. Pour une machine tournante cette périodicité spatiale est naturelle car la période spatiale d'un tel système est une fraction du tour de la machine. Pour une machine linéaire si le système est suffisamment long par rapport à la période spatiale du bobinage il est alors possible de négliger les effets d'extrémité et de considérer que la machine est une partie finie d'un système périodique.

Dans une machine possédant des encoches sur une ou plusieurs des culasses, il n'est pas possible d'appliquer directement la deuxième hypothèse. C'est pourquoi on est amené à considérer des machines sans encoches équivalentes telles que présentées au paragraphe 2.1 de ce chapitre. Il est alors possible de prendre partiellement en compte les effets d'encoche en utilisant la méthode basée sur la fonction de perméance (paragraphe 2.5).

#### 4.1.2 Expression de l'équation de la magnétostatique

Le champ et l'induction magnétique sous l'hypothèse de la magnétostatique répondent aux équations suivantes.

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A}) \quad (\text{II.20})$$

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{J} \quad (\text{II.21})$$

Avec  $\vec{H}$  le champ magnétique,  $\vec{B}$  l'induction magnétique,  $\vec{J}$  la densité de courant et  $\vec{A}$  le potentiel vecteur magnétique dans le domaine d'étude.

Ce qui conduit à l'équation classique de la magnétostatique qui met en œuvre le potentiel vecteur :

$$\text{rot}\left(\frac{\text{rot}(\vec{A})}{\mu}\right) = \text{rot}\left(\frac{\vec{M}}{\mu}\right) + \vec{J} \quad (\text{II.22})$$

Avec  $\vec{M}$  la magnétisation éventuelle du milieu et  $\mu$  sa perméabilité.

Du fait de l'hypothèse 2D, le potentiel vecteur  $\vec{A}$  est alors orienté selon son unique composante  $A=A_z$  perpendiculaire au plan d'étude. L'équation II.22 devient alors une simple équation scalaire aux dérivées partielles selon les deux dimensions de l'étude. La méthode de calcul analytique consiste alors à exhiber une solution à variables séparées de cette équation scalaire en se basant sur les hypothèses du paragraphe précédent.

### 4.2 Application au calcul du champ dans des structures particulières

#### 4.2.1 Application aux machines tournantes à pôles lisses à aimants permanents déposés en surface.

##### 4.2.1.1 Méthodologie de calcul

Si l'on s'intéresse au cas des machines tournantes à pôles lisses à aimants permanents déposés en surface où les couches de perméabilités homogènes sont constituées de couches cylindriques homogènes, l'équation (II.22) devient alors :

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \theta^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial f_{ar}}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial (r f_{at})}{\partial r} \quad (\text{II.23})$$

Dans le cadre du calcul analytique on est amené à rechercher une solution de l'équation précédente dans les différentes zones cylindriques à perméabilité homogène. Une solution à variable séparée de l'équation II.23 peut alors être exhibée.

Elle est prend les formes suivantes avec  $\alpha$  désignant la position angulaire et  $r$  le rayon :

**-Dans la zone (ou les zones) contenant des aimants :**

$$A_z(r, \alpha) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} (Aa_{n+} r^{|n|} + Aa_{n-} r^{-|n|} + Ba_n(r)) e^{jn\alpha} \quad (\text{II.24})$$

Les termes  $Ba_n(r)$  peuvent être calculés à partir de II.24 et II.23 selon la répartition de l'aimantation dans la zone.

**-Dans chaque zone sans aimants (zone identifiée par l'indice i):**

$$A_z(r, \alpha) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} (A_{i_{n+}} r^{|n|} + A_{i_{n-}} r^{-|n|}) e^{jn\alpha} \quad (\text{II.25})$$

L'écriture des équations de passage entre les différentes zones concentriques considérées et des conditions limites permet l'identification pour chaque harmonique  $n$  des coefficients  $A_{i_{n+}}$ ,  $A_{i_{n-}}$ ,  $A_{a_{n+}}$  et  $A_{a_{n-}}$ .

Par exemple dans le cas particulier où l'on considère que les culasses ont une perméabilité très grande que l'on peut assimiler à l'infini. Le domaine d'étude se limite alors à 2 sous domaines concentriques qui sont l'entrefer et la zone des aimants. La connaissance du champ est alors conditionnée par la détermination des 4 constantes  $A_{i_{n+}}$ ,  $A_{i_{n-}}$ ,  $A_{a_{n+}}$  et  $A_{a_{n-}}$ .

On peut alors exprimer la conservation de la composante tangentielle du champ et de la composante radiale de l'induction sur la frontière commune de la zone d'aimant et de l'entrefer. Il est également possible d'écrire l'annulation de la composante tangentielle du champ à la frontière entre l'entrefer et la culasse statorique ainsi que sur la frontière entre la zone d'aimant et la culasse rotorique. L'écriture de ces conditions permet de mettre en évidence quatre équations mettant en œuvres les inconnues  $A_{i_{n+}}$ ,  $A_{i_{n-}}$ ,  $A_{a_{n+}}$  et  $A_{a_{n-}}$ , ce qui permet leur détermination. Il est alors possible de calculer précisément harmonique d'espace par harmonique d'espace le champ magnétique dans la machine et d'en déduire les grandeurs globales telles que les flux, forces électromotrices et couples électromagnétiques.

#### **4.2.1.2 Application à la conception des machines polyphasées.**

Cette méthode a été mise en œuvre dans le cadre de la thèse de Franck Scuiller qui a été soutenue en décembre 2006 [27]. J'ai co-encadré cette thèse à l'IRENav en collaboration avec des chercheurs du L2EP (E. Semail et S. Clenet). Ce principe de modélisation analytique a été appliqué pour développer des outils de conception permettant un dimensionnement optimal des machines polyphasées. Le travail qui a été mené au cours de cette thèse a permis l'extension du concept de machines fictives dans le domaine de la conception. Elle a permis la mise au point d'outils permettant le dimensionnement d'une machine en fonction de critères liés aux caractéristiques des machines fictives associées à une machine polyphasée.

##### **4.2.1.2.1 Rappels sur la théorie multi machine**

Si l'on considère une machine polyphasée à  $n$  phases régulièrement réparties et équilibrées, il existe a priori un fort couplage entre les différentes phases de la machine. Ainsi le courant dans la phase 1 va intervenir dans l'équation de tension de la phase 2 par le biais des mutuelles inductances entre les phases. L'étude, la conception et la commande d'un tel système est alors un problème complexe. La théorie multi machine est détaillée dans de nombreuses publications dont [64-66]. Elle permet en se plaçant dans une base, où la matrice d'inductance est diagonale de découpler les phénomènes électromagnétiques. Ainsi en considérant cette nouvelle base une machine polyphasée à pôles lisses à aimants permanents déposés en surface peut se ramener à un jeu de machines « fictives » monophasées ou diphasées découplées magnétiquement qui correspondent à la projection des grandeurs électriques (et éventuellement magnétiques) dans les sous espaces propres. Chacun de ces sous espaces propres est alors associé à une inductance « cyclique » fictive qui est une des valeurs propre de la matrice d'inductance (valeur propre double pour les machines diphasées, valeur propre simple pour les

machines monophasées). Les grandeurs sont alors projetées dans les différents sous espaces selon une répartition harmonique caractéristique [66-68].

A titre d'exemple, si l'on considère une machine synchrone pentaphasée, les équations qui lient les tensions  $v_k$ , les courants  $i_k$  et les flux dans la base naturelle (base associées aux 5 phases notée  $B_n$ ), sont données pour chaque phase (indice k) par l'expression suivante :

$$\vec{v}_k = R_s \vec{i}_k + \left[ \frac{d\phi_{sk}}{dt} \right]_{/B_n} + \vec{E}_k \quad (\text{II.26})$$

Où  $\phi_{sk}$  est Le flux dans la phase k du stator créé par les courants statoriques.  $E_k$  est la Fem induite dans la phase k par le rotor.

On suppose que les flux au stator créés par les courants des bobinages statoriques sont une fonction linéaire de ces courants (hypothèse de linéarité des matériaux) :

$$\vec{\phi}_s = \lambda(\vec{i})$$

Ces flux sont alors liés aux courants de phases par l'application linéaire suivante mettant en œuvre les inductances propres et mutuelles des phases ( $L, M_1, M_2$ ).

$$[L_s^n] = \text{mat}(\lambda, B^n) = \begin{bmatrix} L & M_1 & M_2 & M_2 & M_1 \\ M_1 & L & M_1 & M_2 & M_2 \\ M_2 & M_1 & L & M_1 & M_2 \\ M_2 & M_2 & M_1 & L & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_2 & M_1 & L \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

La diagonalisation de cette matrice d'inductance qui est naturellement symétrique et circulante conduit à la mise en évidence de 2 sous espaces de dimension 2 et d'un espace de dimension 1 dans lesquels les équations (II.26) deviennent :

$$\begin{aligned} v_z &= R_s i_z + \Lambda_z \frac{di_z}{dt} + e_z \\ \vec{v}_{\alpha\beta-p} &= R_s \vec{i}_{\alpha\beta-p} + \Lambda_p \frac{d\vec{i}_{\alpha\beta-p}}{dt} + \vec{e}_{\alpha\beta-p} \\ \vec{v}_{\alpha\beta} &= R_s \vec{i}_{\alpha\beta-s} + \Lambda_s \frac{d\vec{i}_{\alpha\beta-s}}{dt} + \vec{e}_{\alpha\beta-s} \end{aligned} \quad (\text{II.28})$$

Tous les sous espaces (Les 2 plans dits principal et secondaire sont notés  $p$  et  $s$  et l'axe homopolaire est noté  $h$ ) sont alors découplés magnétiquement et on peut définir pour chacun un schéma électrique équivalent séparé. Chacun de ces systèmes est alimenté par source de tension ( $v_x$ ) dite soit principale ( $v_p$ ) ou secondaire ( $v_s$ ) ou homopolaire ( $v_h$ ), d'une résistance ( $R$ ), d'une inductance cyclique ( $\Lambda_x$ ) et d'une FEM ( $e_x$ ) (principale, secondaire, homopolaire). Le schéma électrique équivalent à chacun de ces systèmes que l'on nomme « machines fictives » est donné par la figure ci-dessous, avec  $x$  pouvant représenter la machine principale, secondaire ou homopolaire ( $x=p,s,h$ ). Il est à noter qu'à cette décomposition en sous espaces liés aux machines fictives correspond également une décomposition harmonique des signaux. En effet les signaux (forces électromotrices, tension, courants) se projettent par familles d'harmoniques dans ces sous espaces. Les harmoniques 1,9 et 11 se projettent dans le plan principal, les harmoniques 3, 7 et 13 dans le plan secondaire et les harmoniques multiples de 5 sur la droite homopolaire. Cela signifie que si la machine réelle a  $p$  paires de pôles, la machine

principale a elle aussi  $p$  paires de pôles tandis que la machine secondaire a  $3.p$  paires de pôles.

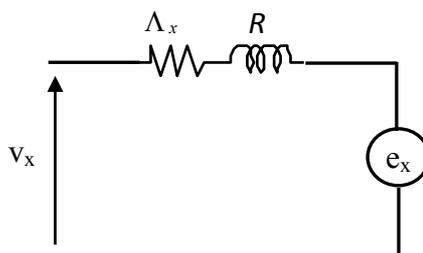


Figure II.10. Schéma électrique équivalent à une phase d'une machine fictive

Le couple électromagnétique est alors la somme des couples des machines principale, secondaire et homopolaire. Dans le cas d'un couplage étoile la machine homopolaire n'est alors pas alimentée et le couple peut être vue comme la somme de la contribution des couples des machines principales et secondaire.

$$C_{em} = \frac{\vec{e} \cdot \vec{i}}{\Omega} = \frac{\vec{e}_z \cdot \vec{i}_z + \vec{e}_p \cdot \vec{i}_p + \vec{e}_s \cdot \vec{i}_s}{\Omega} = \frac{\vec{e}_p \cdot \vec{i}_p + \vec{e}_s \cdot \vec{i}_s}{\Omega} \quad (II.29)$$

où les vecteurs  $\vec{e}_x$  et  $\vec{i}_x$  avec  $(x=p,s,h)$  représentent les vecteurs projetés dans les plans principal secondaire et homopolaire des courants et des FEM.

Cela signifie qu'il est alors possible que ces deux « machines fictives » fournissent chacune un couple significatif. C'est le cas par exemple dans le cas où la machine est alimentée par des courants comprenant en plus du fondamental un harmonique 3 (qui est l'harmonique principal de la machine secondaire) et si le spectre de la force électromotrice de la machine contient un harmonique 3 important.

#### 4.2.1.2.2 Définition d'objectifs de dimensionnements à partir de la théorie multimachine.

La théorie multi machine apparaît alors comme un outil très intéressant pour la définition d'objectifs et de contraintes de dimensionnement d'une machine synchrone polyphasée à pôles lisses [27,70-73]. Cet outil a été utilisé dans ce contexte au cours de la thèse de F. Scuiller [27]. En effet les forces électromotrices à 1 rad/s (que l'on appelle forces électromotrices élémentaires) des machines fictives définissent la capacité de la machine polyphasée à produire un couple utile pour des courants statoriques donnés. Les inductances cycliques principales et secondaires sont liées aux constantes de temps électriques de la machine qui conditionnent les contraintes sur l'électronique de puissance (fréquence de découpage) et la commande.

Pour un entrefer magnétique donné (hauteur d'aimant+entrefer magnétique), les caractéristiques du bobinage vont directement conditionner la valeur de ces inductances et donc les contraintes qu'elles imposent à l'alimentation électronique (en général un onduleur de tension) qui l'alimente.

La topologie l'orientation et la nature des aimants déposés à la surface du rotor vont, eux, conditionner le champ vu au niveau du stator crée par le rotor. Le bobinage va alors agir comme un filtre spatial qui va conditionner la forme d'onde de la force électromotrice à 1 rad/s dans la base naturelle et dans la base des machines fictives.

Le contenu harmonique des forces électromotrices à 1rad/s de chacune des machines fictives conditionne alors leur capacité à produire un couple significatif. La qualité du couple est elle aussi liée aux formes d'ondes de ces forces électromotrices à 1rad/s car

l'interaction des courants avec ces forces électromotrices peut conduire à des ondulations de couples électromagnétiques.

Le couple de détente est lui lié à la forme d'onde de l'induction au niveau du stator et à l'encochage.

Le cahier des charges d'une machine polyphasé se traduit, par exemple, par des objectifs sur le couple et les pertes de la machine et des contraintes sur ses constantes de temps électriques. Il est alors possible de transposer ce cahier des charges en des contraintes et objectifs sur les caractéristiques des machines fictives (inductances et forces électromotrices).

Ces paramètres peuvent alors être calculés à partir de l'évaluation des champs créés par les aimants et par les bobinages

La mise en œuvre d'une méthode analytique de calcul de champ permet alors d'effectuer une investigation systématique et souple des topologies de bobinages et des paramètres de la couche d'aimant en fonction d'objectifs directement liés aux paramètres des machines fictives. Ce type de procédure est illustré à la figure II.11. Cette méthodologie permet alors d'effectuer une sélection de bobinages et de topologies d'aimantation performantes.

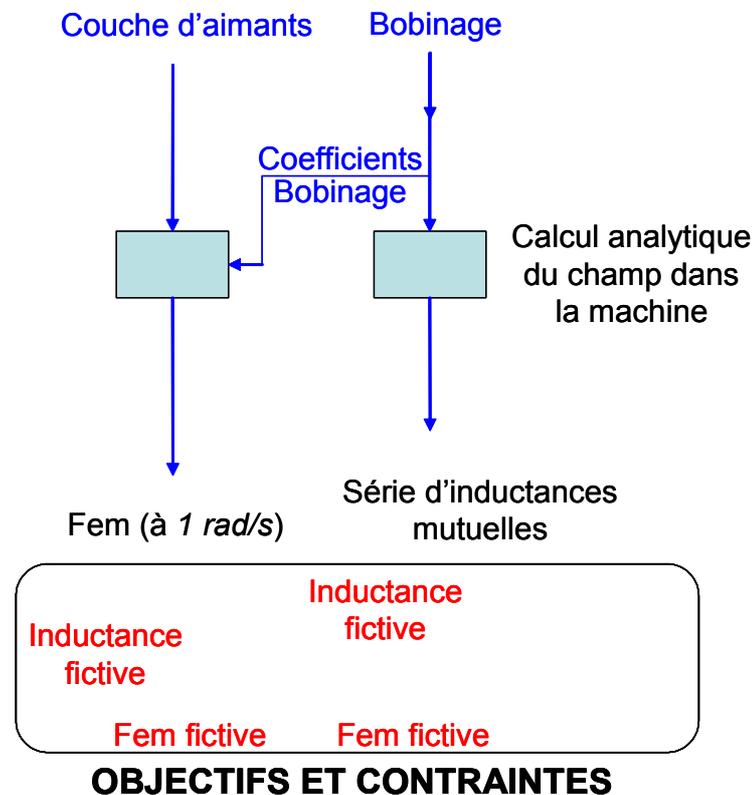


Figure II.11 Procédure d'analyse systématique d'une machine polyphasée issue des travaux menés avec F. Scuiller [27].

#### 4.2.1.2.3 Exemple de dimensionnement d'une machine polyphasée pour la propulsion navale.

La méthode décrite au paragraphe précédent a été appliquée au dimensionnement d'une machine de propulsion à 5 phases correspondant à une propulsion puissante au cours des travaux menés dans le cadre de la thèse de Scuiller [73].

#### 4.2.1.2.3.1 Cahier des charges et objectifs de dimensionnement

Le cahier des charges de cette machine correspond à un besoin proche de celui d'un moteur de propulsion à entraînement direct permettant la propulsion à basse vitesse d'une frégate à propulsion hybride de 6000 tonnes (utilisation d'une turbine à gaz pour les grandes vitesses, propulsion diesel-électrique pour les basses vitesses). Le point nominal de cette machine correspond alors à une puissance de 2,1MW pour 105 tours/min. Nous avons alors travaillé sur ce cahier des charges avec un industriel (Jeumont-Electric) qui nous a fourni les caractéristiques d'une machine triphasée de référence dimensionnée par ses soins pour ce cahier des charges particulier. Nous avons travaillé sur ce cahier des charges en nous fixant pour contraintes de maintenir constantes, les grandeurs de la table II.1, qui correspondent à la machine de référence. Nous avons également choisi de conserver un nombre de paires de pôles très proche du dimensionnement initial. Cela signifie que les pertes dans le cuivre (qui sont a priori les pertes majoritaires dans ce type de machine) et les pertes dans le fer des machines étudiées sont identiques pour le point nominal et donc que le comportement thermique est également conservé.

La machine de référence est couplée en étoile et possède 216 encoches pour 60 pôles. Son facteur de bobinage au niveau du fondamental est de 0,927. Sa constante de temps électrique (constante de temps de la machine diphasée issue de la transformation de Concordia) est de 0,112s ce qui conduit à choisir pour cette machine une fréquence de MLI pour l'onduleur de référence de 1kHz afin d'assurer un bon suivi des courants de références. L'arc polaire des aimants est égal au pas polaire.

Longueur axiale du paquet de toles	1125 mm
Diamètre alésage	1600 mm
<b>Epaisseur de la culasse statorique</b>	5 cm
<b>Entrefer mécanique</b>	5 mm
<b>Epaisseur de la culasse statorique</b>	3 cm
<b>Hauteur des aimants</b>	15mm
<b>Induction Rémanente des aimants</b>	1,17T
<b>Volume d'aimant</b>	$83,5 \times 10^{-3} m^3$
<b>Largeur d'encoche</b>	0,5 pas d'encoche
<b>Ouverture d'encoche</b>	0,25 pas d'encoche
<b>Epaisseur des becs</b>	5 mm
<b>Profondeur d'encoche</b>	6,5 cm
<b>Volume de cuivre actif</b>	$95,6 \times 10^{-3} m^3$
<b>Charge linéique</b>	61,7 kA/m
<b>Densité de courant</b>	3,65 A/mm <sup>2</sup>

Table II.1 : caractéristiques communes de dimensionnement

A partir de ce cahier des charges nous souhaitons en termes d'objectifs de dimensionnement multi machine atteindre les cinq conditions suivantes ( $C_1$  à  $C_5$ ).

( $C_1$ ) : Le couple nominal correspondant à une alimentation en régime permanent en courants sinusoïdaux (correspondant au cas où seule la machine principale est alimenté) doit être supérieur au couple de référence. Cela signifie que le facteur de bobinage du fondamental de la machine pentaphasée doit être supérieur à celui de la machine triphasée de référence. Dans ce cas la machine pentaphasée avec une

alimentation permettant d'alimenter les phases de la machine par des courants sinusoïdaux produira un couple plus élevé que la machine de référence pour la même valeur de pertes joules.

(C<sub>2</sub>) Les 2 inductances cycliques (et donc les 2 constantes de temps) des machines principales et secondaires doivent être de valeurs proches. Les constantes de temps doivent être compatibles avec une fréquence de MLI de 1kHz.

(C<sub>3</sub>) Nous souhaitons que le spectre la force électromotrice de la machine pentaphasée contiennent, en plus de son fondamental, un harmonique 3 important. Ceci permettra de fournir du couple grâce à la machine secondaire par injection d'harmonique 3 dans les courants de références. Ceci correspond au cas où les deux machines fictives sont alimentées en sinusoïdal (1<sup>er</sup> harmonique de chaque machine fictive) ce qui permet un contrôle simple et indépendant de chacune des deux machines fictives. Afin de pouvoir exploiter ainsi la machine principale et secondaire en commande multi-machine il est alors nécessaire de choisir un bobinage avec une valeur de coefficient de bobinage élevé sur l'harmonique 3 et une force magnétomotrice d'aimantation contenant un harmonique 3 significatif.

(C<sub>4</sub>) Nous souhaitons que les autres harmoniques de la FEM soient minimisés et en particulier les harmoniques 7, 9, 11 et 13 qui sont susceptibles de produire des couples pulsatoires en interagissant avec les harmoniques 1 et 3 des courants d'alimentation.

(C<sub>5</sub>) Le couple de détente doit être très faible.

Pour atteindre ces conditions nous avons agi sur 2 paramètres principaux : la topologie du bobinage et la topologie de la couche d'aimant.

#### 4.2.1.2.3.2 Choix du bobinage

Le bobinage est choisi par une procédure d'analyse et de choix systématique d'un bobinage équilibré à partir des combinaisons de bobinages possibles pour un nombre d'encoche de phases et de pôles donné. Il est à noter que l'augmentation du nombre de phases conjuguée à un nombre de phases élevé conduit à une augmentation du nombre de possibilités pour construire un bobinage équilibré. Ce nombre élevé de possibilités et l'utilisation d'un calcul analytique au premier ordre puis avec des hypothèses 2D permet alors de sélectionner des bobinages particulièrement performants. Cette approche nous a conduit à privilégier un bobinage fractionnaire dont le pas est proche d'un pas diamétral. Ce bobinage est représenté à la figure II.12 et est supporté par une machine à 58 pôles et 180 encoches. Le décalage entre 2 bobinages de phases adjacentes est de 36 encoches. Le nouveau bobinage a alors les propriétés suivantes :

-Le rapport entre les coefficients de bobinage du fondamental (rapport sur les FEM par conducteur) entre la nouvelle et l'ancienne machine est de 1,05 ce qui permet d'obtenir 5% de couple supplémentaire pour une alimentation en courants sinusoïdaux avec la même topologie d'aimants et les mêmes pertes. Cette propriété permet de satisfaire la condition (C<sub>1</sub>).

-Les constantes de temps de la machine principale et secondaire sont respectivement de 0,152s et 0,106s ce qui permet de satisfaire la condition (C<sub>2</sub>). Il est à noter que ces constantes de temps sont indépendantes du nombre de spires par encoche de la machine pour un coefficient de remplissage donné.

-Le nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase de 18/29, conduit à un couple de détente très faible (condition C<sub>5</sub>).

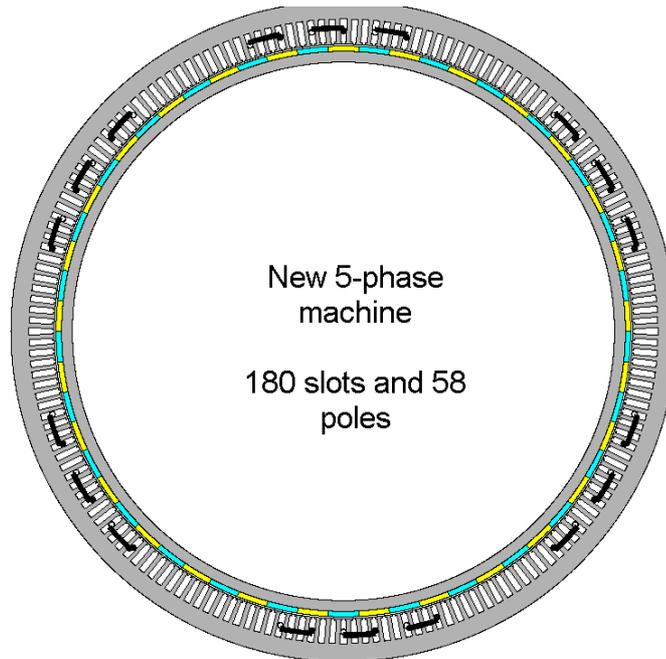


Figure II.12 : Vue du bobinage d'une phase de la machine pentaphasée obtenue (180 encoches, 58 pôles) issu de [73] (Travaux menés avec F. sculler)

-Le coefficient de bobinage sur l'harmonique 3 est de l'ordre de 0,86, ce qui laisse la possibilité, si la force magnétomotrice du rotor (aimants) le permet, de fournir un couple significatif par injection d'harmonique 3 dans les courants (condition (C<sub>3</sub>)).

-Les facteurs de bobinages concernant les harmoniques 7, 9, 11 et 13 sont faibles ce qui conduit à satisfaire naturellement la condition (C<sub>4</sub>).

#### 4.2.1.2.3.3 Optimisation de la couche d'aimant

Afin d'accroître les performances de la machine en terme de fonctionnement avec une alimentation en courants sinusoïdaux ainsi qu'en fonctionnement multi machine (alimentation en courants contenant en plus du fondamental, un harmonique 3), nous avons utilisé une approche permettant d'optimiser la géométrie d'aimantation de la couche d'aimants. La aussi, l'utilisation de l'approche analytique permet un balayage systématique des configurations et la détermination d'une géométrie performante.

Nous avons choisi d'optimiser une structure comprenant 3 blocs aimantés par pôles : un aimant central magnétisé radialement et deux aimants latéraux dont la magnétisation est inclinée (figure II.13). Cette structure d'aimantation est inspirée des machines utilisant des anneaux de Halbach [35-37] et peut être caractérisée par deux grandeurs :  $L$ , la largeur angulaire (en angle électrique) d'un aimant latéral et  $\gamma$ , l'inclinaison de l'aimantation d'un aimant latéral par rapport à la direction radiale. L'objectif dans notre cas n'est pas d'obtenir un champ magnétique purement sinusoïdal comme pour un anneau de Halbach, mais plutôt ici optimiser le contenu harmonique de la force magnétomotrice afin de pouvoir mettre en œuvre une alimentation multi machine.

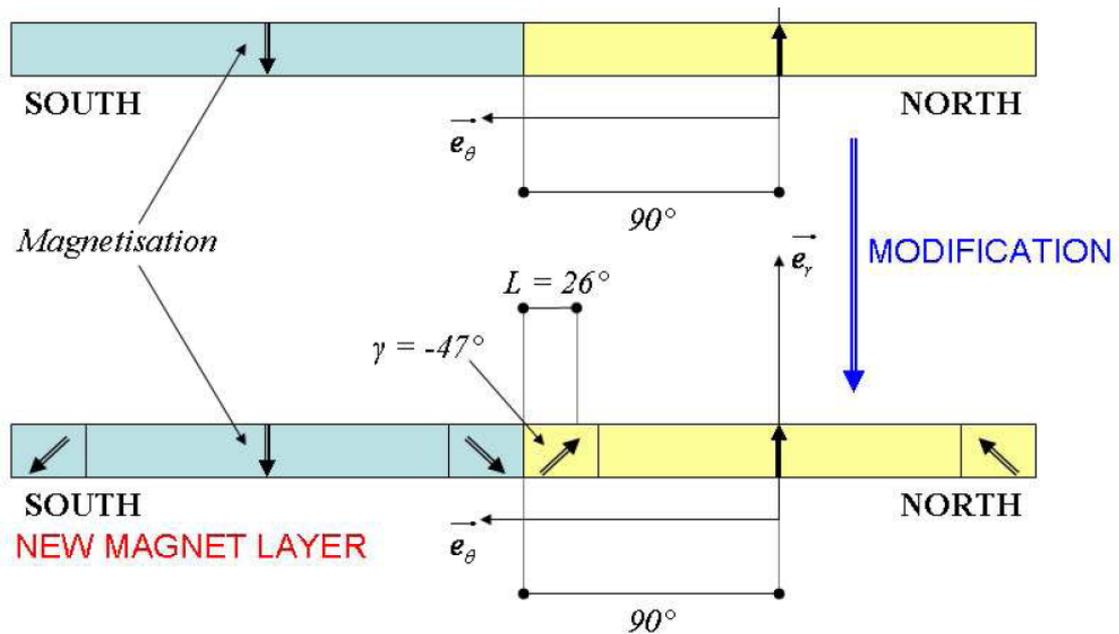


Figure II.13 : Définition de la couche d'aimant initiale et optimisée (issue de [73])

On souhaite ainsi maximiser l'harmonique 1 et l'harmonique 3 de l'induction créée par les aimants au niveau de la culasse statorique afin que les machines principales et secondaires puissent fournir un couple significatif. L'approche analytique permet de balayer rapidement un très grand ensemble de couple de valeurs  $(L, \gamma)$  et de choisir un jeu de valeur permettant d'obtenir un compromis intéressant. La figure II.14 présente en fonction de ces 2 paramètres l'évolution du fondamental et du 3<sup>ème</sup> harmonique de l'induction ramenées aux valeurs obtenues avec la machine de référence à aimantation radiale. Le couple de valeurs choisies  $(L=26^\circ, \gamma=-47^\circ)$  permet d'améliorer sensiblement les valeurs à la fois du fondamental (1,06 fois) et du troisième harmonique de l'induction (1,24 fois).

L'association de ce nouveau bobinage et de la couche d'aimant optimisée conduit à une machine dont les performances sont particulièrement intéressantes en terme de compacité et en terme de qualité de couple. La figure II.15 présente les couples électromagnétiques en régimes permanents avec une stratégie de commande à pertes joules minimales obtenues en alimentation avec des courants sinusoïdaux pour la machine de référence et en alimentation multi machine pour le même niveau de pertes joules (Point nominal de la machine de référence). On peut alors constater que les modifications proposées conduisent à une amélioration significative des performances de la machine en termes de compacité (valeur du couple moyen), mais aussi en qualité de couple (ondulation).

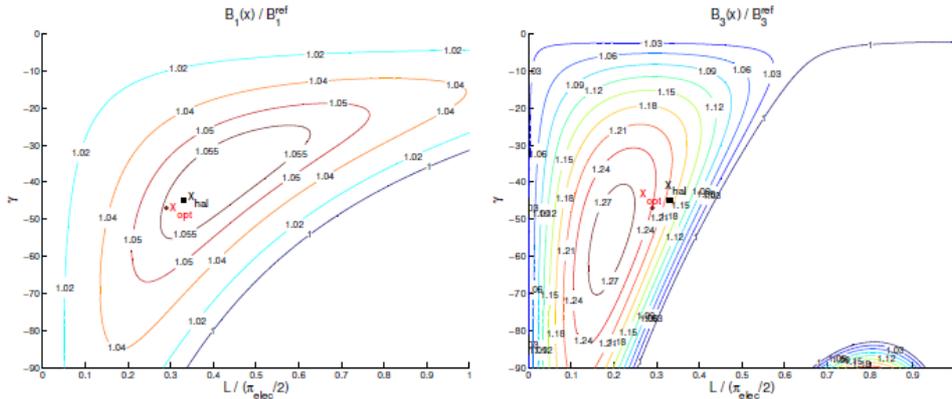


Figure II.14 : Evaluation analytique du premier harmonique et du 3<sup>ème</sup> harmonique de l'induction créée par le rotor en fonctions des paramètres définissant la couche d'aimant [73].

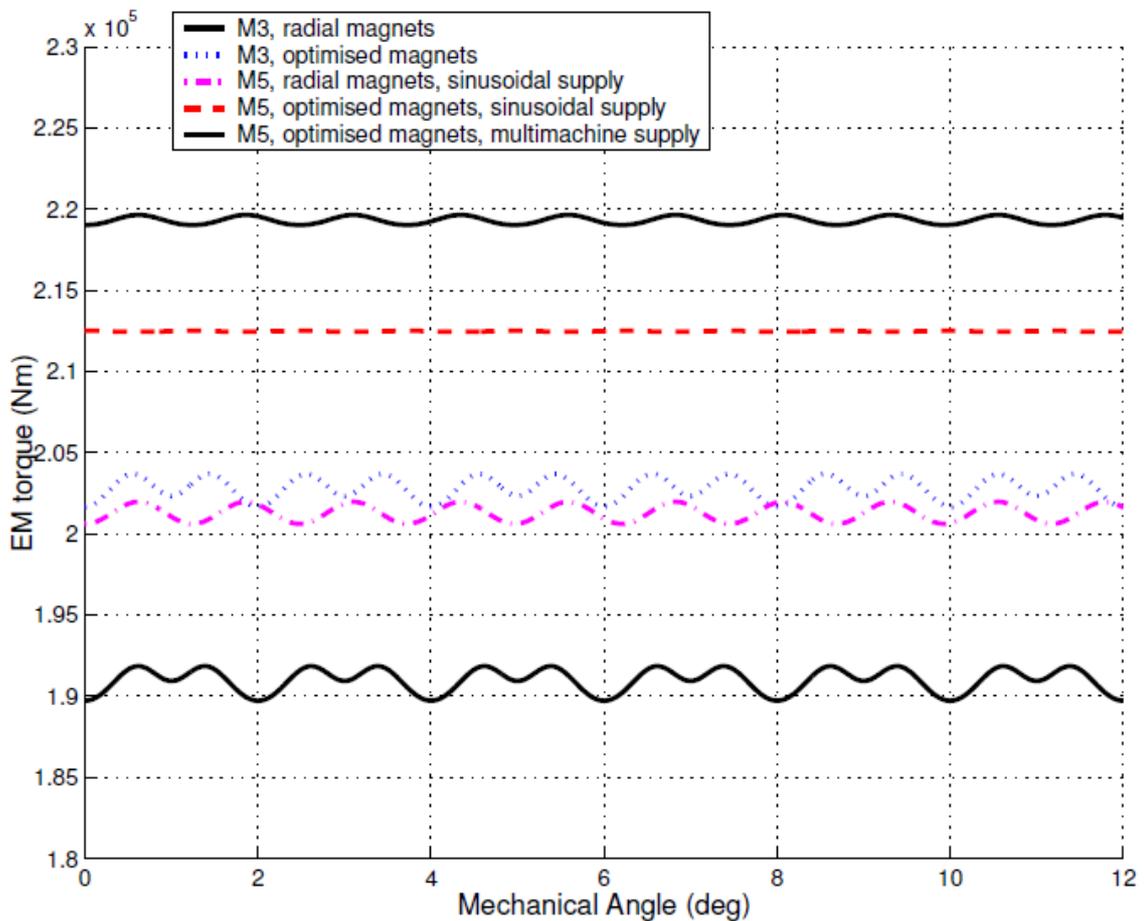


Figure II.15 : Couple Électromagnétique à pertes joules fixée en régime permanent de la machine de référence (M3) et des machines modifiées (M5) [73].

#### 4.2.2 Application au calcul du champ d'induit d'une machine linéaire à stator long.

Nous nous sommes intéressés ici au cas des systèmes en cours de développement de systèmes de catapultage électromagnétique d'aéronefs sur porte avions [74-79,82]. A ces travaux ont participé M. Javier Rios-Quesada au cours de son post-doctorat, et F. El

Hadad, un élève de l'école polytechnique que j'ai supervisé au cours de son stage de fin d'étude.

Avec l'avènement de navires tout électrique des nouveaux systèmes de catapultage sont envisagés afin de remplacer les catapultes à vapeur. Le principe de ces catapultes électromagnétiques peut reposer sur l'utilisation d'une machine linéaire synchrone à aimants permanents pilotée par un onduleur de tension MLI [76]. Cette machine linéaire comprend une navette relativement courte, comprenant des aimants permanents, sur laquelle est relié, par une élingue, l'avion à lancer. Le stator quand à lui a la longueur de la piste de lancement (environ 100m) et est alimenté par secteurs successifs. 2 structures basiques peuvent être proposées : une structure de type lame où la navette est comprise entre 2 stators parallèles (figure II-16-a) et une structure de type U inversé (figure II-16-b) où la navette chevauche un stator. Ces 2 structures sont présentées à la figure II.16.

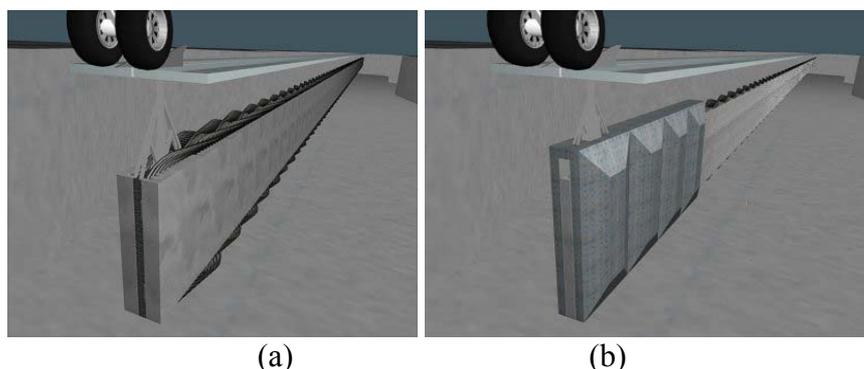


Figure II.16 Principe d'une catapulte électromagnétique d'après [76]

L'étude menée s'appuie sur des données de références issues d'un projet de catapulte électromagnétique américain [76] et sur des premiers travaux de notre part [77]. Les éléments principaux du cahier des charges du système sont donnés à la table II.2.

Masse lancée	25000	kg
Vitesse finale	100	m/s
Longueur du stator	100	m
Largeur maximale	1,06	m
Profondeur maximale	1,42	m
Distance de freinage (navette seule)	10	m
Poussée maximale	1,25	MN
Masse de la navette	2500	kg

Table II.2 Cahier des charges de la catapulte d'après [76] et [77]

La solution retenue par l'étude américaine [76] comprend une alimentation de la piste statorique par secteur, par des onduleurs MLI à IGCT qui permettent d'alimenter le bobinage triphasé de la structure par des courants rectangulaires de 18kA par encoche selon la stratégie décrite à la figure II.17. Les principales caractéristiques de cette machine de référence sont données à la table II.3.

Nombre de paires de pôles	10	
Phases	3	
Entrefer	2 x 0,005	m
Épaisseur d'aimant	0,010	m
Largeur de pole	0,150	m
Profondeur d'encoche	0,050	m
Largeur d'encoche	0,025	m
Aimantation rémanente	1.15	T
Nombre d'encoches par pole et demi stator	3	
Courant dans une encoche	18000	A
Type de système	<i>lame</i>	

Tableau II.3 données de la machine de référence [76]

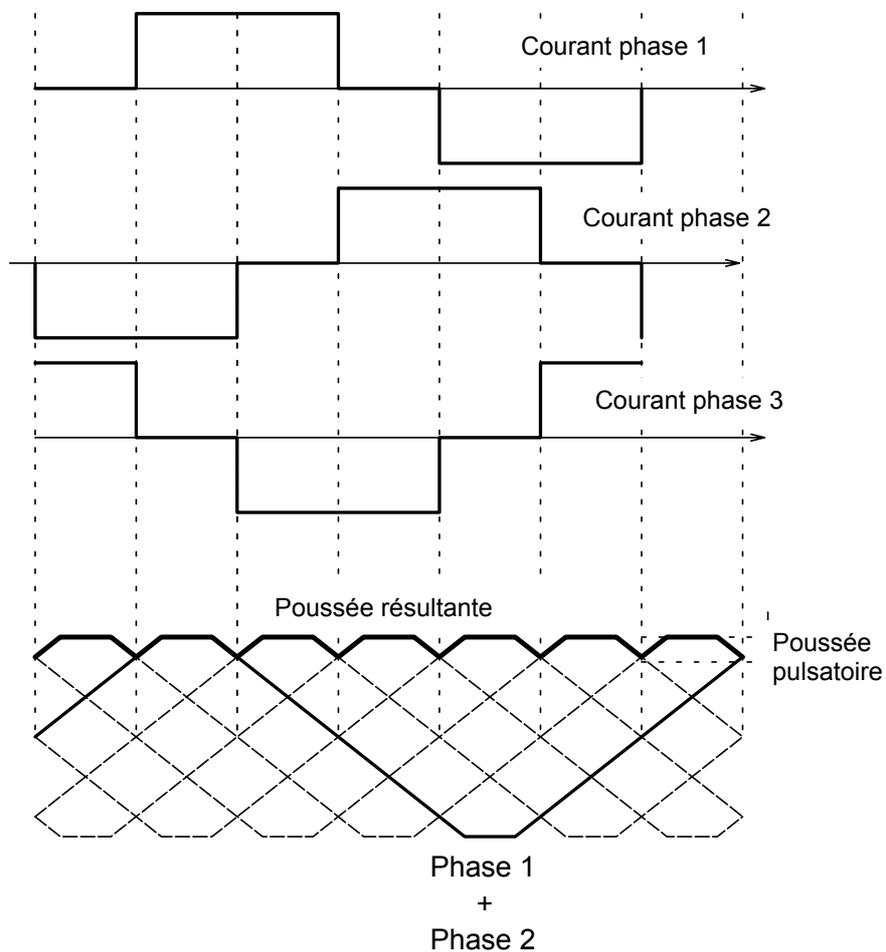


Figure II.17 : stratégie d'alimentation de la catapulte d'après [76]

Une des contraintes de ce type de système est que l'inductance par phase de la machine possède une valeur compatible avec les systèmes d'électronique de puissance qui alimentent le système. Cette valeur conditionne par exemple la taille limite des secteurs de piste pouvant être alimentés [76].

Si la navette aimantée de la machine à un nombre de pôles limité, l'armature du système contient elle un nombre de pôles suffisant pour que les effets de bords à chaque extrémité du système soient négligés. Un secteur selon la longueur de la machine peut alors être vu comme une partie d'un système périodique. Il est alors possible, afin de calculer analytiquement le champ créé par l'armature et donc les inductances de la machine, de se ramener à une paire de pôles.

Afin de pouvoir appliquer les hypothèses du calcul analytique il est nécessaire de ramener la machine à une machine sans encoche. La méthode utilisée pour identifier une machine équivalente sans encoches est similaire à celle utilisée pour les machines tournantes. Les figures II.18 et II.19 présentent le bobinage des stators de la machine et leur équivalent lisse.

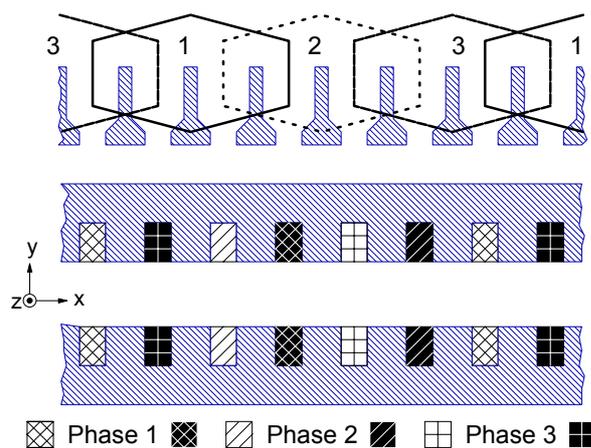


Figure II.17 : Bobinage des stators de la machine linéaire

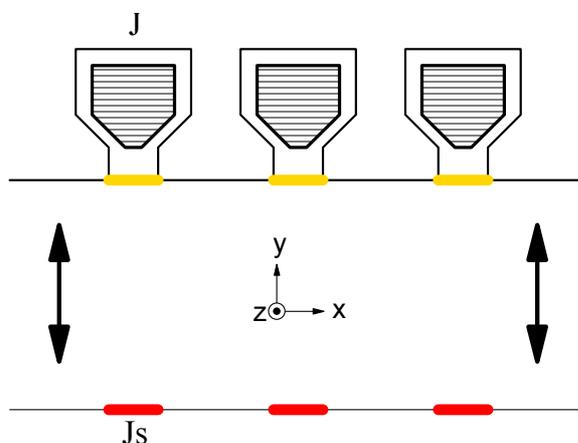


Figure II.18 : stator linéaire sans encoche équivalent à un stator encoché

Ces hypothèses permettent alors par un procédé similaire à celui utilisé pour les machines cylindriques et proche de celui présenté en [80] de calculer analytiquement le champ créé par les bobinages dans l'entrefer et dans les deux culasses statoriques. La densité de courant sur les surfaces statoriques peut en effet être vue comme une série de Fourier.

$$J_z = \sum_{n=1}^{+\infty} \left[ j_{an} \cos\left(\frac{n \pi x}{L_p}\right) + j_{bn} \sin\left(\frac{n \pi x}{L_p}\right) \right] \quad (\text{II.30})$$

Les bobinages étudiés ici sont des bobinages classiques ont un nombre d'encoches par pôles et par phase entier et ont un pas diamétral. La périodicité de la structure est de 2 largeurs de pôles ( $2 L_p$ ). Le potentiel vecteur est donc lui aussi périodique de même

période. Comme dans le cas précédent le potentiel vecteur qui est la solution d'une équation de Laplace peut alors être calculé en appliquant les conditions de passages et les conditions aux limites suivantes.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial A_{zf^-}}{\partial x}(x, -h) &= \frac{\partial A_{ze}}{\partial x}(x, -h) \\
 \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_{ze}}{\partial y}(x, -h) &= \frac{1}{\mu_0 \mu_f} \frac{\partial A_{zf^-}}{\partial y}(x, -h) - J_z \\
 \lim_{y \rightarrow +\infty} A_{zf^+} &= 0 \\
 \frac{\partial A_{zf^+}}{\partial x}(x, h) &= \frac{\partial A_{ze}}{\partial x}(x, h) \\
 \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_{ze}}{\partial y}(x, h) &= \frac{1}{\mu_0 \mu_f} \frac{\partial A_{zf^+}}{\partial y}(x, h) + J_z \\
 \lim_{y \rightarrow -\infty} A_{zf^-} &= 0
 \end{aligned} \tag{II.31}$$

Où  $h$  est la valeur du demi entrefer magnétique, l'indice "e" concerne l'entrefer et les indices 'f+' et 'f-' les culasses magnétiques 'supérieures' et 'inférieures'.

Il est alors possible de calculer le potentiel vecteur comme une solution à variable séparée de l'équation de Laplace dans l'entrefer et les culasses. Elle prend alors la forme suivante.

$$\begin{aligned}
 A_{zf^-}(x, y) &= \sum_{n=1}^{\infty} A_{nf} \exp\left(\frac{n\pi}{L_p} y\right) \cos\left(\frac{n\pi}{L_p} x + \theta_n\right) \\
 A_{ze}(x, y) &= \sum_{n=1}^{\infty} A_{ne} \cosh\left(\frac{n\pi}{L_p} y\right) \cos\left(\frac{n\pi}{L_p} x + \theta_n\right) \\
 A_{zf^+}(x, y) &= \sum_{n=1}^{\infty} A_{nf} \exp\left(-\frac{n\pi}{L_p} y\right) \cos\left(\frac{n\pi}{L_p} x + \theta_n\right)
 \end{aligned} \tag{II.32}$$

Les expressions des termes  $A_n$  et  $\theta_n$  sont données en annexe 1 :

La figure II.19 présente les équi-flux ainsi calculés pour la structure de référence.

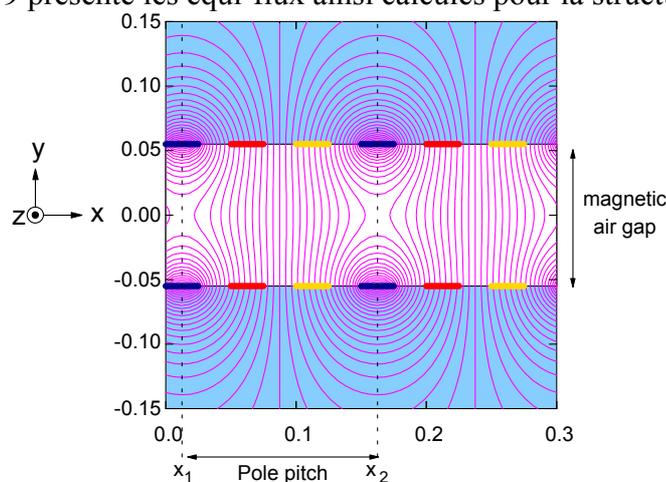


Figure II.17 : Exemple d'équi-flux obtenus avec la méthode analytique 2D.

Il est alors possible à partir de la valeur de ce champ, de calculer l'inductance des bobinages auquel il convient de rajouter les inductances de fuites à l'intérieur des

encoches qui peuvent être évalués selon [81]. Les résultats obtenus sont alors très proches de ceux calculés par différences finies 2D [82].

## 5 Conclusion

Les modèles présentés au cours de ce chapitre sont de formulation relativement classique et peuvent être appliqués à des structures de systèmes magnétiques ne présentant pas de saillances importantes et où les matériaux magnétiques sont considérés comme linéaires. Deux types de modèles sont ici présentés et illustrés. Un premier type de modèle dit de « premier ordre » est basé sur la résolution des équations de Maxwell sous leur forme intégrale. Un deuxième type de modèle dit « analytique 2D » plus précis et plus lourd repose sur la mise en place d'une solution à variables séparées (série de Fourier) de l'équation de la magnétostatique en 2D. Ces modèles peuvent s'appliquer par exemple à des machines synchrones à aimants à pôles lisses mais également à des machines asynchrones comme par exemple dans les travaux menés dans le cadre d'un stage de Master Recherche que j'ai encadré [83].

Dans le cas des structures de machines électriques à aimants permanents déposés en surface à pôles lisses ces modèles sont souvent pertinents. Ils peuvent permettre par exemple une évaluation qualitative directe de l'influence de paramètres de dimensionnement par lecture directe des expressions mathématiques ce que ne permettent pas en général des modèles numériques plus précis en terme quantitatif. Leur intégration dans le cadre d'une approche globale multi physique des systèmes comprenant des structures magnétiques de ce type peut être intéressante. Ces modèles peuvent en effet se révéler particulièrement performants s'ils sont couplés à des modèles d'un niveau équivalent de complexité et de précision (modèles thermiques, mécanique, hydrodynamique, etc.). Ces modèles couplés peuvent alors être utilisés avec succès pour l'investigation de nouveaux concepts ou pour un dimensionnement systématique global des systèmes.

La formulation des solutions du modèle « analytique 2D » sous forme de série de Fourier est également un point intéressant. Si on se limite au premier harmonique d'espace, il est par exemple possible de prendre en compte par intégration de l'induction les phénomènes 2D dans l'entrefer pour l'évaluation des performances de machines alimentées en sinusoïdal. Ceci constitue une évolution du modèle « de premier ordre » qui permet de traiter des structures à grand entrefer ou les fuites entre pôles peuvent être importantes. La résolution du champ par « harmoniques d'espace » permet également une bonne adaptation aux théories multi-machine utilisées pour modéliser les machines polyphasées qui repose également sur une décomposition harmonique. Cette approche s'avère alors un outil très pertinent pour le dimensionnement de ce type de systèmes.

Cependant il ne faut pas perdre de vue que la mise en œuvre de ces modèles repose sur des hypothèses simplificatrices très fortes. Une de ces hypothèses consiste à travailler sur une machine équivalente totalement lisse et en particulier sans encoche. Afin d'obtenir des résultats plus réalistes, l'influence de l'encoche peut alors être prise en compte par des méthodes correctrices telles que l'introduction d'une fonction de perméance ou le calcul d'inductances de fuites à l'intérieur des encoches. Une deuxième hypothèse consiste à travailler en 2D ce qui limite les cas étudiés à des structures où le champ est globalement invariable selon une dimension sur la longueur du système. Le calcul peut alors difficilement s'appliquer de manière réaliste sur des systèmes où la composante tridimensionnelle du champ est significative comme les machines où la longueur active

est courte et l'entrefer important ou dans le cas de structures à géométrie tridimensionnelle de flux (machines à flux axial, machines à flux transverses, etc.).

Dans ces cas tridimensionnels, ou dans le cas de structures où les sources de champ comme les aimants présentent des géométries complexes, il est parfois possible sous certaines hypothèses de calculer les champs magnétiques selon une approche différente. Cette approche repose sur une représentation équivalente de la structure sous forme de répartitions de sources élémentaires de champ dans le vide. Ce type de méthode et son application à un certain nombre de systèmes fera l'objet du chapitre suivant.

# III) Utilisation de méthodes de calcul de champ de type intégration spatiale de sources élémentaires dans le vide

## 1 Introduction

Au cours de ce chapitre, j'aborderai la mise en œuvre de méthodes de calcul analytique du champ et des forces magnétiques basées sur la représentation des sources de champs (aimants, bobinages) par un ensemble de distributions spatiales simplifiées de sources de champ magnétiques élémentaires dans le vide. Cette méthodologie permet de modéliser des systèmes électromécaniques et magnéto mécaniques complexes sous certaines hypothèses en prenant en compte des phénomènes tridimensionnels ou à géométrie d'aimantation complexe. Ils sont donc particulièrement intéressants si l'on souhaite intégrer de tels modèles dans des méthodes d'optimisation dimensionnelle de telles structures électromagnétiques ou pour une intégration de ces modèles dans un environnement multi-physique.

Le calcul du champ magnétique créé par la source considérée peut alors être ramené à un calcul intégral sur cet ensemble de sources élémentaires. Ces sources élémentaires sont, soit des distributions spatiales simples de charges magnétiques qui peuvent être des charges ponctuelles, surfaciques ou volumiques (représentation coulombienne), soit des distributions spatiales de courants (ligne, nappes, densité volumique de courants).

Une première partie de ce chapitre sera naturellement consacrée à la représentation de sources typiques dans le vide ou dans un entrefer ferromagnétique. Une deuxième partie sera consacrée à la mise en œuvre de ces représentations au sein d'un système plus complexe.

Nous montrerons ensuite comment ces méthodes peuvent être mises en œuvre pour le calcul de certaines caractéristiques de machines électriques et en particulier de machines électriques spéciales à aimants. Puis nous présenterons alors les modèles élaborés et les résultats que nous avons obtenus pour calculer les performances de systèmes magnéto-mécaniques à aimants tels que les accouplements et les paliers magnétiques.

## 2 Représentation des sources de champ

Nous nous consacrerons au cours de ce paragraphe à décrire les représentations possibles par la méthode ampérienne ou coulombienne des sources de champ classiques que sont les aimants permanents et les bobinages ainsi que la prise en compte sous certaines conditions des matériaux ferromagnétiques.

### 2.1 Aimants permanents

#### 2.1.1 Approche Coulombienne

Un aimant permanent peut classiquement être représenté dans le vide par une répartition de charges (ou masses) magnétiques [84]. Il est à noter que ces masses magnétiques n'ont pas de réalité physique mais sont des grandeurs de calculs.

Un aimant permanent que l'on peut supposer, au premier ordre, de perméabilité égale à celle du vide répond à l'équation suivante.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad (\text{III.1})$$

Si on suppose l'aimant rigide, ce qui est en général réaliste dans le cas d'aimants permanents utilisés dans des situations industrielles, on peut considérer que la magnétisation  $\vec{M}$  est une constante locale. Dans ce cas l'aimant peut alors être considéré comme un ensemble de charges magnétiques. Sur les surfaces qui limitent le volume de cet aimant on va alors trouver des densités de charges surfaciques.

$$\sigma_s = \vec{M} \cdot \vec{n} \quad (\text{III.2})$$

Où  $\vec{n}$  est la normale à la surface frontière de l'aimant (orientée vers l'extérieur).

Il est à noter que si la divergence de  $\vec{M}$  est non nulle on doit rajouter à ces charges surfaciques une densité de charge volumique qui est égale à

$$\sigma_v = -\text{div}(\vec{M}) \quad (\text{III.3})$$

A titre d'exemple les aimants à aimantation parallèle constante rigide peuvent alors être ramenés à un ensemble de plans chargés d'une densité de charges constantes comme présentées à la figure III.1 pour un aimant parallélépipède [18, 85, 86].

Des anneaux ou des portions d'anneaux d'aimants à aimantation radiales sont eux l'association de charges surfaciques et d'une densité de charges volumique comme dans l'exemple qui concerne des anneaux magnétiques magnétisés radialement [87].

### 2.1.2 Approche Ampérienne

Il est également possible de représenter un aimant par un ensemble de courants élémentaires équivalent [84]. A titre d'exemple un aimant parallélépipède tel que celui de la figure 1 peut être représenté par un ensemble de courant surfacique sur les surfaces frontières de l'aimant ainsi que par une densité volumique de courant si la quantité  $\vec{M}$  présente un rotationnel non nul.

Pour mémoire cette densité surfacique de courant sur les surfaces frontières est égale à

$$\vec{K} = (\vec{M} \wedge \vec{n}) / \mu_0 \quad (\text{III.4})$$

La densité volumique de courant s'écrit alors

$$\vec{K}' = \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{M}) / \mu_0 \quad (\text{III.5})$$

Ainsi un aimant parallélépipède à aimantation parallèle rigide peut être ramené à une nappe surfacique de courant sur les 4 faces parallèle à l'aimantation dont la densité surfacique de courant vaut  $M/\mu_0$  (figure III-1).

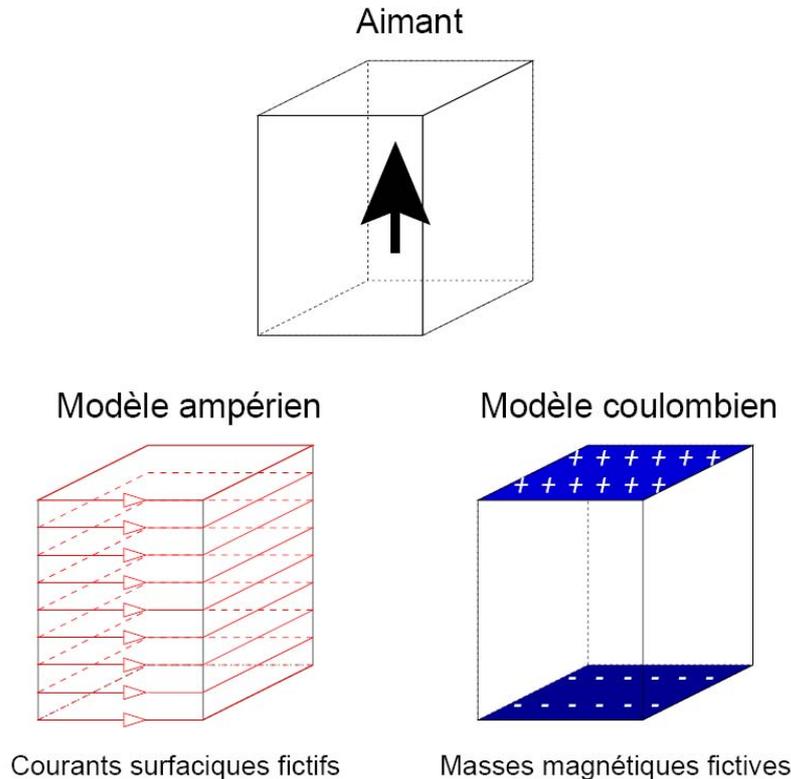


Figure III-1 : Représentation ampérienne et coulombienne d'un aimant parallélépipède à aimantation parallèle à un de ces axes.

## 2.2 Bobinages

Les bobinages peuvent être représentés naturellement par une approche ampérienne « naturelle » s'ils se trouvent dans un milieu magnétique homogène. Il est à noter que dans un grand nombre de cas pratiques, les bobinages sont positionnés dans des encoches au sein d'une culasse ferromagnétique (c'est le cas de la plupart des machines électriques). Il est alors possible de ramener ce cas au cas d'une culasse non encochée où l'on place des densités surfaciques de courant au niveau de l'ouverture des becs d'encoche. Dans ce cas particulier l'entrefer peut être en général étendu par une transformation conforme à un entrefer non encoché de perméabilité équivalente [28,29].

Cette hypothèse classique permet par exemple de définir à partir d'une machine encochée une machine équivalente lisse selon la méthode décrite au chapitre précédent.

Il est à noter qu'il est également possible à partir d'un bobinage dans l'air de définir des masses magnétiques équivalentes. Cette solution relativement peu habituelle est par exemple proposée pour des machines 3D sans fer dans [88].

## 2.3 Prise en compte de culasses ferromagnétiques au sein d'un entrefer

Dans la plupart des systèmes électromagnétiques le champ créé par les sources de champ (aimants, courants) est canalisé par des culasses ferromagnétiques qui bornent un « entrefer magnétique » pouvant comprendre des aimants permanents et des bobinages.

Ainsi dans une machine électrique on a en général une culasse ferromagnétique statorique et rotorique. Dans certains cas particuliers il est possible de ne rencontrer qu'une seule culasse ferromagnétique (au stator par exemple). Les culasses ferromagnétiques que l'on rencontre habituellement dans les systèmes électromagnétiques Basse Fréquence de ce type peuvent alors être pris en compte sous certaines hypothèses.

Ainsi une culasse ferromagnétique peut souvent être ramenée à une surface séparant un milieu de perméabilité assimilable à celle du vide (entrefer magnétique) avec un milieu de perméabilité très forte (matériau ferromagnétique doux de type fer). Il est alors souvent pertinent d'assimiler la perméabilité de ce dernier milieu à une valeur infinie. Dans un certain nombre de cas la surface interface entre l'entrefer et la culasse peut être ramenée à une surface plane de très grande dimension (On va alors négliger par exemple la courbure de l'entrefer).

Dans ce cas cette surface peut être considérée comme une équipotentielle au sens du potentiel scalaire magnétique. Il est alors possible de prendre en compte la présence de la culasse en utilisant la théorie, bien connue en mécanique, des images. Ainsi un ensemble de sources élémentaires produira le même champ dans l'entrefer en présence d'une telle culasse que cet ensemble de sources et un ensemble de sources images de même topologie situés symétriquement à cette surface dans le vide. Dans le cas de charges magnétiques, les sources images sont des charges de signe opposé aux charges des sources considérées. Dans le cas de répartition de courant, les sources images sont alors des courants de même signe que les courants considérés. La figure III-2 présente le cas d'un ensemble de charges magnétiques en présence d'une culasse ferromagnétique.

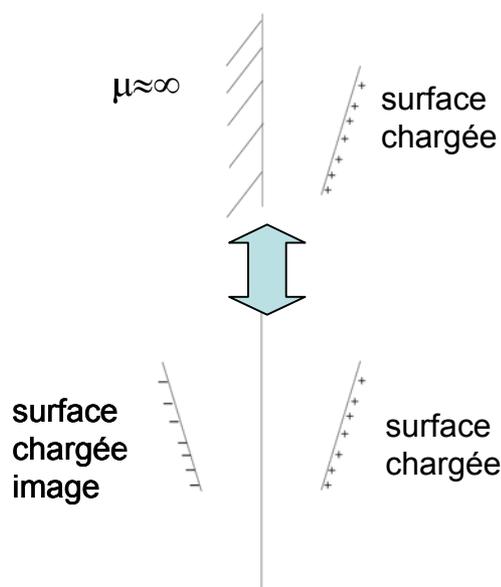


Figure III-2 : Application de la théorie des images à une surface chargée en présence d'une culasse ferromagnétique.

Il est aussi possible de prendre en compte la présence de 2 culasses comme dans le cas d'un entrefer de machine électrique conventionnelle. Dans ce cas il faudra considérer une suite infinie d'images afin de prendre en compte l'influence de ces 2 culasses. Ainsi

la figure III-3 présente l'ensemble de charges équivalentes à un plan chargé compris entre deux culasses ferromagnétiques.

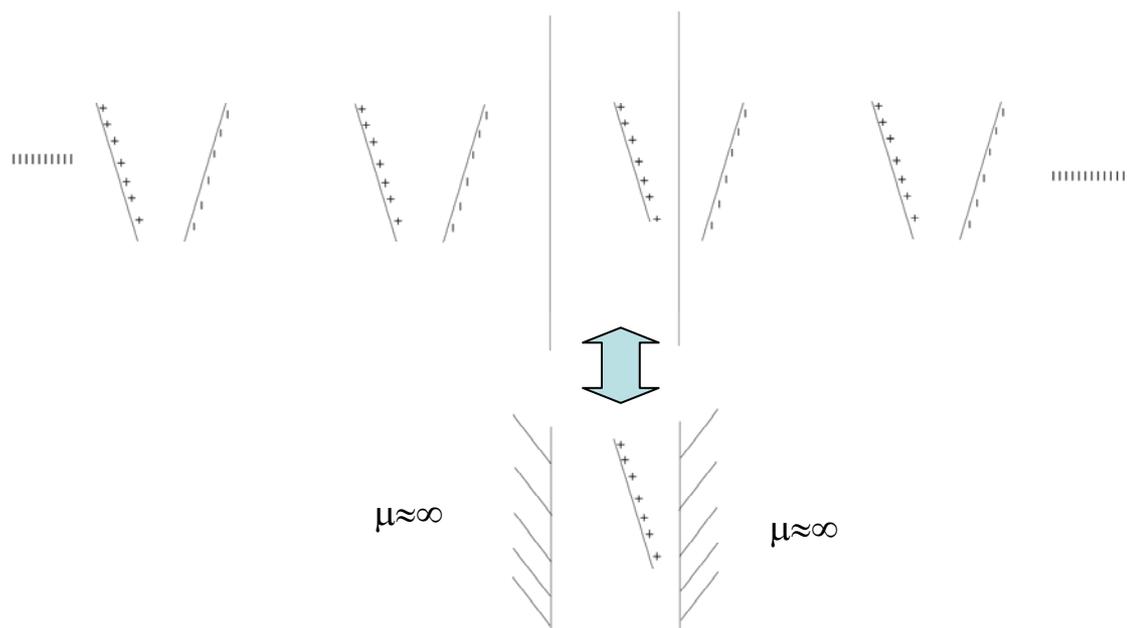


Figure III-3 : Application de la théorie des images à une surface chargée en présence de 2 culasses ferromagnétiques.

Il est à noter que ce type de représentation présente des limites pratiques importantes. Par exemple dans le cas des machines électriques à entrefer radial, seules des machines dont on peut négliger la courbure, c'est-à-dire dont l'entrefer et l'arc polaire sont beaucoup plus petit que le rayon, peuvent être représentées. Dans un cas inverse, il paraît donc beaucoup plus pertinent de se baser sur une approche bidimensionnelle par séparation de variables du type de celle décrite dans le chapitre III.

### 3 Calcul du champ dans les zones d'interaction.

Pour dimensionner les structures électromagnétiques on est amené à calculer l'induction dans les zones d'interaction électromagnétique (pour une machine il s'agit en général de l'entrefer). Le calcul de cette induction va nous donner accès d'une part à des valeurs locales du champ qui peuvent nous permettre d'évaluer par exemple l'état de saturation des matériaux ferromagnétiques ou la désaimantation éventuelle des aimants.

L'intégration du champ peut également nous donner accès à des grandeurs globales liées au flux magnétiques comme par exemple les inductances et les forces électromotrices selon les méthodes de calcul décrites au chapitre précédent.

#### 3.1 Calcul des champs créés par une répartition de charges.

Le potentiel magnétique scalaire,  $V$ , créé par une répartition de charges magnétiques (densité surfacique  $\sigma_s$  et volumique  $\sigma_v$ ) dans le vide est [84,85]

$$V = \frac{1}{4\pi\mu_0} \iint \frac{\sigma_s}{r} dS + \iiint \frac{\sigma_v}{r} dv \quad (\text{III.6})$$

$r$  est la distance du point de calcul à la répartition élémentaire de charge.

De ce potentiel, il est aisé de déterminer le champ magnétique,  $H$ , créée par cet ensemble de charge.

$$\vec{H} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) \quad (\text{III.7})$$

Ainsi le champ créé par une surface chargée (densité surfacique  $\sigma_s$ ) est, par exemple, donné par

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \iint \frac{\sigma_s \vec{r}}{r^3} dS \quad (\text{III.8})$$

Il est à noter que dans le cas particulier d'une surface parallélépipède, il est possible d'exprimer analytiquement ce champ en tout point de l'espace [89]. Les expressions analytiques du champ créée par cette « plaque » chargée sont donnée en annexe 2.

### 3.2 Cas d'une répartition de courants

Dans le cas d'une répartition de courant, le potentiel vecteur  $\vec{A}$  dont dérive l'induction  $\vec{B}$  peut s'exprimer selon la formule classique de Biot et Savard par :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \iiint_v \frac{\vec{K} dV}{|\vec{r}|} + \iint_s \frac{\vec{K}' dS}{|\vec{r}|} \right] \quad (\text{III.9})$$

Ce qui conduit à

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \iiint_v \frac{\vec{K} dV \wedge \vec{r}}{|\vec{r}|^3} + \iint_s \frac{\vec{K}' dS \wedge \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \right] \quad (\text{III.10})$$

$\vec{K}$  et  $\vec{K}'$  sont ici respectivement les densités surfaciques et volumique de courant dans le domaine d'étude.

Il est à noter que cette expression conduit à des formulations analytiques exactes dans un certains nombre de configurations particulières.

## 4 Calcul par la représentation des aimants par les masses magnétiques des caractéristiques de machines électriques non conventionnelles.

Ces formulations permettent de prendre en compte un certain nombre de configurations de machines et de systèmes électromagnétiques fonctionnant à basse fréquence à géométrie non conventionnelle et d'exprimer un certain nombre de grandeurs globales telles que les flux et forces électromotrices. Nous allons au cours des paragraphes suivant exposer quelques exemples de mise en œuvre de ces formulations à des fins de pré dimensionnement ou d'optimisation de tels systèmes.

#### 4.1 Calcul du champ à vide sur une machine discoïde à aimants.

Cet exemple a été publié dans [90] et concerne la modélisation de plusieurs types de machines discoïdes, mono-rotor mono-stator, à aimants permanent. Ce travail a été effectué en partie dans le cadre d'un projet de fin d'étude de 2 étudiants de niveau Master 2 de l'ENSEM Mohamedia (Maroc), MM. Jennane et Fadli.

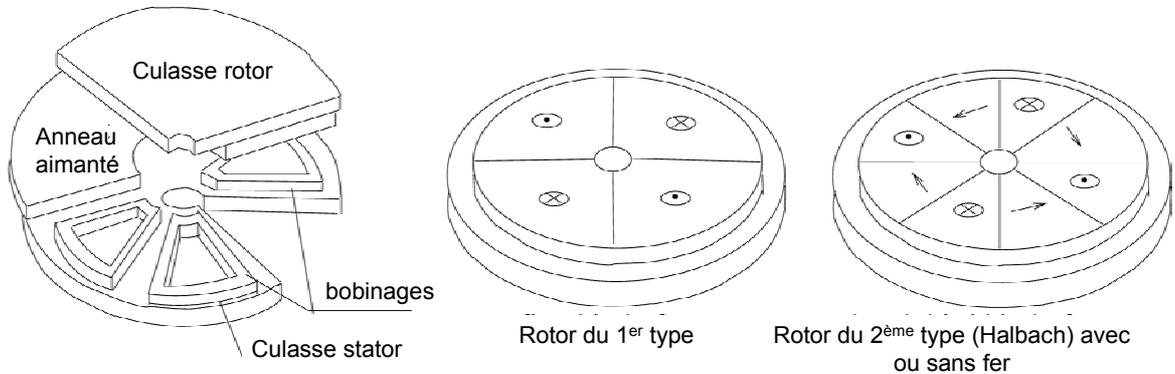


Figure III.4 : machines discoïdes étudiées.

Cet ensemble de machines comprend des machines dont les aimants sont orientés classiquement selon l'axe de rotation du disque rotorique ainsi que des machines dont les aimants forment une configuration originale inspirée des anneaux de Halbach [35-37]. Cette dernière configuration permet d'obtenir des performances intéressantes dans le cas où la culasse rotorique ne comprend pas de parties ferromagnétiques (rotor sans fer). Pour une configuration de type Halbach, les cas de machines dotées d'une culasse rotorique ferromagnétique et d'une culasse rotorique non ferromagnétique sont étudiés. Ces configurations sont décrites à la figure III.4. Les aimants sont alors constitués de portions d'anneaux et peuvent alors être représentés comme un ensemble de portion de surfaces discoïdes perpendiculaires à l'axe et de surfaces rectangulaires chargées. La méthode des images décrite au paragraphe 2.3 de ce chapitre est utilisée pour prendre en compte les culasses. La contribution au champ à vide des surfaces rectangulaires a été calculée de manière analytique selon les expressions de l'annexe 2. Nous n'avons, par contre, pas pu mettre en évidence une formulation analytique de la contribution des surfaces chargées constituées de portions de disques. Afin de calculer ces contributions, une méthode numérique d'intégration de l'intégrale surfacique de l'équation (III.8) a été mise en œuvre selon la méthode de Gauss et Labotto [91,92] à l'aide de la bibliothèque NAG. Ainsi on peut qualifier la méthode employée de semi-analytique car elle conjugue des méthodes analytiques à des méthodes d'intégration qui elles sont numériques Cette méthodologie va alors permettre de calculer le champ magnétique  $H$  et donc l'induction magnétique  $B$  à l'intérieur de l'entrefer.

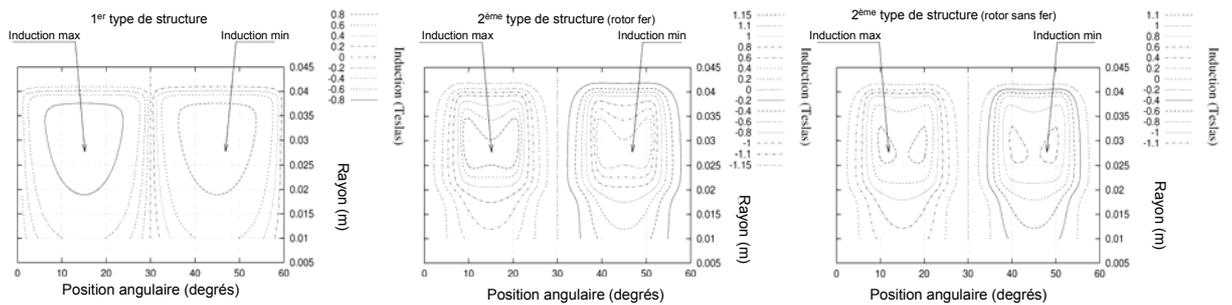


Figure III.5 : induction obtenue en surface de la culasse statorique en face d'une paire de pôles

La figure III.5 présente l'induction axiale obtenue en surface de la culasse statorique en face d'une paire de pôles en fonction du rayon et de l'angle mécanique pour des machines dont les dimensions sont :

- Rayon intérieur et rayon extérieur des aimants: 2 et 4cm
- Epaisseur des aimants 1cm
- Magnétisation des aimants 1T
- Entrefer : 1cm
- 12 pôles

Ces résultats ont été validés par comparaison avec du calcul de champ par éléments finis 3D (Logiciel Flux3D) en magnétostatique. La figure III.6 montre les valeurs moyennes de l'induction sous le pôle, calculées analytiquement et par éléments finis 3D (EF3D) pour des dimensions identiques et un nombre de paires de pôles variant de 2 à 14 (cette valeur de l'induction est caractéristique de l'amplitude du flux à vide sous le pôle). On constate une très bonne concordance entre les méthodes de calcul semi-analytique et numérique.

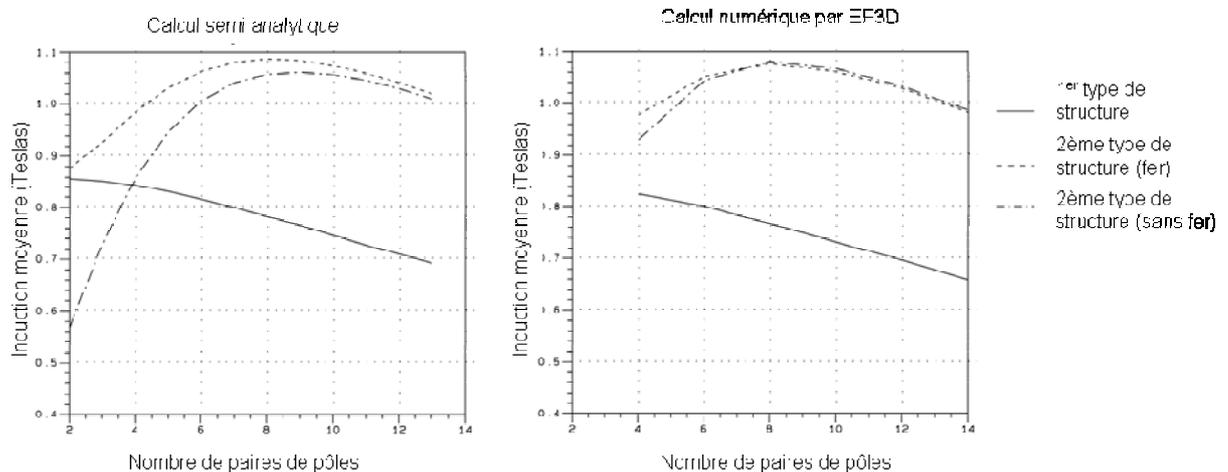


Figure III.6 Induction moyenne au centre d'un pôle

L'étude a permis de mettre en évidence que dans ce type de structure une aimantation de type anneau de Halbach pouvait conduire à une induction moyenne, sous le pôle, supérieure à la valeur de la magnétisation et à la conclusion que l'usage de structures rotoriques sans fer pouvait être envisagées dans ce type de système. Ce type de machine peut être particulièrement performant dans les applications où un fort couple et une très faible inertie rotorique sont exigés. Il est à noter que même si l'exemple présenté ne concerne que des machines ne comprenant qu'un seul disque rotor et un seul disque stator, la méthode peut aisément s'étendre aux structures multi-disques.

## 4.2 Calcul du Champ à vide dans une machine linéaire à aimants permanents à stator long et navette courte.

Cette étude a été effectuée dans le cadre de l'étude de systèmes de catapultage électromagnétique d'aéronefs sur porte avions [82]. Cette application et le cahier des charges du système ont été présentés au paragraphe 4.2.2 du chapitre précédent. Un des paramètres qui conditionne de manière significative les performances du système est la forme d'onde et la valeur du champ à vide créée par la navette aimantée. En effet, la valeur de ce champ à vide, pour une structure donnée de stator et des paramètres de bobinage et d'alimentation fixés, va nous permettre de calculer la poussée électromagnétique que va fournir le système.

Pour étudier ces structures nous avons tout d'abord effectué une étude par différences finies 2D de ce système qui nous a permis de mettre en évidence l'intérêt d'utiliser des aimantations non conventionnelles originales et des bobinages concentrés [77]. Nous avons aussi développé un modèle analytique permettant d'étudier de manière systématique ce type de structures dont la partie permettant le calcul du champ créé par l'induit est présentée au chapitre précédent. L'exemple présenté ici concerne le calcul du champ à vide créé par la navette d'aimant. Plusieurs configurations au niveau des pôles de navettes sont étudiées. Des navettes à aimantations conventionnelles sont caractérisées et comparées avec une navette intégrant une configuration à aimantation tournante de type Halbach. Les configurations étudiées sont présentées à la figure III.7

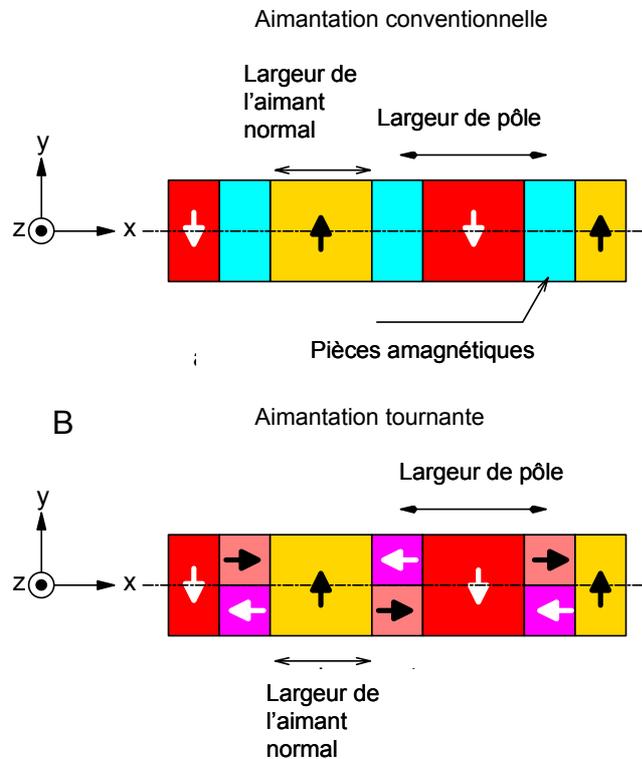


Figure III.7 : Configurations de navettes (2 pôles sont représentés)

Si un calcul par séparation de variables peut être utilisée pour calculer le champ créé par les bobinages (chapitre précédent), la structure de navette étant courte un calcul, par des méthodes de ce type, du champ créé par la navette paraît totalement inapproprié du fait des effets de bord sur chaque bout de la navette.

Nous avons alors choisi de modéliser les aimants par des masses magnétiques. Les aimants peuvent alors être représentés par des surfaces rectangulaires chargées magnétiquement et les stators sont ramenés à des stators lisses selon la méthode décrite au paragraphe 4.2.2 du chapitre précédent.

Le champ à vide peut alors être calculé selon la méthode des paragraphes 2.3 et 3.1 et les expressions de l'annexe 2. La géométrie du stator et son alimentation sont alors maintenues constantes et sont celles de l'étude américaine [76]. La connaissance du champ à vide permet alors de déduire, connaissant les courants au stator, la force s'exerçant entre le stator et la navette et donc la poussée. Les méthodes mises en œuvre permettent l'exploration systématique de la structure de la navette. La figure III.8 présente les résultats obtenus par cette méthode, sur cette structure, pour des aimantations conventionnelles et tournantes (type Halbach). La poussée a été calculée par la méthode des différences finies 2D et par la méthode analytique. On constate d'abord que les résultats numériques confirment la validité de la méthode analytique. D'autre part l'usage systématique d'une telle méthode permet de mettre en évidence des solutions non conventionnelles particulièrement performantes.

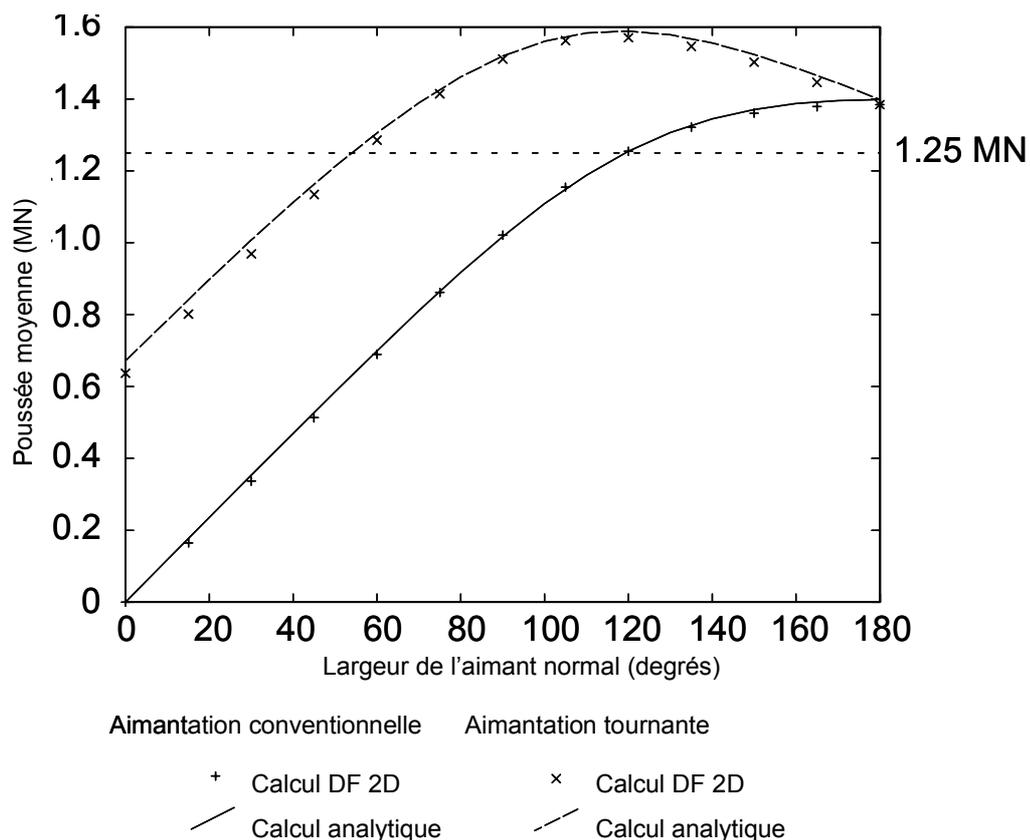


Figure III.8 : Valeur moyenne de la poussée en fonction de la largeur de l'aimant normal

### 4.3 Calcul de la FEM et optimisation dimensionnelle d'une machine à aimants prismatiques.

L'étude présentée ici s'intéresse à des structures de machines originales qui ont été conçues afin d'obtenir des FEM trapézoïdales, des inerties très faibles, un couple massique important et un nombre de pôles élevés [93].

L'obtention d'une FEM trapézoïdale permet en effet de minimiser la complexité des capteurs de position et de courant ainsi que la commande [40,41]. La structure originale qui a été imaginée comprend des aimants prismatiques avec des prismes triangulaires. Dans cette structure des aimants à aimantations radiales alternent avec des prismes aimantés ortho radialement. Une telle structure peut être par exemple réalisé avec des aimants liés isotropes. La figure III.9 présente une vue de principe de ce type de structure. Le choix a volontairement été fait d'étudier une structure sans encoches ou les bobinages sont placés dans l'entrefer afin de minimiser les phénomènes liés à l'encochage.

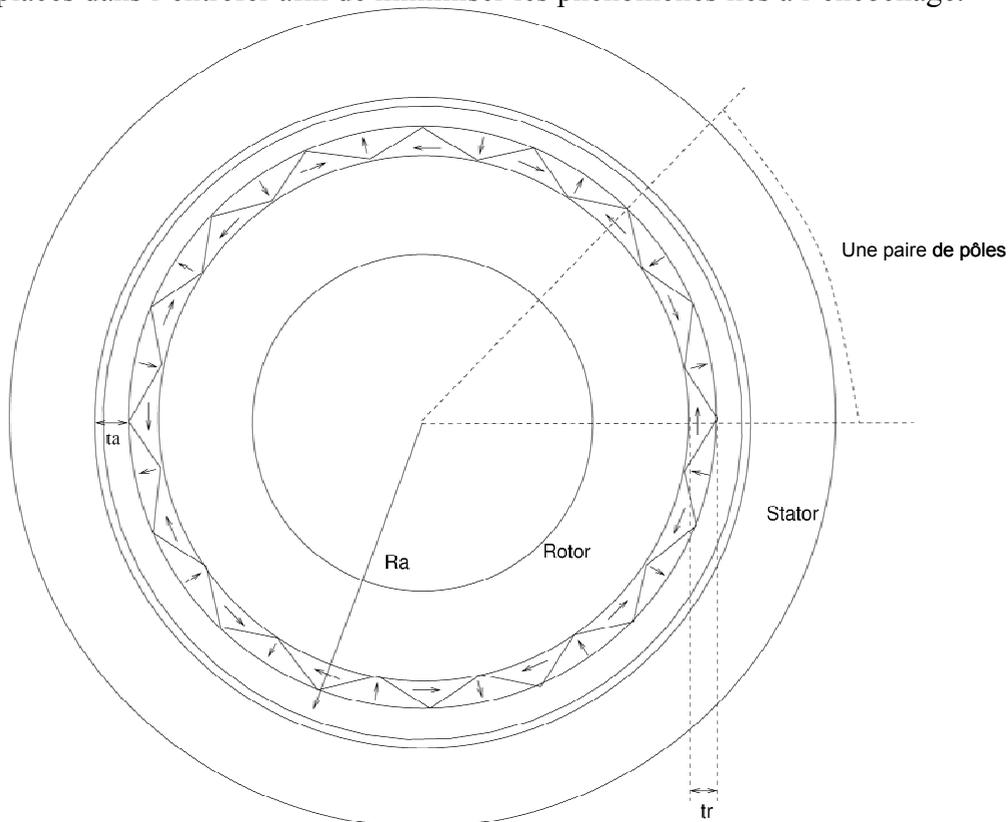


Figure III.9 : structure d'une machine à aimant à aimantation prismatique

Il paraît relativement difficile même si c'est théoriquement possible de prendre en compte de tels aimants dans un calcul de type séparation de variables. Le choix a donc été fait de représenter l'aimantation par des masses magnétiques et de calculer la contribution de cette répartition de masse magnétique. Il est alors nécessaire de négliger l'effet de la courbure de la machine en étalant les pôles à plat (figure III.10). La répartition de charges des 2 types d'aimants est représentée par les surfaces rectangulaires décrites figure III.11 où  $\delta hr = \pm M$  et  $\delta gr = -\delta dr = \pm M \cos \theta$  et  $\delta gt = -\delta dt = \pm M \sin \theta$  ( $M$  étant la valeur de la magnétisation des aimants).

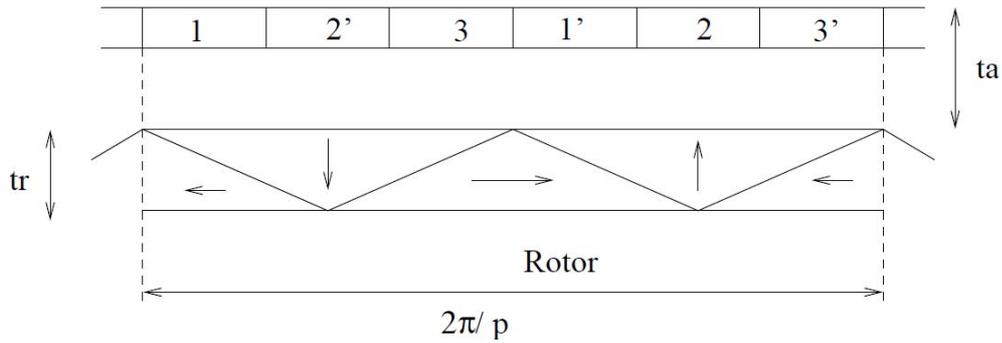


Figure III.10 : Pôles étalés à plat

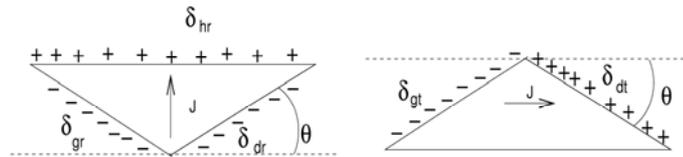


Figure III.11 : répartition de charge équivalente aux 2 types d'aimants

La méthode présentée au paragraphe 2.3 est utilisée pour prendre en compte les culasses ferromagnétiques. Les cas d'une culasse rotorique ferromagnétique et non ferromagnétique sont étudiés. L'induction est calculée au niveau d'un pôle central. Le champ créé par un certain nombre de pôle latéraux autour de ce pôle est calculé. Le nombre de pôles latéraux est déterminé par le fait que l'ajout de la contribution d'une  $n$ ème nouvelle paire de pôles latéral contribue à moins de  $1/1000$  du résultat obtenu avec  $n-1$  paires de pôles.

L'étude est menée avec des données communes qui sont

- Épaisseur d'aimant,  $tr$  : 20mm
- Magnétisation des aimants : 0,6 T
- Entrefer (comprenant les conducteurs),  $ta$ : 2mm
- Charge linéique 22400A/m
- Longueur axiale : 1m
- Rayon d'alésage : 10cm

La stratégie d'alimentation est celle de créneaux de courants de largeur  $120^\circ$  électriques, obtenue par l'usage d'un onduleur MLI (Figure III.12).

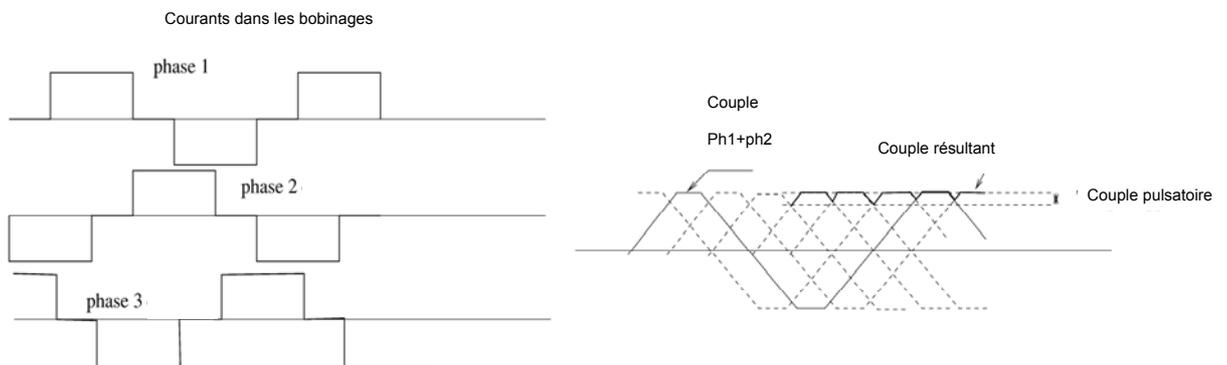


Figure III.12 stratégie d'alimentation

Pour un certain nombre de paires de pôles les résultats du calcul analytique ont été validés par calcul de champ par Différences finies 2D (DF 2D). Les résultats obtenus par DF2D sont alors très proches des résultats analytiques. Les figures III.14 et III.15 présentent des cartes des champs obtenus par DF 2D pour 3 et 8 paires de pôles. Les

résultats présentés à la figure III.13 présentent les résultats obtenus de manière analytique en terme de couple moyen et d'ondulation de couple en fonction du nombre de paires de pôles. On constate ici l'intérêt d'une telle méthode analytique. L'étude montre que pour une telle structure il est possible pour des nombres élevés de paires de pôles d'obtenir une force électromotrice trapézoïdale et de grande valeur en se passant d'une culasse ferromagnétique.

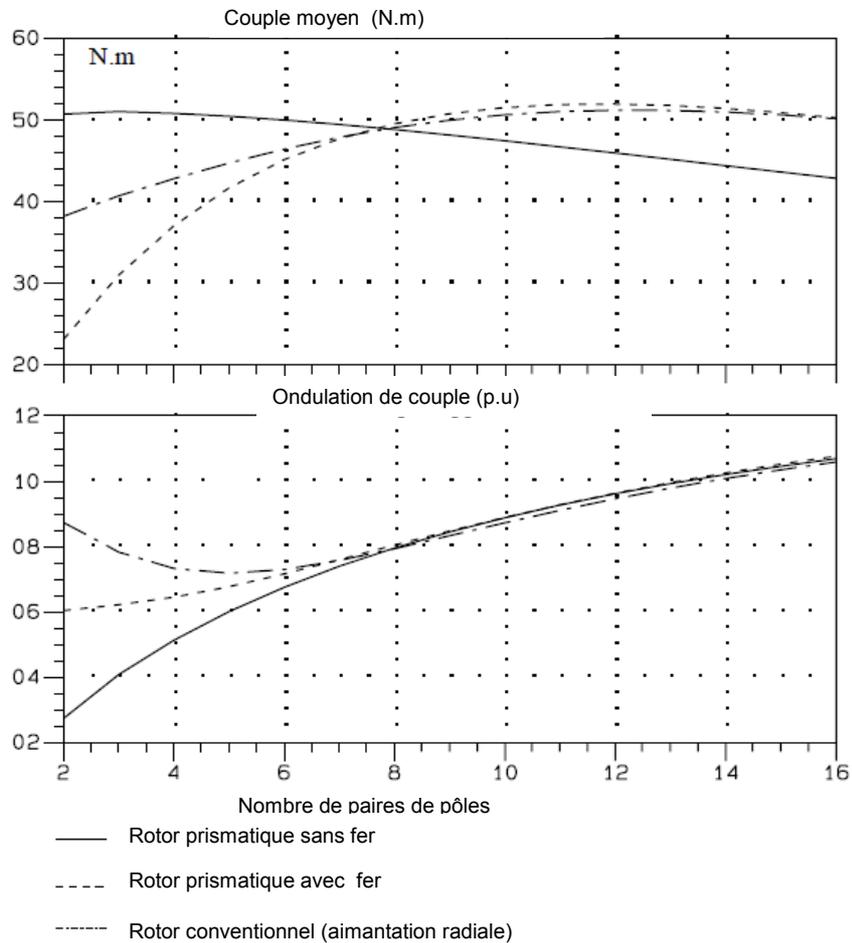


Figure III.13 : Couple et son ondulation en fonction du nombre de paires de pôles

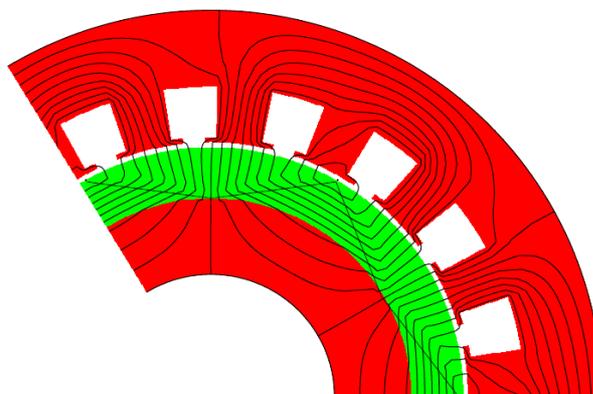


Figure III.14 : carte des champs (DF 2D) pour 3 paires de pôles

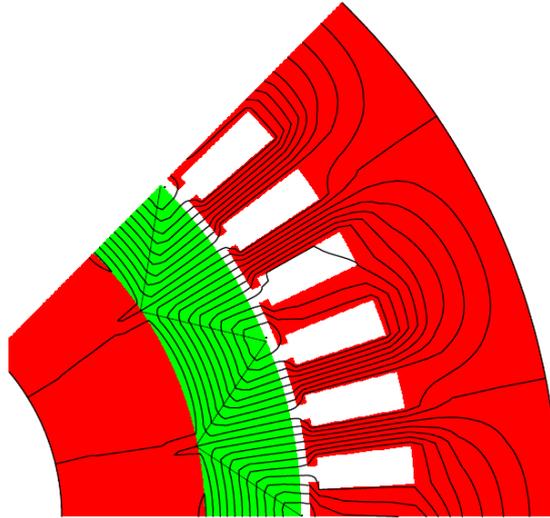


Figure III.15 : carte des champs (DF 2D) pour 8 paires de pôles

#### 4.4 Etude de machines monophasées spéciales à bobinages triangulaires et à aimants triangulaires, rectangulaires ou trapézoïdaux.

Ce même type de méthode a été utilisé afin de calculer et d'optimiser une machine monophasée originale spéciale à aimants permanents. Cette machine proche dans sa philosophie des machines monophasées à induit centralisé, comprend un bobinage statorique dont les encoches forment des triangles. L'intérêt d'une telle structure, est dans le cas d'une machine de très faible longueur active, de pouvoir mieux intégrer les têtes de bobines dans un ensemble compact. Cette structure a été étudiée dans le cadre du doctorat de Javier Rios-Quesada soutenu en 2002 [94,95]. La figure III.16 décrit le bobinage d'un pôle du stator d'une telle machine et montre l'intégration de la tête de bobine dans la structure. Dans le cadre de ce travail la possibilité de placer au rotor des aimants orientés radialement de différentes formes a été étudiée. Ces aimants peuvent alors avoir une forme rectangulaire (conventionnelle), triangulaire ou trapézoïdale. Le cas rectangulaire est alors un cas particulier des pôles trapézoïdaux. La figure III.17 présente les géométries étudiées de pôles. Ces structures sont des structures où le flux à une topologie tridimensionnelle. L'exploration des performances de ces structures nécessitant un grand nombre d'itération de calcul, il était nécessaire d'utiliser une méthode rapide et robuste. L'utilisation de la représentation par masses magnétiques des aimants avec l'hypothèse d'une courbure négligée a permis de calculer rapidement un grand nombre de structures. Les aimants sont alors pris en compte comme des surfaces uniformément chargées de formes rectangulaire (conventionnelle), triangulaire ou trapézoïdales. Dans tous ces cas, il est possible de trouver une solution analytique à l'expression (III.8). Le prise en compte des culasses est effectuée selon la méthode du paragraphe 2.3 (les courants étant ramené en surface du stator).

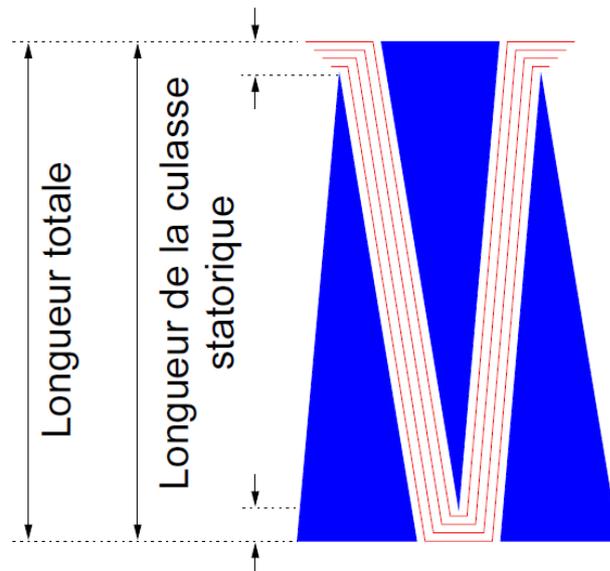


Figure III.16 : Bobinages du stator [94]

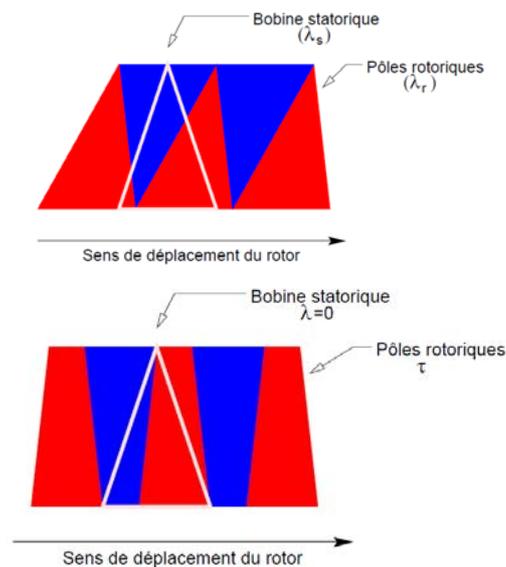


Figure III.17 : pôles rotoriques rectangulaires et trapézoïdaux [94]

A titre d'exemple nous présentons ici les résultats de la partie de l'étude qui concerne les pôles trapézoïdaux. Les pôles trapézoïdaux sont alors étudiés selon un coefficient caractéristique de leur forme  $\tau$ .  $\tau=0$  correspond à un triangle isocèle dont la forme est analogue aux pôles statoriques et  $\tau=0,5$  correspond à un pôle rectangulaire (conventionnel). La figure III.18 décrit la forme du pôle en fonction de ce coefficient ( $bt$  à la figure III.18 est la largeur d'une paire de pôles).

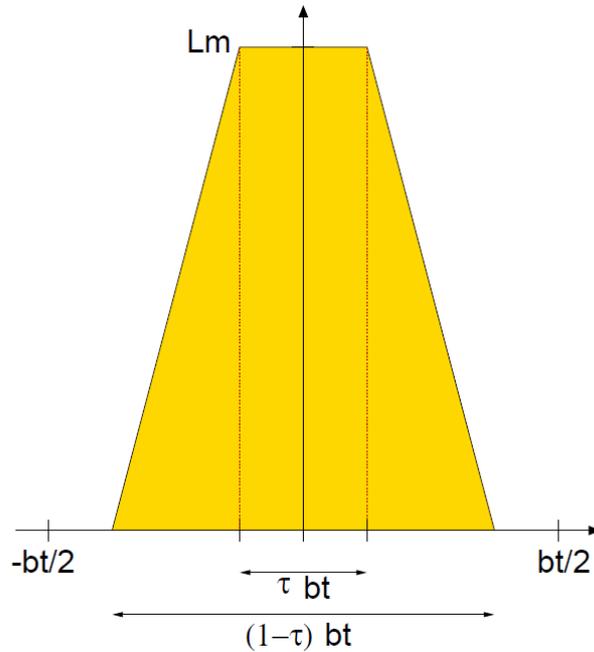


Figure III.18 : Géométrie d'un pôle rotorique trapézoïdal [94]

Nous présentons ici à la figure III.19 et III.20 le calcul du flux embrassé par le bobinage et de la FEM à 1 rad/s. Les valeurs de ces deux grandeurs en fonction du paramètre  $\tau$  et de la position angulaire pour un jeu de paramètres de la machine fixé :

- Diamètre d'alésage : 80mm
- Longueur axiale de la machine 40mm
- Entrefer mécanique : 1mm
- Epaisseur de la couche d'aimants : 10mm
- Aimantation : 1T
- 8 pôles
- 1 conducteur par encoche

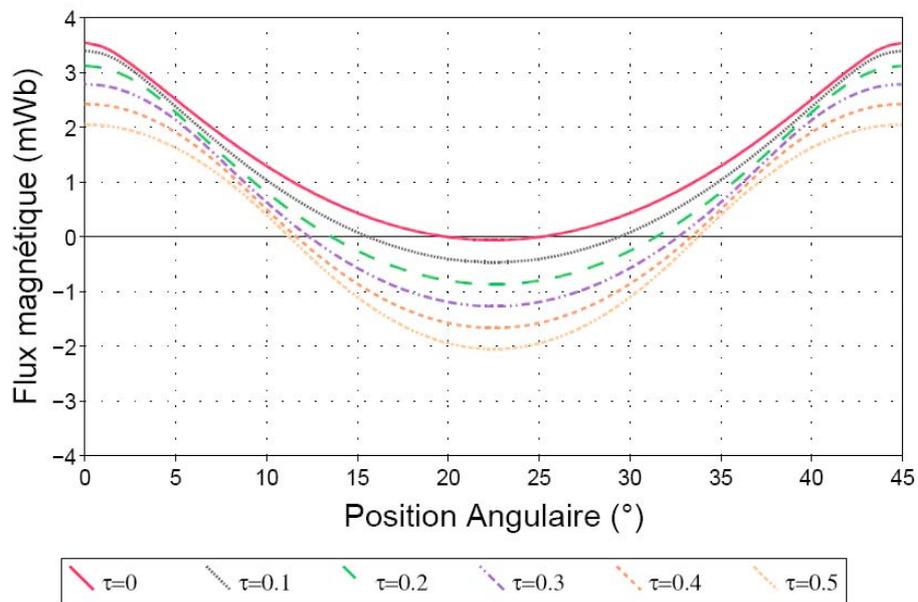


Figure III.19 : Flux embrassé par le bobinage

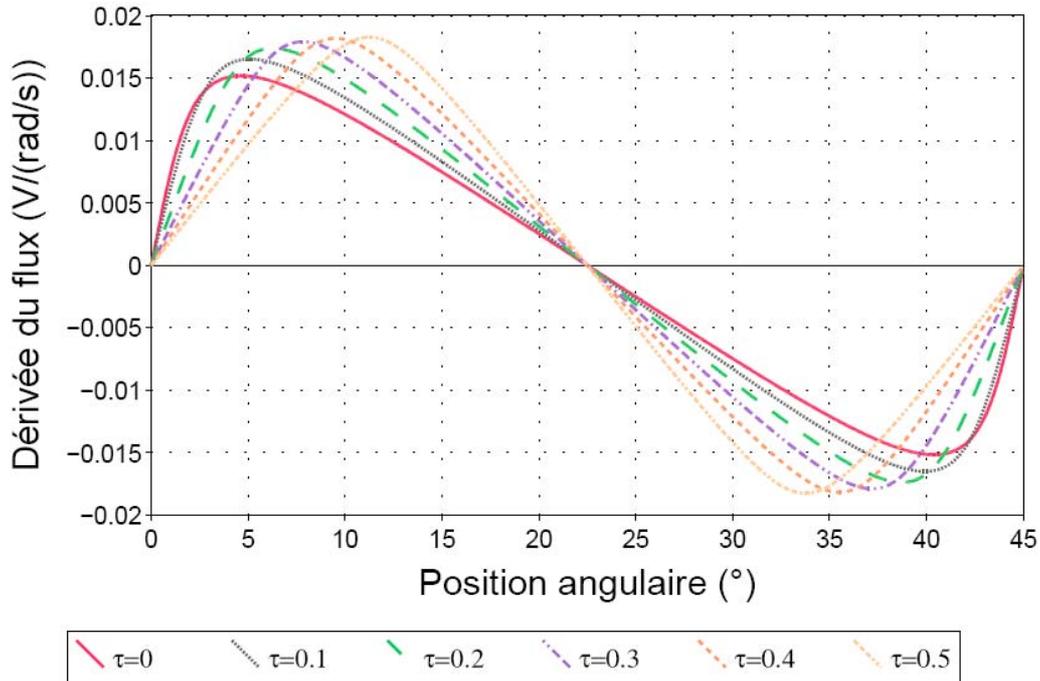
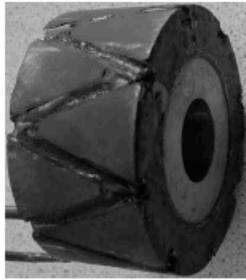


Figure III.20 : FEM à 1 rad/s

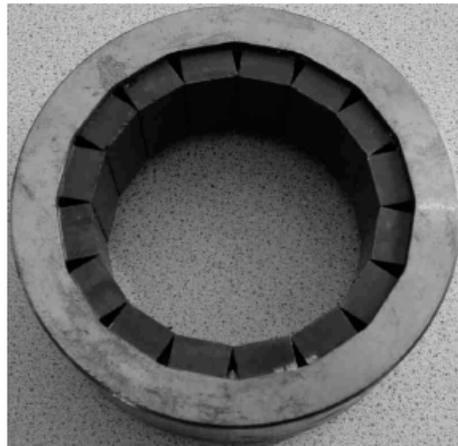
Ce type d'étude a été également réalisé avec des pôles triangulaires de différentes formes.

Cette étude analytique a été confirmée dans un second temps par des simulations numériques par éléments finis 3D en magnétostatique (Flux3D) [95]. L'étude a permis de conclure sur les performances de ces machines et a abouti à la réalisation d'un démonstrateur dont le stator a été réalisé dans des matériaux ferromagnétique composites et comprend 2 rotors externes interchangeable avec des pôles rotoriques rectangulaires. Un des rotors comprend des aimants Neodyme Fer Bore et l'autre des aimants ferrites.

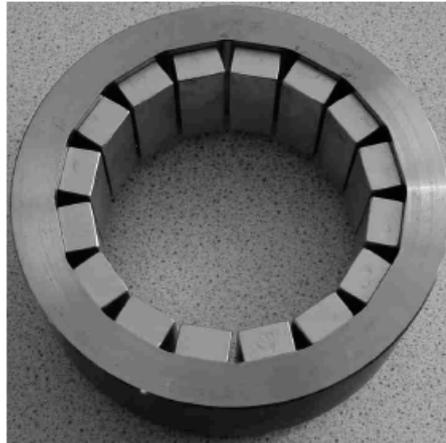
Une vue de ce démonstrateur est présentée à la figure III.21. La figure III.22 montre une comparaison entre les résultats obtenus sur le prototype avec un rotor Ne-Fe-B et ceux obtenus avec le modèle de calcul analytique. Les résultats expérimentaux ont alors montrés une bonne corrélation entre ce modèle et les mesures. On constate que le modèle analytique surestime les valeurs de FEM par rapport à la mesure. Ceci peut être expliqué par les hypothèses simplificatrices utilisées. L'effet des encoches sur la reluctance de l'entrefer n'a pas été pris en compte. Le matériau utilisé au stator a une perméabilité relativement faible et la courbure a été négligée. Néanmoins la méthode analytique proposé a permis un balayage rapide exploratoire d'un grand nombre de solutions avant le passage a une solution numérique 3D lourde et à la réalisation d'un démonstrateur.



**Stator**  
Pôles de forme  
triangle isocèle  
Noyau en poudre  
fer-résine



**Rotor**  
Pôles de forme  
rectangulaire  
Aimants ferrite  
Culasse ARMCO



**Rotor**  
Pôles de forme  
rectangulaire  
Aimants Ne-Fe-B  
Culasse ARMCO

Figure III.21 Vue du démonstrateur réalisé.

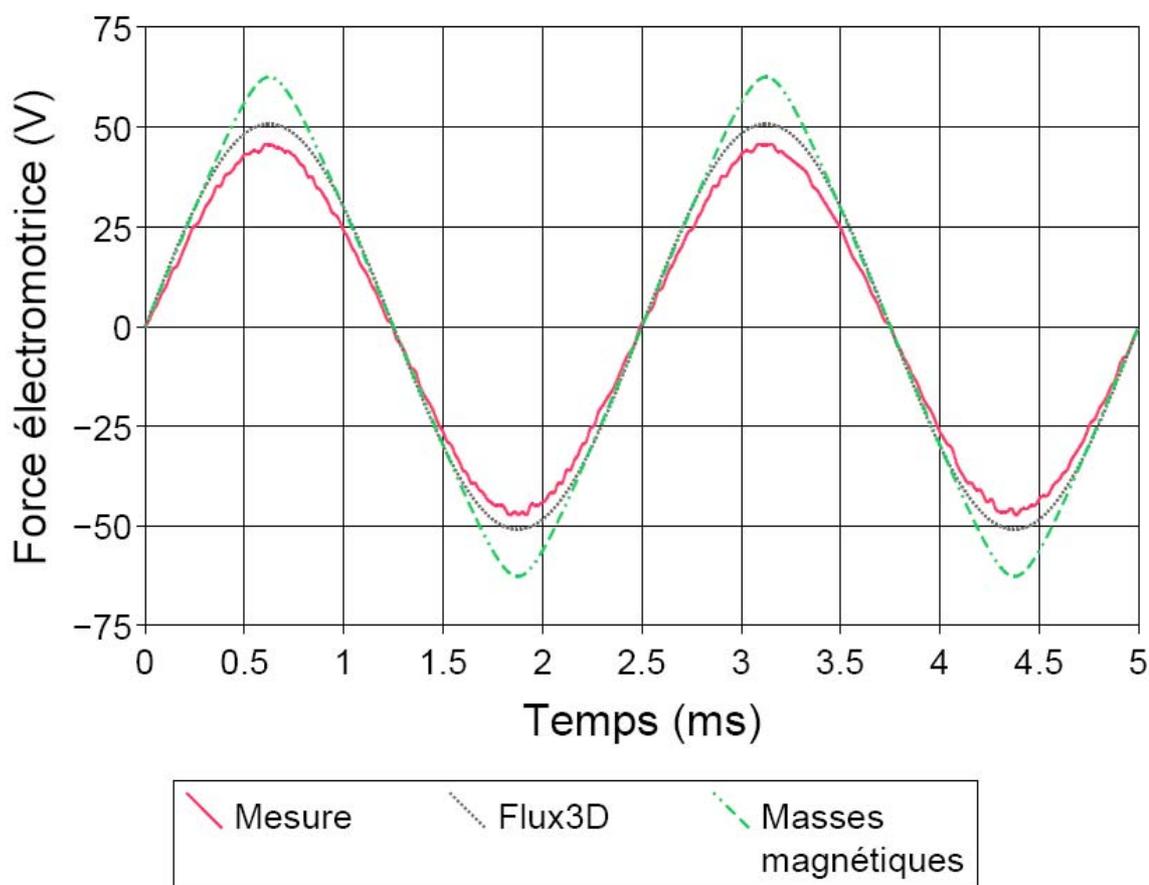


Figure III.22 : comparaison des résultats expérimentaux avec les modèles de calcul analytiques et numériques

#### 4.5 Prise en compte des effets d'extrémités dans une machine courte à grand entrefer.

Cette étude a été menée dans le cadre de la thèse de Laurent Drouen (2006-2010) dans laquelle ont été développés des modèles multi physiques de systèmes machines hélices pour la propulsion navale et la récupération d'énergie marine. Nous nous sommes intéressés en particulier aux systèmes à entraînement circonférentiel. La difficulté de ce projet est d'élaborer des modèles concernant les différentes parties du système (hydrodynamique, électromagnétisme, thermique) suffisamment simple pour qu'ils puissent être intégrés dans un processus de dimensionnement systématique du système couplé. Au niveau des phénomènes électromagnétiques dans la machine électrique les modèles employés sont alors issus de l'intégration des équations de Maxwell au 1<sup>er</sup> ordre (utilisation des théorèmes globaux) ou par résolution du champ en 2D dans l'entrefer par séparation de variables. Ces modèles et leur utilisation ont été décrits dans le chapitre précédent. Cependant ces modèles trouvent leurs limites pour le dimensionnement de certaines turbines hydroliennes à entraînement circonférentiel. Dans ce type de structure la génératrice à aimants permanents est intégrée directement au sein de la carène qui entoure la turbine comme montrée à la figure III.23.

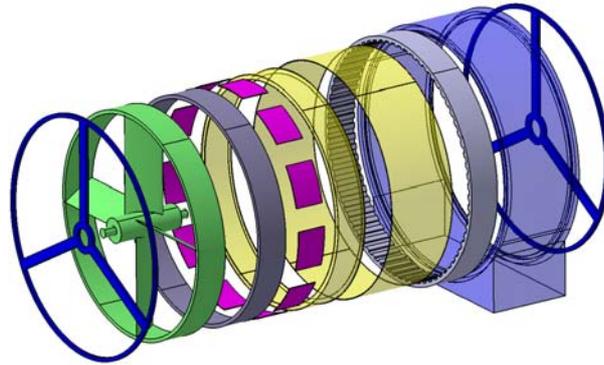


Figure III.23 : schéma de principe (éclaté) d'une hydrolienne à entraînement circconférentiel

L'entrefer entre les parties mobiles est immergé dans l'eau de mer et les parties actives sont isolées alors de l'eau de mer par des couches protectrices de matériau adapté (en jaune sur la figure) ce qui conduit à un grand entrefer mécanique [96,97]. De plus la puissance dans le disque hélice est imposée par la vitesse du courant et la gamme de vitesse par des considérations hydrodynamiques. L'optimisation d'une telle structure conduit alors à avoir des machines très courtes (longueur active (de l'ordre de quelques pourcents du diamètre)). Dans ce type de système les effets de bords dans la 3<sup>ème</sup> dimension ne sont plus négligeables et les hypothèses 2D ne sont plus réalistes.

Ceci nous a conduit à développer un modèle analytique permettant la prise en compte de ces effets 3D sur le flux à vide et la force électromotrice [98]. Ce modèle est basé sur la représentation des aimants par les masses magnétiques et sur le fait de négliger la courbure de la machine. Il est proche de celui développé par Xiong et Nasar pour des machines linéaires [99]. Les pôles sont disposés à plat comme dans les cas traités précédemment. Les culasses magnétiques sont alors considérées comme infinies dans les dimensions ortho radiales et axiales. Un nombre important de pôles rotoriques adjacents sont pris en compte. Ceci permet de calculer l'induction due aux aimants sur la culasse statorique. Il est alors possible d'évaluer la FEM de la machine selon l'expression du flux coupé par les conducteurs.

La figure III.24 présente les résultats obtenus pour une machine dont les principales dimensions sont :

- Epaisseur d'aimant  $e_a=0.020\text{m}$ ,
- Entrefer  $e_e=0.010\text{m}$ ,
- Longueur axiale  $L=0.030\text{m}$ ,
- Diamètre  $D=0.740\text{m}$ ,
- Nombre de paires de pôles  $p=20$ ,
- Rapport de la largeur d'aimant sur l'arc polaire  $\beta=0.71$
- Nombre de conducteur par encoche et par phase  $N_{cep}=1$ .
- Nombre d'encoche par pole et par phase  $N_{ep}=1$

Quatre méthodes de calcul sont alors comparées : le calcul analytique 2D par séparation de variables, le calcul numérique 2D par Différences finies, le calcul numérique par éléments finis 3D et le modèle analytique 3D. Les résultats montrent qu'un tel modèle analytique permet de prendre en compte les effets d'extrémité 3D.

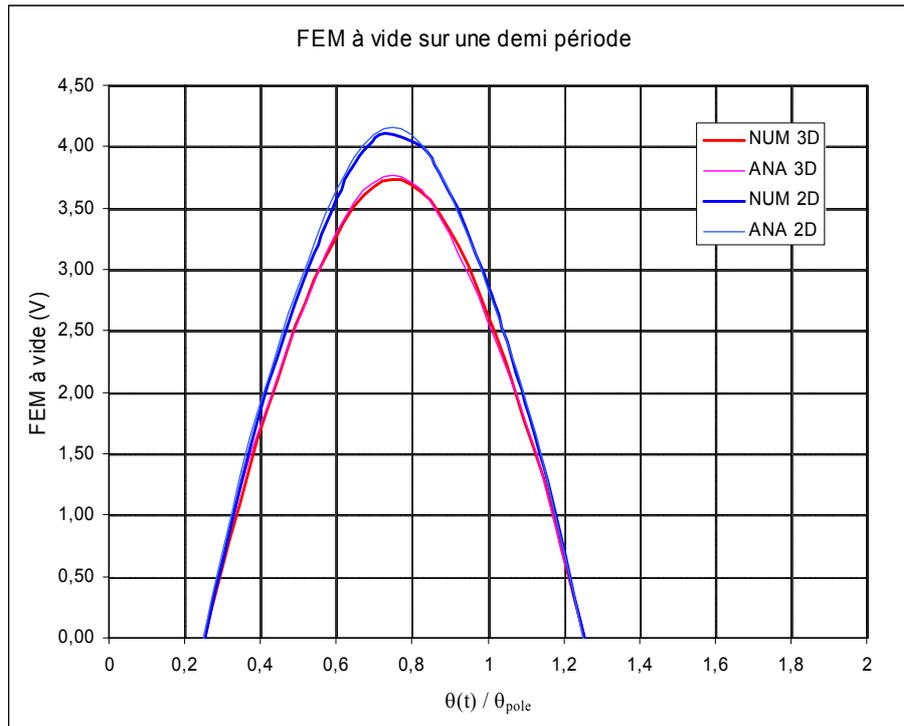


Figure III.24 : Force électromotrice (1/2 période) de la machine

#### 4.6 Exemple de calcul à partir de la représentation des sources par des courants : calcul du champ dans le bobinage supraconducteur d'un propulseur MHD de navire.

Cet exemple concerne l'étude d'une tuyère magnétohydrodynamique pouvant être utilisée pour la propulsion d'un navire. Cette étude a été menée en partie au cours du travail de Master Recherche de F. Quénéhervé (INPT-ENSEEIH 2007) que j'ai encadré [100,101]. Le système étudié consiste en une tuyère disposée sous la coque d'un navire dans laquelle sont placés des sources de champs (électrique et magnétique). Les faces longitudinales de la tuyère supportent 2 électrodes (en rouge sur la figure III.25) portées à des potentiels différents (sur 2 faces) et des bobinages constitués de rubans supraconducteurs à haute température (HTc). Les électrodes sont distantes de  $l_e$ , hauteur que l'on qualifie par abus de langage d'entrefer électrique. Les nappes de matériau supraconducteur, (représentées en bleu) viennent recouvrir les électrodes afin de générer une induction magnétique qui leur est parallèle. La largeur de ces nappes ainsi que du conduit est baptisée entrefer magnétique,  $l_b$ . La longueur des nappes, des électrodes ainsi que du conduit MHD est notée  $L_{mhd}$ . Ce système est capable d'exercer une poussée par le biais de force de Laplace et de propulser un navire [100-105].

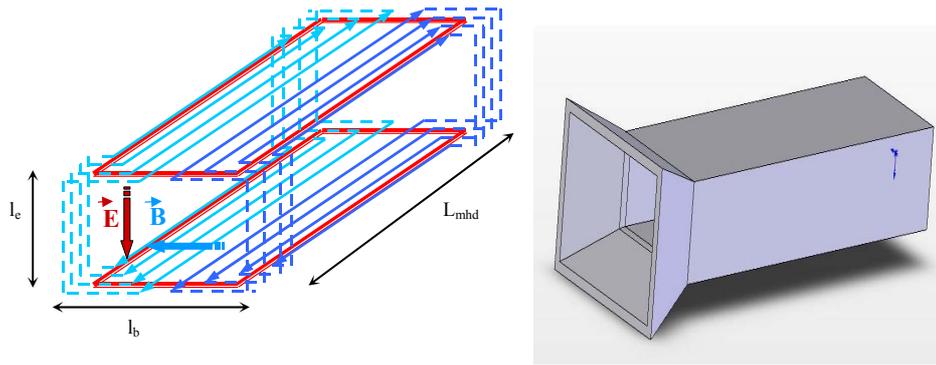


Figure III.25 : Emplacement des sources de champ et géométrie du conduit

Dans le cas d'un navire, il est réaliste de considérer que la vitesse de l'écoulement n'a que très peu d'influence sur le champ magnétique. Nous avons privilégié afin de pouvoir calculer les performances du propulseur un calcul de l'induction en magnétostatique au sein de la tuyère.

L'approche analytique développée ci-après est issue de l'intégration de la formule de Biot et Savart. Dans le cas d'une distribution surfacique de courant sur une surface  $S$  (cas de nappes constituées de rubans de supraconducteur), la loi de Biot et Savart établit en effet l'expression du champ magnétique  $H$  :

$$\vec{H}(P) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \frac{\vec{j}_s \wedge \overrightarrow{MP}}{\|\overrightarrow{MP}\|^3} dS \quad (\text{III.12})$$

Où  $M$  est le centre de la surface élémentaire  $dS$  de la nappe et  $P$  le point de calcul  
Le potentiel vecteur  $A$  au  $P$  s'écrit quant à lui :

$$\vec{A}(P) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_S \frac{\vec{j}_s}{\|\overrightarrow{MP}\|} dS \quad (\text{III.13})$$

L'intégration de l'équation précédente permet alors assez facilement d'exprimer analytiquement en 2D [85] les composantes de l'induction magnétique entre les 2 nappes de conducteurs suivant les conventions de la figure III.26. Ces expressions de l'induction sont données à l'annexe 3.

A titre d'exemple la figure III.26 présente l'induction selon  $z$  (composante utile) pour un conduit de dimensions  $l_e = 5 \text{ m}$  et  $l_b = 3 \text{ m}$ . Il est à noter que ce calcul permet d'estimer les niveaux d'induction présents sur les conducteurs et de les comparer aux champs critiques en fonction de la température et de la densité de courant.

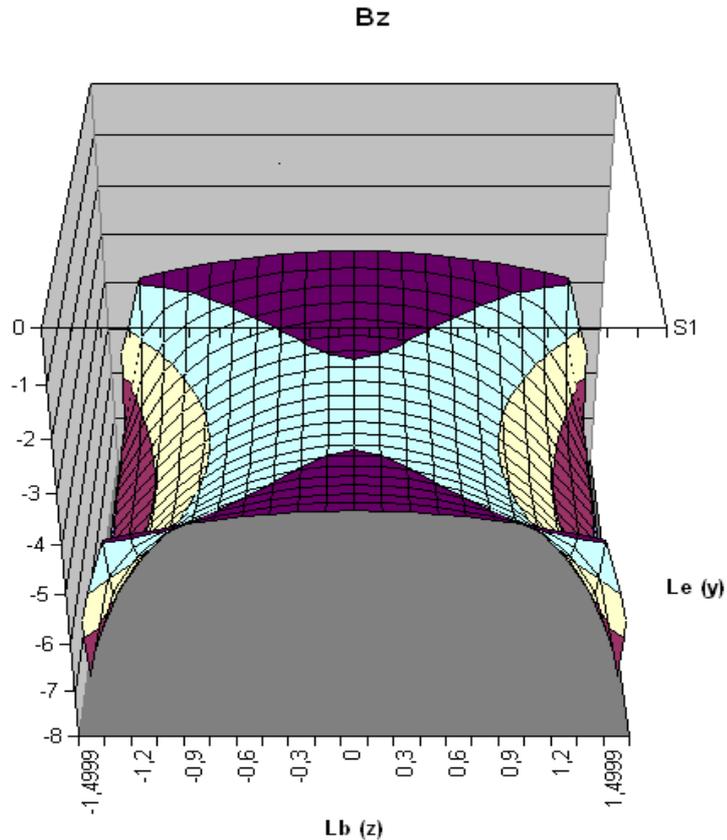


Figure III.26 : Evolution de la composante axiale ( $B_z$ ) l'induction magnétique dans le plan ( $y, z$ ) normal au conduit MHD pour  $l_e = 5$  m et  $l_b = 3$  m.

Ce modèle est couplé à un modèle de calcul du champ électrique entre les électrodes utilisant des transformations conformes [85] et à un modèle hydrodynamique de la tuyère et de la résistance à l'avancement du navire. La mise en œuvre de ces modèles dans un algorithme d'optimisation non linéaire avec contraintes permet alors de dimensionner de manière optimale un propulseur pour un cahier des charges de navire donné.

A titre d'exemple nous présentons les résultats de dimensionnement établis à partir d'un cahier des charges réaliste de navire. Ce cahier des charges est celui d'un navire de type « Small Waterplane Area Twin Hull » ou SWATH. Le SWATH est un catamaran dont les flotteurs sont immergés et reliés à la plate-forme centrale par des jambes fines, ce qui permet de découpler les mouvements du navire de ceux de la houle. On peut imaginer un propulseur MHD en lieu et place de chaque flotteur Ce type de navire et le cahier des charges de l'étude est présenté à la figure III.28.



	<i>Navire SWATH</i>
Déplacement	2100 t
Longueur	79 m
Vitesse maximale	21 nds
Puissance propulsive	5 364 kW

Figure III.28 : Illustration et cahier des charges d'un projet de navire concept SWATH militaire (d'après Cols Bleus n° 2727 du 24/12/04)

Les résultats obtenus sont synthétisés à la table III.1 et montrent que l'intégration d'un tel système dans des navires modernes même s'il n'est pas encore

concurrentiel avec les propulsions classiques, est de plus en plus envisageable pour certaines applications.

Entrefer électrique	$I_e$	2,99	m
Entrefer magnétique	$I_b$	4,20	m
longueur tuyère	$L_{mhd}$	20	m
Volume propulseur	$V_{mhd}$	251	m <sup>3</sup>
diamètre hydraulique tuyère	$D_h$	3,49	m
Périmètre mouillé	$P_m$	14,37	m
Section tuyère	$S$	12,5	m <sup>2</sup>
Puissance propulsive (2 tuyeres)	$P_{prop}$	5364	kW
Puissance électrique consommée	$P_t$	12833	kW
Rendement global	$\eta$	<b>40,70</b>	%
Epaisseur supraconducteurs	$e$	0,21	m
Induction magnétique moyenne	$B$	<b>6,15</b>	T
DDP électrodes	$\Delta V$	358,29	V
Champ électrique moyen	$E_{moy}$	116,86	V/m
densité de courant	$J$	207,46	A/m <sup>2</sup>
Surface électrodes	$S_e$	8,40E+01	m <sup>2</sup>
Intensité du courant	$I$	1,64E+04	A

Table III.1 : Résultat de dimensionnement d'un propulseur pour un navire de type SWATH

## 5 Calcul des forces magnétiques dans des systèmes magnéto mécaniques passifs à aimants.

### 5.1 Généralités

Les études présentées ici ont été menées lors de mon passage au LEMB (IUT de Brest) pendant la période 1997-2002. Durant cette période, bénéficiant de l'expérience du Pr. Lemarquand sur ces systèmes, j'ai pu mettre en œuvre des modèles de systèmes magnéto mécaniques à aimants et optimiser des structures de systèmes magnéto mécaniques à aimants. Ces systèmes présentent un certain nombre de propriétés intéressantes pour des applications particulières. Elles permettent de transmettre des couples ou des forces sans contact et avec des pertes réduites (Les pertes sont essentiellement des pertes par courant de Foucault dans les matériaux conducteurs soumis à une variation du champ créé par les parties du système). En cas de surcharge elles peuvent également décrocher sans endommager le système et assurer ainsi une fonction de type limiteur de couple ou de force. Ces dispositifs sont employés pour des applications critiques comme le nucléaire, le médical ou l'agroalimentaire afin de pouvoir transmettre des efforts sans rupture d'une barrière d'isolement [18,106,107].

Les dispositifs que nous avons étudiés sont des dispositifs sans fer d'accouplements et d'engrenages magnétiques, qui présentent de très faibles inerties et peuvent être particulièrement intéressantes en terme de performances si des structures d'aimantation particulières sont employées [108-114]. Ces dispositifs sont constitués d'aimants permanents placés sur 2 parties mobiles. Une de ces parties mobiles (menée) est alors entraînée par l'autre (partie menante) par le biais des forces qui s'exercent entre les

aimants. Dans le cas où ces systèmes sont tournants et coaxiaux on parle d'accouplement sinon on parle d'engrenages.

A titre d'exemple, la figure III.29 présente une vue de principe d'un accouplement à entrefer radial et d'un accouplement à entrefer axial.

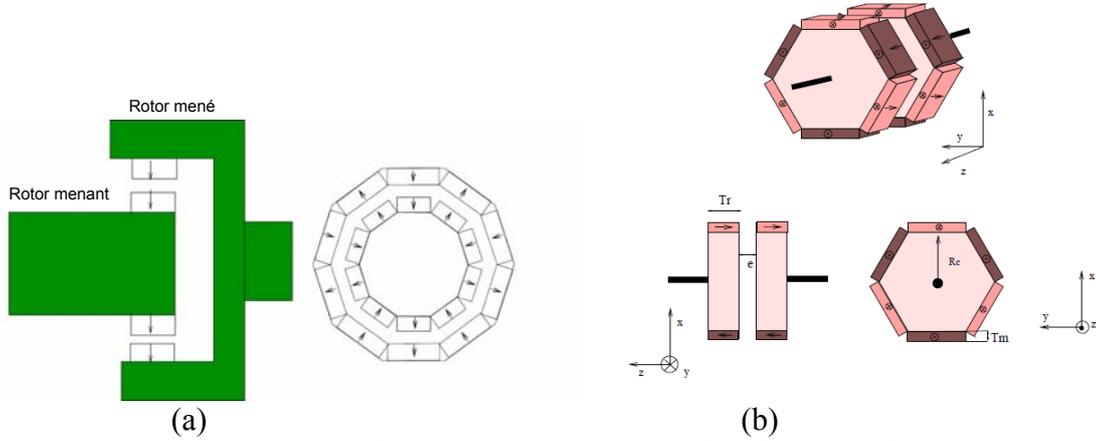


Figure III.29 principe d'un accouplement à entrefer radial (a) et axial (b)

Afin de pouvoir calculer les performances de ces systèmes il est possible de calculer les forces magnétiques s'exerçant entre les aimants de la structure. Ainsi pour un accouplement si l'on peut calculer l'ensemble des forces s'exerçant entre les aimants des deux parties mobiles, il est aisé de calculer couples et raideurs en sommant les contributions dues à chacune de ces forces élémentaires pour chacune des positions relatives des 2 rotors.

Il est à noter que ce calcul est la plupart du temps tridimensionnel. Il est alors possible d'utiliser des méthodes de type éléments finis 3D (ou éventuellement 2D) mais l'utilisation de ces méthodes du fait de leur lourdeur semble inapproprié à un dimensionnement systématique. Afin de disposer d'un outil rapide capable d'être intégré dans une procédure de dimensionnement systématique (balayage des paramètres ou insertion dans un algorithme d'optimisation non linéaire avec contraintes), nous avons choisi une voie analytique ou semi analytique basée sur la représentation des aimants par les masses magnétiques.

## 5.2 Principe du calcul des forces

Si nous considérons 2 aimants parallélépipèdes représentés par des masses magnétiques tels que présentés à la figure III.30, il est possible grâce aux expressions (III.9) et (III.10) d'exprimer le champ  $H_1$  créé par le premier aimant (noté 1) sur le second (noté 2). La force exercée par l'aimant 1 sur l'aimant 2 peut alors être exprimée comme les forces s'exerçant sur les plans chargés de l'aimant 2 (de magnétisation  $M$ ) dues au champ créé par l'aimant 1 :

$$\vec{F} = \iint_{S_{2+}} M \cdot \vec{H}_1 dS_{2+} - \iint_{S_{2-}} M \cdot \vec{H}_1 dS_{2-} \quad (III.14)$$

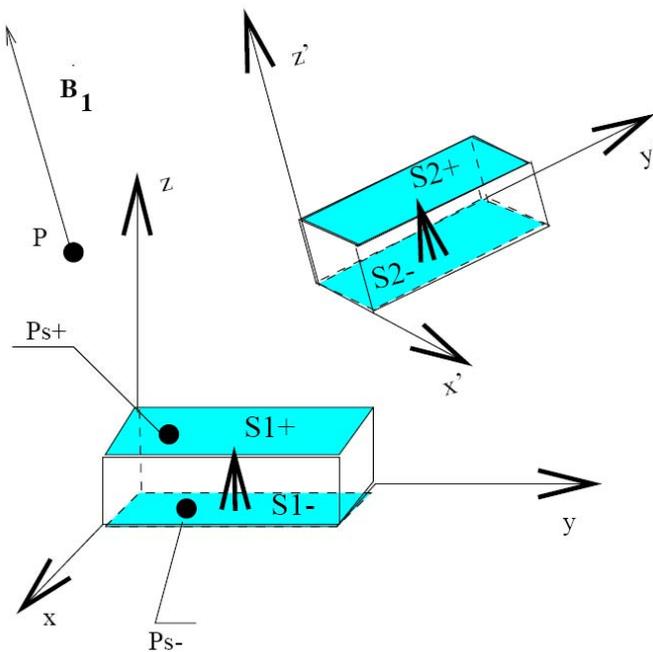


Figure III.30 : 2 aimants en configuration quelconque

### 5.3 Configurations particulières

Dans la configuration particulière que l'on rencontre en général dans les structures à entrefer radial et qui est décrite à la figure III.35, quatre arêtes de chaque aimant demeurent parallèles. Il est alors possible de déterminer analytiquement deux des composantes de la force d'interaction entre 2 aimants [115,116]. Les composantes selon z et y notés sur la figure  $F_z$  et  $F_y$  peuvent ainsi être calculés directement à partir de la position relative des aimants et de l'angle  $\theta$  [115,116]. Il est à noter que des expressions analytiques peuvent également être déduites, dans certaines configurations, en exprimant l'énergie d'interaction entre les aimant [117].

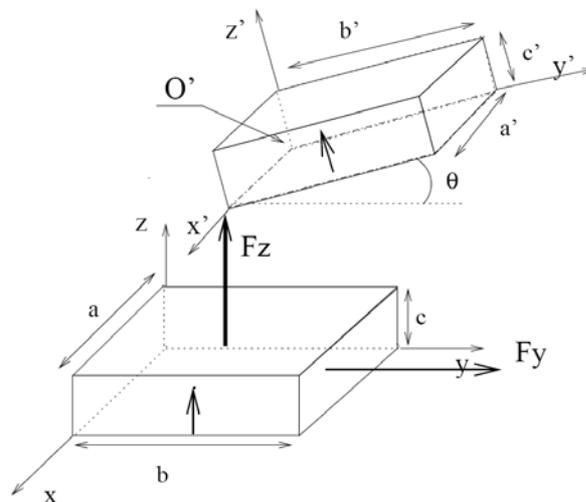


Figure III.31 : Configuration rencontrée dans les structures à entrefer cylindrique

Il est à noter que, dans ce cas, la force selon l'axe de rotation  $x$ ,  $F_x$ , n'avait pas à ma connaissance à l'époque de nos travaux d'expression analytique connue. Cependant cette composante qui est nécessaire à l'évaluation de la stabilité axiale des systèmes à entrefer radial peut être calculée par une méthode de quadrature numérique comme la méthode de Gauss et Labotto décrite par Patterson [91,92] identique à celle utilisée au paragraphe 4.1 (bibliothèque NAG). On aboutit alors comme au paragraphe 4.1 à une méthode semi analytique de calcul.

Une autre configuration intéressante est celle rencontrée dans les structures à entrefer axial où les plans des 2 aimants normaux à la magnétisation restent parallèles. Cette configuration est décrite à la figure III.32.

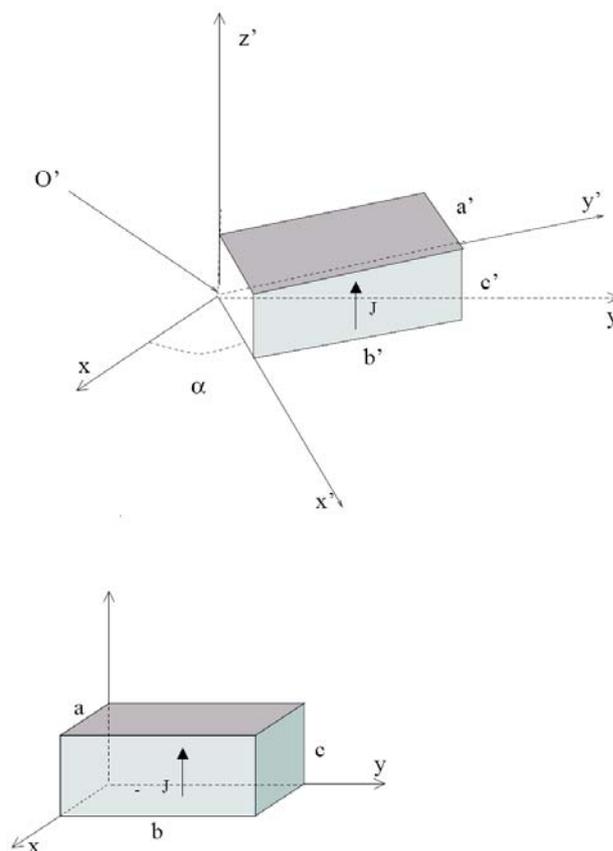


Figure III.32 : Configuration rencontrées dans des systèmes à entrefer axial.

Dans cette configuration il n'existait pas, à notre connaissance à l'époque de ces travaux, d'expression analytique des composantes des forces s'exerçant entre les 2 aimants. Il est néanmoins possible comme dans le cas précédent pour la force axiale de calculer numériquement l'intégrale double de l'équation (III.14).

Il est à noter que cette méthode semi analytique peut être étendue à d'autres formes d'aimants : aimants cylindriques tels que représentés à la partie gauche de la figure III.33 ou bien des aimants de formes variées. A titre d'exemple la figure III.33 présente également des aimants à forme de tuile. Dans le cas où la divergence de la magnétisation est non nulle il est nécessaire de prendre en compte des charges volumiques selon l'équation (III.3).

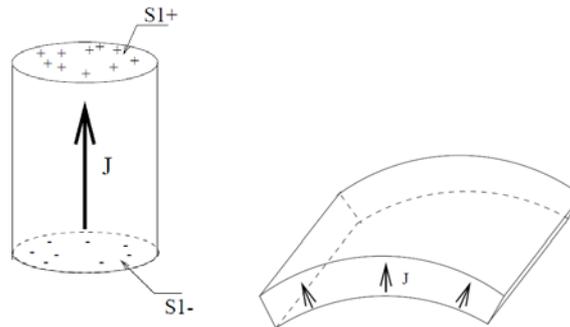


Figure III.33 : différentes formes d'aimants

Il est également à noter qu'un aimant parallélépipède qui est magnétisé dans une direction non conventionnelle différente de la direction présentée peut être considéré comme la superposition de plusieurs aimants classiquement magnétisés selon un de leurs axes. A titre d'exemple la figure III.34 présente l'équivalent d'un aimant à magnétisation inclinée qui peut être vu comme la superposition de 2 aimants.

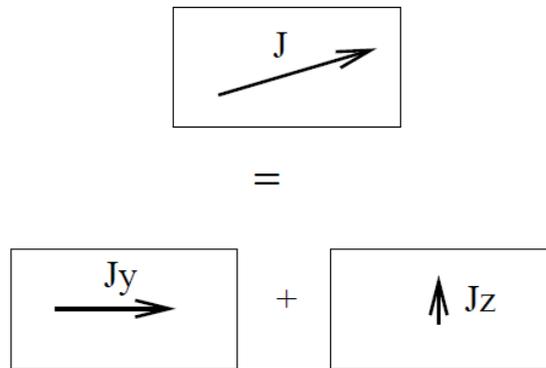


Figure III.34 : représentation d'un aimant à magnétisation inclinée par superposition de 2 aimants magnétisés classiquement

Le calcul de la force d'interaction entre 2 aimants inclinés peut alors être vu comme la superposition de 4 interactions entre les aimants magnétisés de manière élémentaire ( $J_y$  et  $J_z$ ).

#### 5.4 Validation numérique des méthodes sur des cas tests.

Afin de valider les méthodes analytiques et semi analytiques nous allons comparer deux cas de test mettant en jeu ces deux méthodes. Le premier concerne une configuration du type de la figure III.31 et est présenté à la figure III.35.

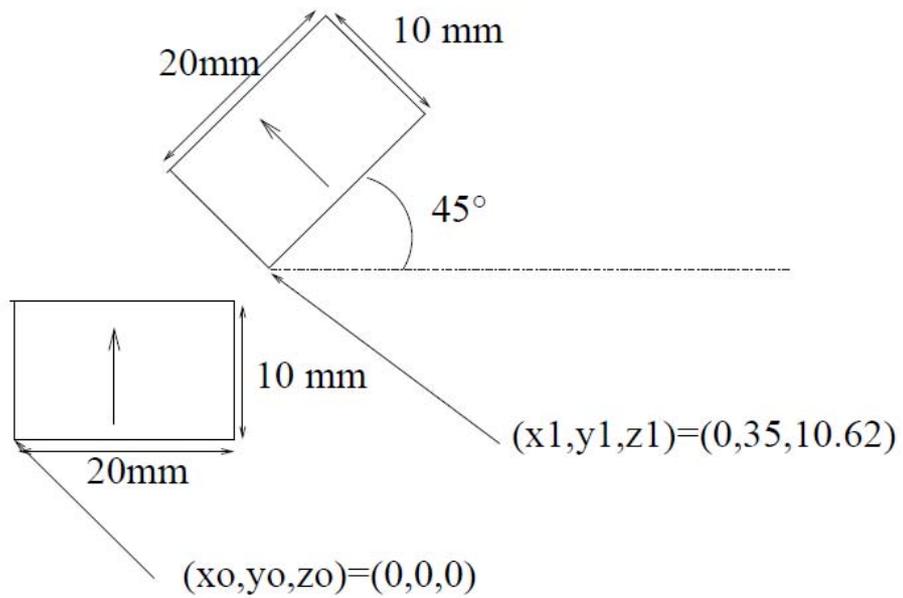


Figure III.35 : Cas test pour la 1<sup>ère</sup> configuration (dimensions en mm).

La force globale s'exerçant entre les 2 aimants est calculée pour cette configuration test par la méthode analytique et par un calcul par éléments finis 2D en magnétostatique pour différentes valeurs de longueur axiale des 2 aimants ( $a=a'$ ).

Les résultats de ces calculs sont présentés à la figure III.36. Pour des longueurs importantes, l'écart relatif entre les 2 méthodes diminue. Pour des valeurs faibles, ( $a=a' < 100$  mm) l'écart relatif est important ce qui confirme l'intérêt de l'utilisation d'une méthode de calcul 3D lorsque les dimensions des aimants dans les trois directions sont du même ordre. On constate également que l'écart reste à peu près constant en valeur absolue ce qui confirme que l'écart entre la méthode numérique 2D et analytique 3D réside dans la prise en compte d'effets d'extrémités à chaque bout des aimants.

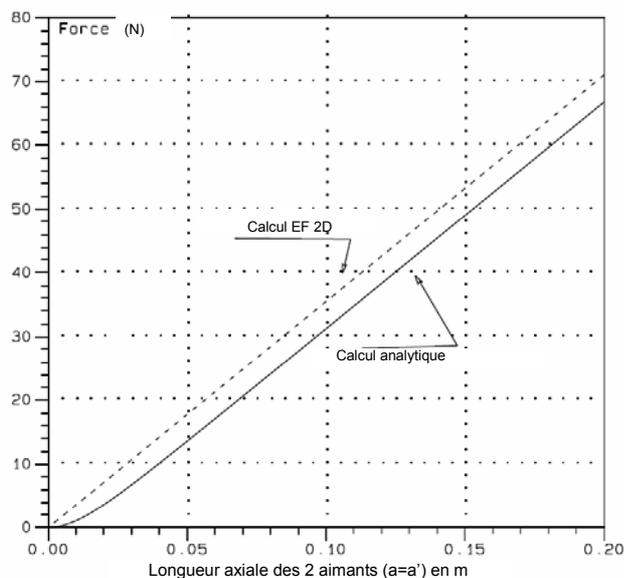


Figure III.36 : Force en fonction de  $a=a'$  pour le 1<sup>er</sup> cas test.

Nous présentons également un cas test concernant une configuration de type à entrefer axial. Ce cas test est présenté à la figure III.37 et est un cas qui nécessite l'utilisation d'un calcul 3D. Les forces s'exerçant entre les deux aimants sont calculées selon la méthode des éléments finis nodaux 3D en magnéto-statique avec deux formulations différentes (potentiel vecteur et scalaire) et plusieurs densités de maillage. Les forces en numérique sont alors calculées grâce à la méthode du tenseur de Maxwell. Ces résultats numériques sont comparés aux résultats semi analytiques issus de la représentation des aimants par des masses magnétiques (Table III.2). On peut tout d'abord constater qu'il faut utiliser des maillages denses une formulation adaptée pour respecter approximativement le principe d'action réaction. L'usage inapproprié d'un code par éléments finis peut ainsi conduire à des résultats aberrants. On constate également que la méthode semi analytique donne des résultats cohérents d'une part avec le principe d'action réaction, et d'autre part avec les valeurs obtenues avec les plus grandes densités de maillage. Elle apparaît donc comme tout à fait adaptée au traitement de ce type de problème 3D.

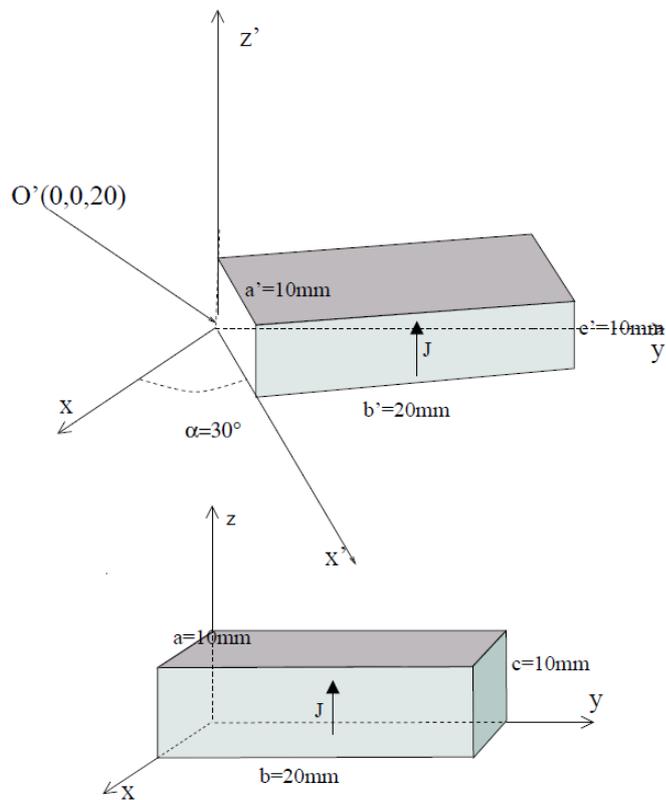


Figure III.37 : 2<sup>ème</sup> cas test (configuration à entrefer axial)

Cas	Nombre de nœuds du maillage	Force sur l'aimant 1 (Fx,Fy,Fz) N	Force sur l'aimant 2 (Fx,Fy,Fz) N
EF 3D potentiel scalaire			
	2060	-1.8, 0.6, 3.3	3.4, -3.0, -3.1
	5048	-1.9, 0.2, 3.6	2.1, 0.1, -2.9
	14441	-2.2, 0.4, 3.8	2.5, 0.1, -3.3
	54130	-2.6, 0.5, 3.8	2.1, -0.04, -3.7
	92255	-2.3, 0.002, 4.1	2.6, -0.04, -3.6
EF 3D potentiel vecteur			
	54130	-2.5, 0.13, 4.0	2.4, -0.2, -4.4
Calcul semi analytique			
		-2.5, 0.063, 4.15	2.5, -0.063, -4.15

Table III.2 : Résultats de calcul cas sur le 2<sup>ème</sup> cas test.

### 5.5 Exemples de calculs d'accouplements et d'engrenages magnétiques.

Afin d'illustrer le principe du calcul des performances de systèmes magnétomécaniques nous présentons ici le calcul du couple en fonction de la position relative des 2 rotors d'un accouplement à aimants axiaux à entrefer axial plan du type de celui de la figure III.29-b. Les caractéristiques de cet accouplement sont les suivantes :

- Rayon intérieur des aimants ( $R_c$  sur la figure III.29-b) : 90mm
- Epaisseur d'aimant ( $T_m$  sur la figure III.29-b) : 10mm
- Epaisseur axiale des rotors ( $T_r$  sur la figure III.29-b) : 10mm
- Entrefer ( $e$  sur la figure III.29-b) : 2mm
- Nombre de paires de pôles : 27
- Aimantation des aimants : 1T

Pour chaque position relative des 2 rotors, les forces entre les aimants des 2 parties sont calculées. le couple peut alors être vu comme la somme des forces tangentielles exercées sur les aimants du rotor mené par le rotor menant que multiplie le rayon moyen des aimants du rotor mené .

$$C = \sum_{i \in \text{rotor mené}} \left( \sum_{j \in \text{rotor menant}} F_t(i, j) \cdot r_{\text{rotor mené}} \right) \quad (\text{III.15})$$

La force axiale est la somme des forces axiales exercées sur les aimants du premier rotor par les aimants du second rotor.

La figure III.38 présente le couple et la force axiale exercée par un des rotors sur l'autre en fonction du décalage angulaire entre les rotors.

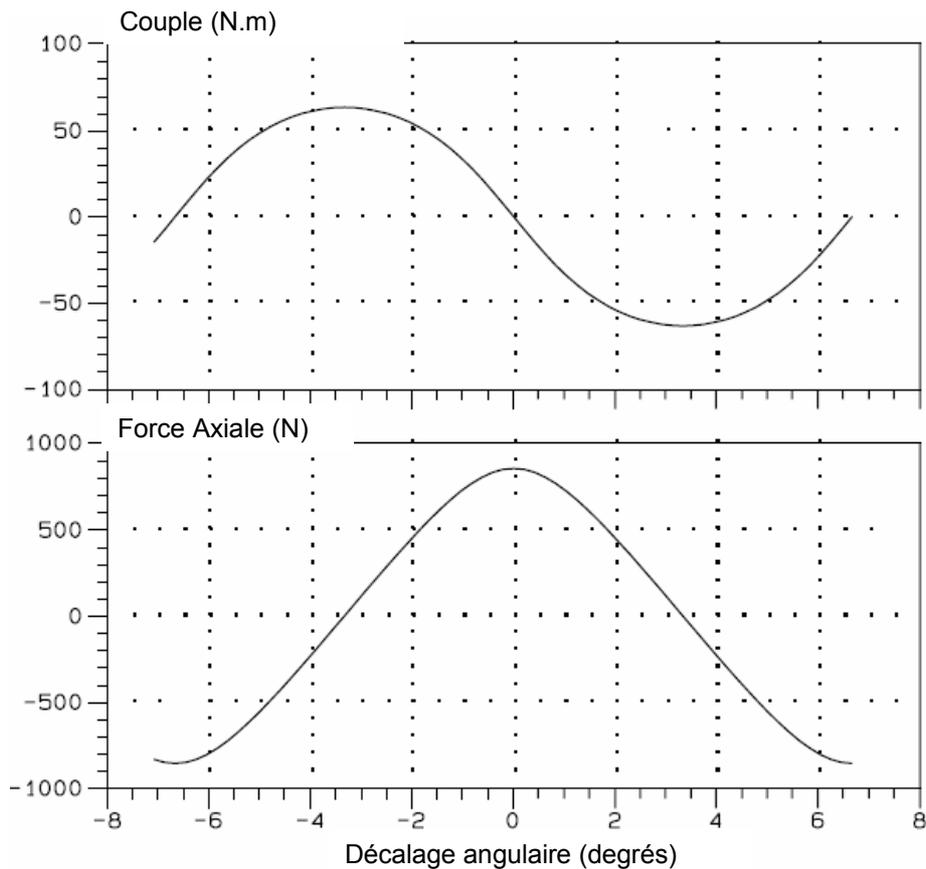


Figure III.38 Couple et force axiale en fonction du décalage angulaire entre les 2 rotors.

Cette illustration permet de mettre en évidence les principaux critères de performances de ce type de système. Le premier paramètre fondamental est le couple de décrochage qui est l'image de la charge pouvant être entraînée par l'accouplement. Les forces et les raideurs entre les 2 parties mobiles vont quand à elles conditionner la stabilité mécanique du système.

Au cours de mon passage au LEMB de 1998 à 2002 puis à l'IRENav, j'ai eu ainsi l'occasion de mettre en œuvre les méthodes de calcul de forces entre aimants décrites dans les paragraphes précédents afin d'optimiser et de mettre en évidence des structures originales de systèmes magnéto mécaniques à aimants permanents. J'ai pu ainsi optimiser par exemple des accouplements magnétiques à entrefer cylindrique associant au sein d'un même pôle des aimants à aimantation tangentielle et radiale. Le modèle de calcul analytique est alors associé à une procédure d'optimisation non linéaire avec contraintes afin de mettre en évidence le jeu de paramètres géométriques le plus adapté [113].

Par une méthode similaire nous avons également étudié des accouplements magnétiques à pôles dissymétriques (figure III.39) pour des applications de type vissage.

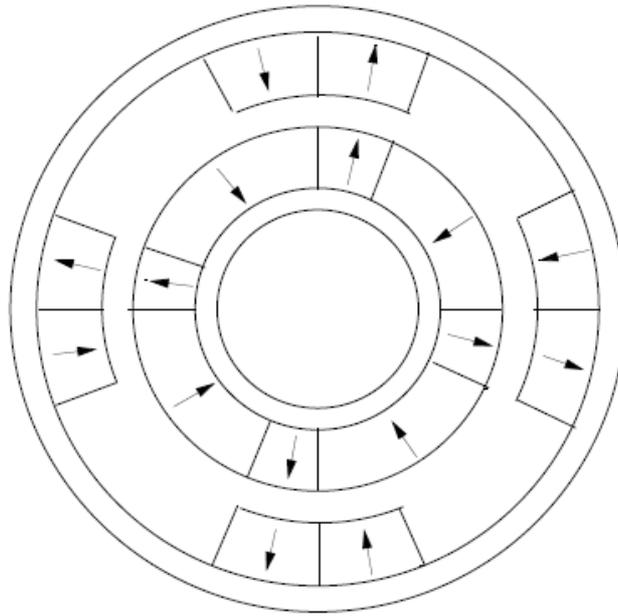


Figure III.39 : Exemple de structure d'accouplement à pôles dissymétriques

Le couple de décrochage de l'accouplement est alors dissymétrique ce qui permet de reconstituer une fonction proche d'un engrenage à cliquet [112]. Nous avons également mis en évidence, en utilisant une méthode d'optimisation non linéaire avec contraintes, que ce type d'accouplement dissymétrique peut également être plus avantageux qu'une structure traditionnelle en terme de minimisation de volumes d'aimants [108].

Nous avons également étudié le comportement de structures à aimants axiaux utilisés pour assurer les fonctions d'engrenages magnétiques [109]. Nous avons pu également mettre en évidence une structure d'accouplement magnétique à aimants axiaux qui permettait de transmettre un couple de manière à ce que les forces globales et les raideurs s'exerçant entre les 2 rotors soient nulles ce qui permet à priori une transmission de la rotation sans transmission des vibrations axiales et radiales (figure III.40) [110].

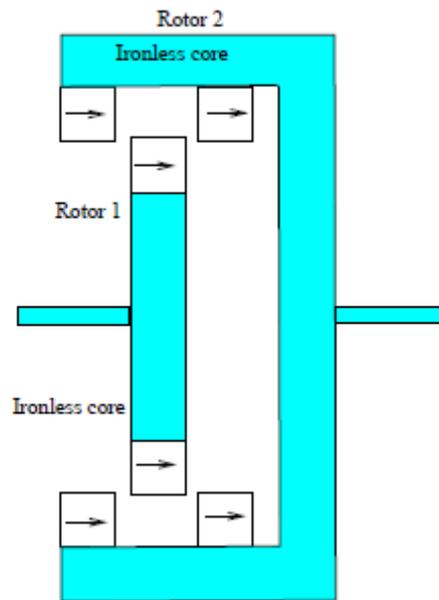


Figure III.40 : Configuration d'accouplement à forces et raideurs nulles

Nous avons également fait une étude très complète d'accouplements radiaux sans fer utilisant des aimantations progressives de type anneaux de Halbach tels que décrits à la figure III.41 [111].

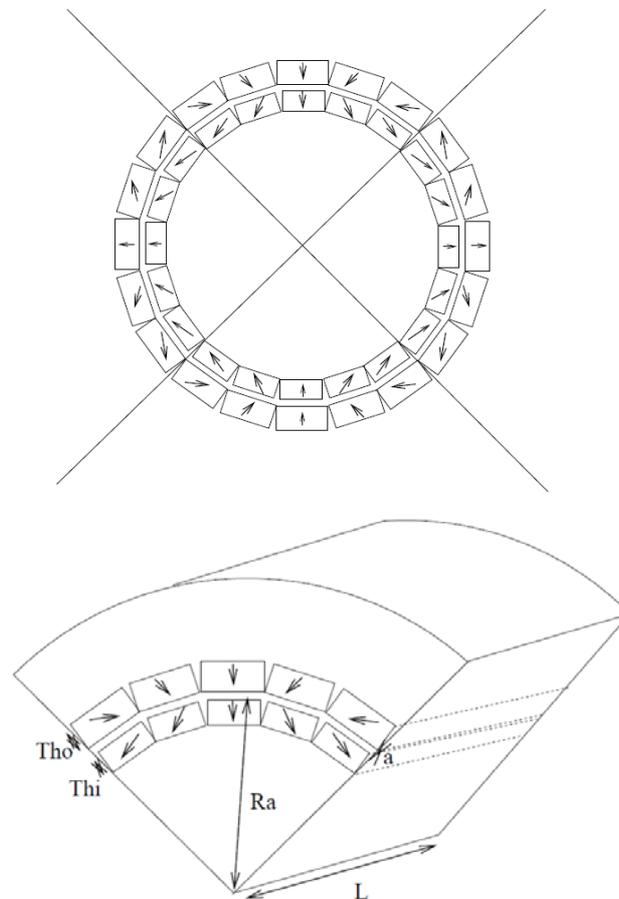


Figure III.41 : accouplements radiaux sans fer utilisant des aimantations progressives

Nous avons alors pu pour cette structure étudier l'influence de toutes les grandeurs de dimensionnement : rayon d'entrefer, épaisseurs d'aimants, nombre de pôles, nombre d'aimants par pôle, longueur axiale sur le couple de décrochage de l'accouplement. Ceci nous a permis de déterminer des règles de dimensionnement de ces structures.

Nous avons aussi étudié un système original assurant à la fois les fonctions d'accouplements et de butée axiale[114]. Cette étude a été en partie menée grâce au travail de stages de 2 étudiants de 3<sup>ème</sup> cycle de l'ENSEM de Casablanca (MM. Jennane et Fadli).

Une structure originale (Figure III.43) de ce type de système a été proposée et optimisée pour un usage naval. Le système permet alors de transmettre le couple à une hélice propulsive et de compenser la poussée exercée sur l'hélice selon le principe présenté à la figure III.42.

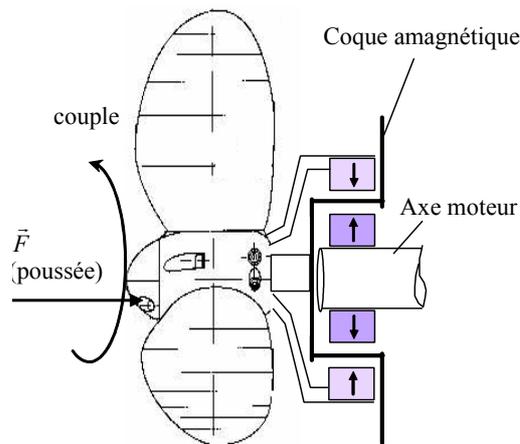


Figure III.42 : Principe du système d'accouplement/palier pour la propulsion navale

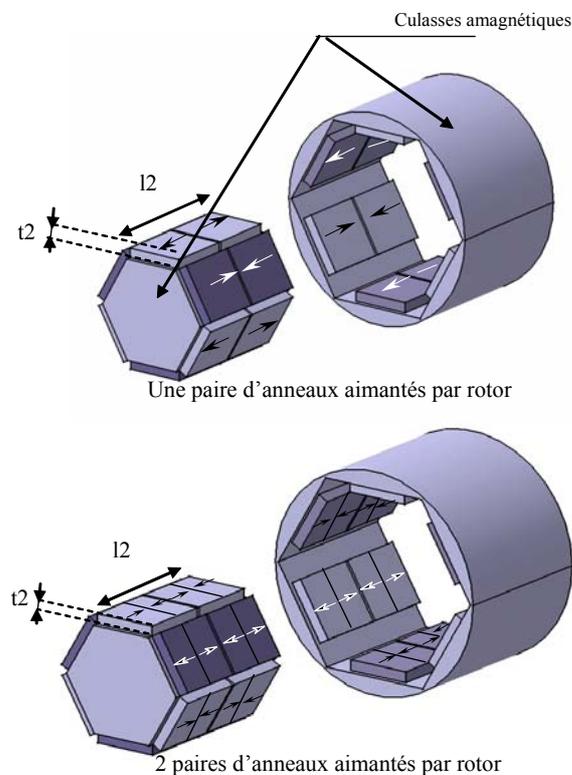


Figure III.43 : Structure originale d'accouplement palier.

Nous avons étudié en particulier une structure sans fer basée sur des anneaux composés d'aimants orientés axialement alternés (figure III.43). Les études menées montrent alors que les structures originales mises en évidence semblent particulièrement pertinentes pour cette application. A titre d'exemple la figure III.44 présente les résultats obtenus en fonction du décalage angulaire entre les 2 rotors et de leur décalage axial. Les résultats sont fournis en terme de force axiale et de couple. La structure étudiée correspond alors aux dimensions suivantes :

- Longueur axiale  $l_1 = l_2 = 4\text{cm}$
- Epaisseur d'aimant  $t_1 = t_2 = 5\text{mm}$
- Rayon moyen d'entrefer  $= 12\text{cm}$
- Aimantation des aimants  $= 1\text{T}$
- Entrefer mécanique  $= 3\text{mm}$
- Nombre de paires de pôles  $= 10$
- 2 paires d'anneaux aimantés par rotor.

Le point de fonctionnement indiqué est le point nominal du propulseur d'un navire solaire expérimental. Une photographie de ce propulseur est présentée à la figure III.45. Ce système développe une poussée de 200N pour un couple de 20 N.m. La figure III.44 montre que l'accouplement étudié est capable de transmettre le couple en compensant la poussée sur l'arbre tout en gardant une marge conséquente pour les phases d'accélération ou de décélération dynamiques du système.

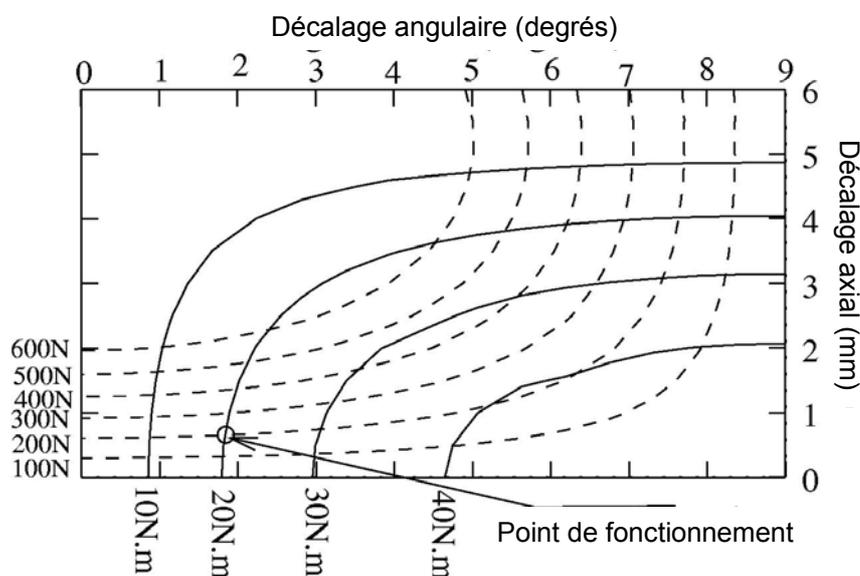


Figure III.44 : Courbes caractéristiques de la fonction accouplement palier d'une structure à 2 paires d'anneaux aimantés/rotor



Figure III.45 : Propulseur étudié

## 6 Conclusion

Les méthodes présentées au cours de ce chapitre reposent sur la représentation des sources de champ que sont les aimants permanents et les bobinages par des sources élémentaires équivalentes qui peuvent être des répartitions de charges magnétiques ou de courants élémentaires (nappes ou courants filaires). Il est possible sous certaines conditions de prendre en compte les culasses ferromagnétiques par la théorie des images. Une fois la répartition de ces charges magnétiques établies, il est alors possible de déterminer analytiquement ou semi analytiquement les champs créés par cette répartition de source. On peut ainsi calculer des grandeurs telles que les forces et les flux. Il est à noter que ce type de calcul ne repose en général pas sur une hypothèse bidimensionnelle et permet donc de prendre en compte des effets 3D. Cette méthode est particulièrement adaptée par sa simplicité de mise en œuvre et sa rapidité à l'intégration de modèles électromagnétiques de systèmes particuliers fonctionnant à basses fréquences dans des procédures de dimensionnement systématique tel que l'optimisation non linéaire sous contraintes, ou à l'intégration dans des modèles multi physiques. Elles permettent ainsi, si les hypothèses nécessaires à ces calculs sont valides, d'explorer en terme de conception et de dimensionnement des systèmes originaux. Ces méthodes peuvent être particulièrement intéressantes lorsque les structures présentent des phénomènes tridimensionnels ou lorsque la modélisation analytique « classique » 2D de la structure est difficile.

## **IV) Perspectives de recherche**

### **1 Bilan des travaux menés sur la modélisation et évolution future de ces travaux.**

Les travaux de recherches que j'ai mené depuis 1993 et les contextes différents de recherche dans lesquels j'ai évolué m'ont conduit à mettre en œuvre des modèles de systèmes électromagnétiques basse fréquence présentant différents niveaux de complexité et de précision.

En effet au début de mes activités de recherche, je me suis essentiellement consacré à la mise en œuvre de modèles numériques au cours de ma thèse de doctorat de l'INP Toulouse au LEEI. Cependant à partir de mon séjour post-doctoral à l'université Laval au Québec, et dans la suite de ma carrière à l'université de Brest, puis à l'Ecole Navale, mes activités se sont tournées progressivement vers la recherche et l'optimisation de concepts non conventionnels de systèmes électromagnétiques de conversion d'énergie dans leur environnement. Pour ce travail de conception et de dimensionnement de systèmes, je me suis rendu compte qu'il était pertinent de disposer de modèles permettant d'une part une évaluation rapide et qualitative des performances des dispositifs et d'autre part la mise en œuvre de procédés de dimensionnement systématique tels que les méthodes d'optimisation. A l'Ecole Navale je me suis aussi intéressé à des modèles de dimensionnement global des systèmes spécifiquement maritimes par une approche multi physique. Les outils numériques (éléments finis ou différences finies 2D ou 3D) permettent certes de calculer avec un même logiciel de manière générique les performances d'un système électromagnétique mais ne sont pas forcément adaptés à des approches qui nécessitent des outils faciles et rapides à mettre en œuvre et une robustesse aux variations paramétriques. Ceci m'a conduit à m'intéresser à des approches analytiques pour la modélisation des systèmes électromagnétiques non conventionnels que nous avons alors choisis d'étudier. Nous avons utilisé différents principes de modélisation qui ont été exposés au cours des deux parties précédentes, en fonction des hypothèses pouvant être mises en œuvre sur les dispositifs étudiés.

Il est à noter que l'utilisation de ces modèles analytiques est totalement complémentaire de l'approche numérique qui permet de valider et de qualifier les domaines de validités des modèles analytiques et aussi d'affiner les dimensionnements dans les dernières étapes.

Mes activités de recherche à l'IRENav me conduisent à m'intéresser de plus en plus à des systèmes où la composante multi disciplinaire est importante que ce soit dans le cadre applicatif des systèmes d'énergie propulsion des navires ou dans le celui des énergies renouvelables marines.

Cette composante conduit à faire des compromis lorsque l'on intègre dans les dimensionnements des systèmes électromécaniques des contraintes et des objectifs liés à d'autres domaines technologiques. Ceci conduit souvent à des solutions en terme d'architecture du système qui sont éloignées des standards. Ces solutions nécessitent si l'on veut qualifier et calculer de manière systématique, des géométries pertinentes pour

des configurations applicatives réalistes, d'adapter, de développer et d'utiliser des modèles dédiés.

## **2 Perspectives sur la conception et la modélisation de systèmes électromagnétiques non conventionnels pour les applications maritimes.**

Il est, en mon sens, possible de développer ainsi des modèles et des environnements de conception dédiés aux systèmes électromagnétiques liés aux applications maritimes. La spécificité de ces dispositifs conduit souvent à s'intéresser à des systèmes non conventionnels. De ce fait il est nécessaire de développer des modèles dédiés permettant l'étude et la recherche de nouveaux concepts.

### ***2.1 Perspective sur l'étude de structures électromagnétiques non conventionnelles pouvant être intégrées avec des systèmes hydrodynamiques pour des applications maritimes.***

L'environnement dans lequel j'exerce mes activités de recherche à l'IRENav est, de par la structure du laboratoire et du groupe de recherche, particulièrement favorable aux activités pluridisciplinaires. Dans le cadre applicatif des systèmes navals ou des systèmes d'extraction d'énergie renouvelables marines nous souhaitons combiner les ressources en hydrodynamique du laboratoire avec celles sur les systèmes électrotechniques par une approche de dimensionnement global et multi physique de ces dispositifs.

#### ***2.1.1 Travaux à venir sur la modélisation et la conception de systèmes machines hélices.***

Pendant les travaux qui ont été initiés au cours de la thèse de L. Drouen qui doit se soutenir avant la fin 2010, un environnement de modélisation et de conception multi physique de machines à aimants à entrefer radial associées à des hélices a été mis en place. Cet environnement logiciel permet de coupler des modèles analytiques ou semi analytiques concernant les phénomènes hydrodynamiques au niveau de l'hélice et de l'entrefer et les phénomènes électromagnétiques et thermiques au sein de la structure de la machine électrique afin d'étudier et dimensionner des systèmes de turbines hydroliennes ou de propulseurs marins. Cette étude a été menée pour des technologies où la machine est en nacelle (POD) et des technologies où les parties actives de la machine occupent la circonférence de l'hélice (système à entraînement circonférentiels ou « Rim Driven »). Le principe d'un système « Rim-Driven » est que l'hélice supporte en sa circonférence une culasse magnétique sur laquelle sont collés des aimants. Cet ensemble constitue le rotor de la machine électrique. La culasse statorique et les bobinages sont inclus dans une tuyère entourant l'hélice. L'entrefer est en général immergé dans de l'eau de mer et isolé des parties actives par des couches d'isolant (résine epoxy par exemple). Le schéma d'un tel système a été donné figure III.23.

Un démonstrateur de ce type de technologie à entraînement circonférentiel pour une application hydrolienne est en cours de fabrication et devrait être mis en test à partir de fin 2010 dans le bassin d'essai d'IFREMER à Boulogne Sur Mer [118]. Ces tests devraient permettre de valider et qualifier la pertinence de la démarche utilisée.

La figure IV.1 et IV.2 présentent une vue de la CAO de cette maquette ainsi que les pâles de la turbine et le rotor. La démarche de dimensionnement global menée sur les

systèmes « Rim Driven » conduit selon les cahiers des charges à des structures électromagnétiques relativement non conventionnelles qui se caractérisent par un grand nombre de pôles une longueur axiale faible et un très grand entrefer magnétique. Ceci nous a conduit à adapter certains modèles analytiques à ces cas particuliers (démarches exposées aux chapitres précédents).



Figure IV.1 : Vue de la CAO du démonstrateur d'hydrolienne RIM-Driven



Figure IV.2 : pales et rotor du démonstrateur RIM-Driven

Dans un contexte hydrolien l'optimisation globale conduit à des structures magnétiques électriquement peu chargées (faible charge linéique) et où les têtes de bobines sont prépondérantes. Dans ce cas on peut conclure que les matériaux actifs (bobinages et aimants) ne sont pas forcément utilisés de manière optimale. Il semble alors pertinent d'étendre cette étude à des topologies non conventionnelles de machines électriques qui permettraient une meilleure utilisation des parties actives. Des travaux préliminaires ont été menés en 2009 dans cette optique dans le cadre du stage de Master Recherche d'un étudiant de l'INPT/ENSEEIH, L. Baldeck [119].

Nous nous sommes alors intéressés à la possibilité d'utiliser des machines où les parties actives ne couvrent pas la totalité de la circonférence (machines par secteur) que ce soit au stator ou au rotor. Dans ce contexte particulier, l'allongement de la machine permet par une diminution de la part relative des têtes de bobines une meilleure utilisation

des matériaux (cuivre, aimants) et une diminution des pertes globales. La figure IV.3 issue de [119] donne une représentation de principe d'une telle machine comprenant quatre secteurs au rotor et deux secteurs au stator. Cette étude a été faite de manière qualitative et a été complétée par des calculs effectués grâce à un code de différences finies 2D en magnéto-statique avec mouvement.

La figure IV.4 présente un exemple de calcul effectué sur une telle machine.

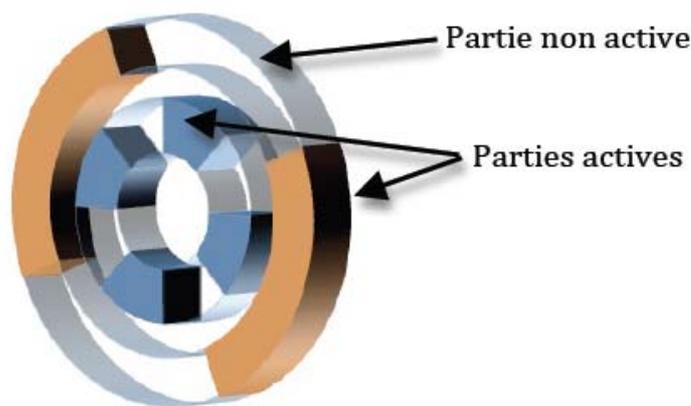


Figure IV.3 : représentation schématique d'une machine « par secteurs »

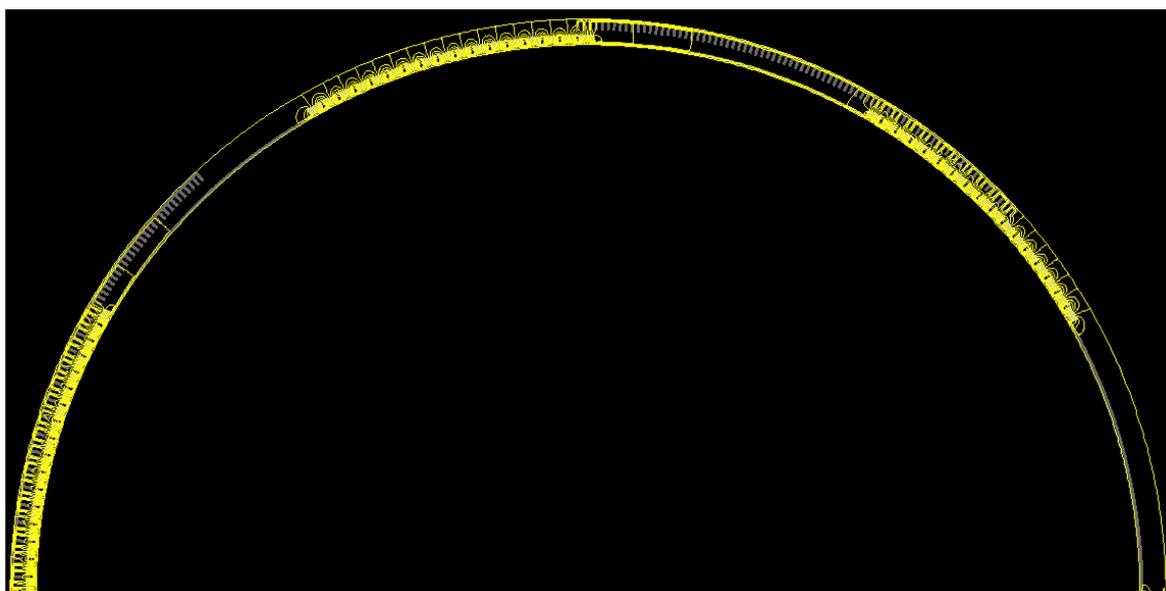


Figure IV.4 : Exemple de calcul par DF 2D du flux à vide d'une machine par secteur [119]

Les résultats de cette étude préliminaire montre que l'utilisation de ce type de machine devrait s'avérer intéressante pour des cahiers des charges de types hydroliens dans l'objectif de minimiser le volume et le coût des parties actives.

Ces premiers travaux restent à affiner. Il faut en effet adapter et utiliser l'environnement de modélisation multiphysique préalablement développé pour pouvoir effectuer une démarche de conception systématique des machines par secteur. L'approche devra alors comprendre le couplage d'un modèle hydrodynamique de l'hélice avec un modèle électromagnétique incluant les effets de bords à l'extrémité des secteurs. Des modèles de la déformation de la structure due aux forces radiales liées à ces structures particulières, ainsi qu'un modèle thermique peuvent également être inclus.

Il est à noter que l'investigation de machines polyphasées par secteur pourrait être une piste intéressante. En effet une structure par secteur permettrait, en plus de mieux « utiliser » les parties actives, de gérer la séparation magnétique des phases du stator ce qui peut être pertinent pour une utilisation simple de ces machines polyphasées. La Figure IV.5 issue de [120] présente un exemple de machine 5 phases par secteur à reluctance variable ou les phases sont magnétiquement séparées.

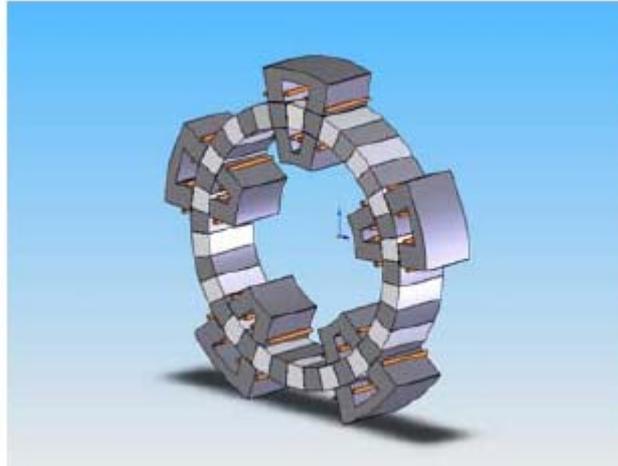


Figure IV.5 Exemple de machine polyphasée à reluctance variable à 5 phases proposée dans [120]

Pour ce type de cahier des charges il peut sembler également intéressant d'étendre l'étude à des structures de machines à entrefer axial comme celle représentée à la figure IV.6 issue de [121], ou à des machines à flux transverses [122, 123, 124] telles que représentées à la figure IV.7 issue de [122] afin de comparer les structures radiales complètes ou par secteur avec ces machines à géométries de flux tridimensionnels. Pour ce type de machines, le développement de modèles dédiés et leur insertion dans l'environnement de conception multi-physique peut également être fait en s'appuyant sur des travaux existants [90,124].

Afin de poursuivre dans cette voie d'étude un étudiant de 3<sup>ème</sup> cycle, M. S. Djebbari, commence sa thèse de doctorat à partir de septembre 2010, avec un financement d'Assistant d'Enseignement et de Recherche de la Marine Nationale. Il est à noter que sur le sujet des machines à flux transverses, il est probablement possible de mettre en place une collaboration sur l'analyse et le dimensionnement de ces systèmes avec le LEEPCI à l'université Laval (M. Dubois) qui est un de nos partenaires historiques.

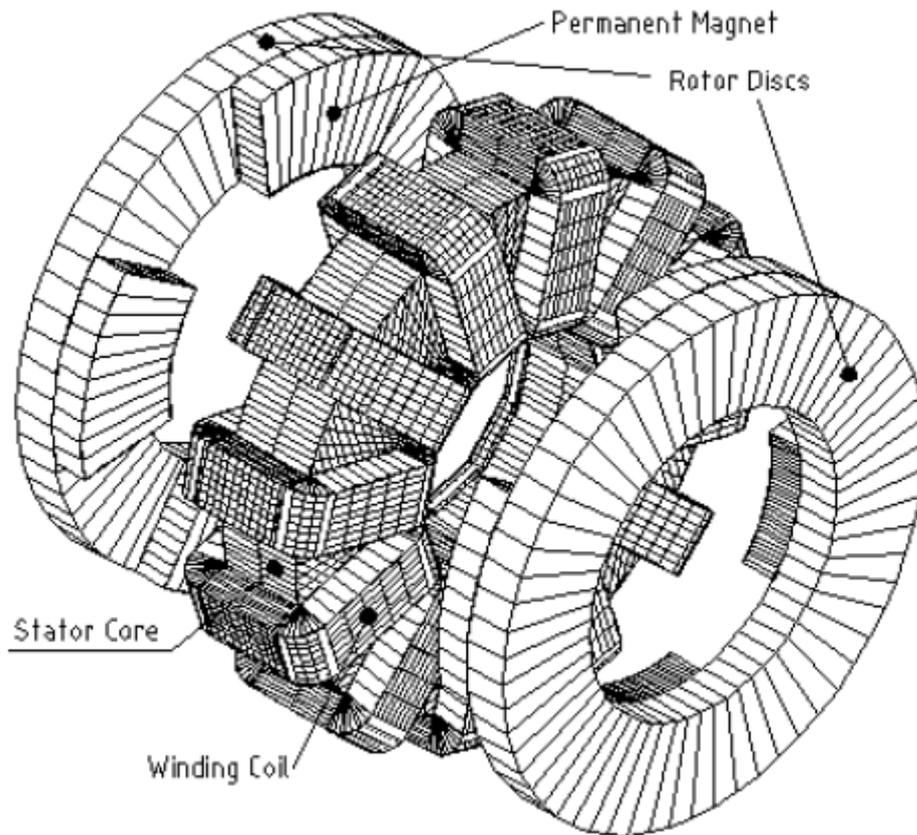


Figure IV.6 exemple de structure de machine à entrefer axial issue de [121]

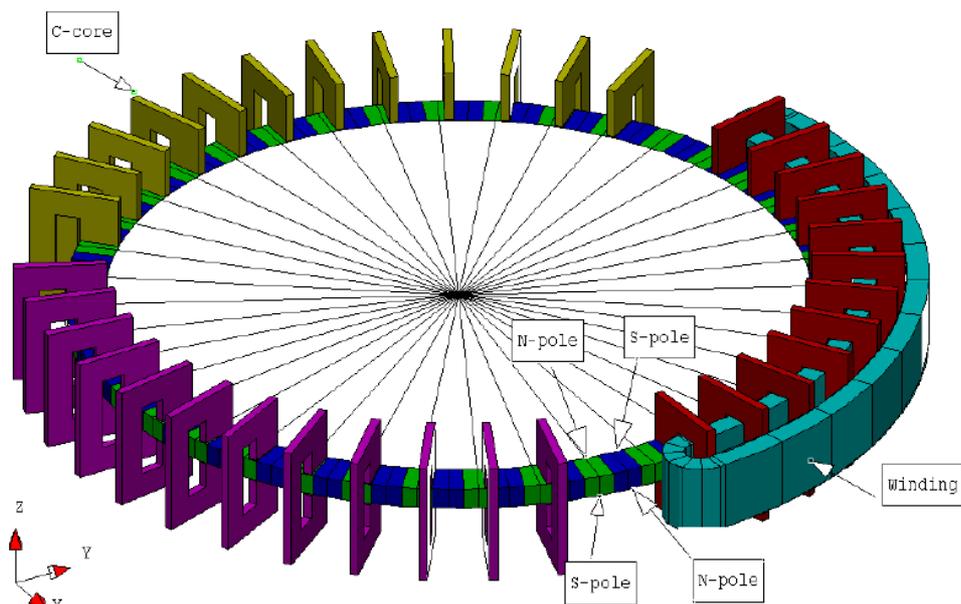


Figure IV.7 exemple de structure de machines à Flux Transverse d'après [122]

### 2.1.2 Poursuite des travaux menés à l'IRENav sur les turbines à axe transverse

Au cours des 3 dernières années, l'IRENav a également travaillé sur la modélisation hydrodynamique de turbines hydroliennes non conventionnelles à axe transverse par rapport au flux principal. Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de Benoît Paillard (bourse de la Région Bretagne depuis octobre 2007), encadré à l'IRENav par F. Hauville et J.A.Astolfi. Cette étude est consacrée à des systèmes dont l'angle de calage

des pâles de la turbine peut varier en fonction de la position du rotor principal (projet SHIVA) dont le principe est illustré à la figure IV.8. Une étude numérique (figure IV.10) et l'élaboration d'outils de modélisation hydrodynamiques basés sur la méthode des tubes de flux a permis d'identifier des cinématiques intéressantes pour l'application [125]. La mise en œuvre de ces cinématiques devrait permettre de pouvoir extraire plus d'énergie que les structures de type Daerius et serait, *a priori*, particulièrement intéressante pour des applications à faible valeur de vitesse de fluide. Une plateforme expérimentale dont une vue de la CAO est présentée à la figure IV.9 est en cours de fabrication. Elle doit permettre de tester tout type de cinématique de pâles et doit être testée en bassin d'essais au cours des prochains mois afin de valider les concepts mis en évidence.

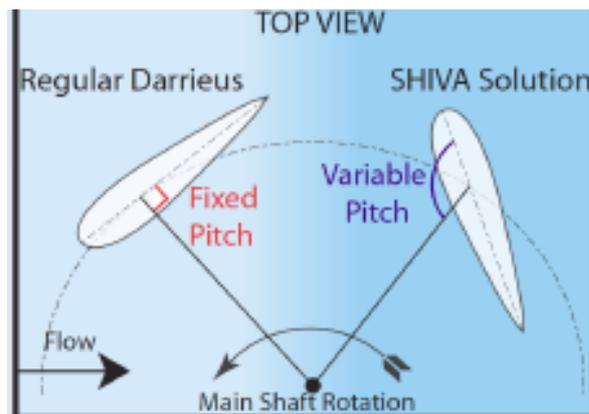


Figure IV.8 principe d'une turbine de type « SHIVA » (doctorat de B. Paillard)

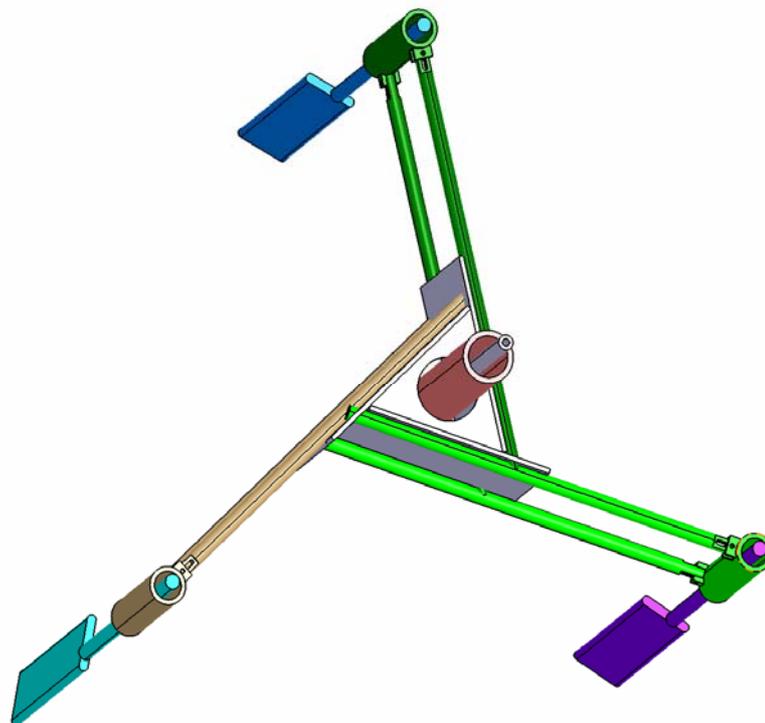


Figure IV.9 : Vue CAO du démonstrateur SHIVA (doctorat de B. Paillard)

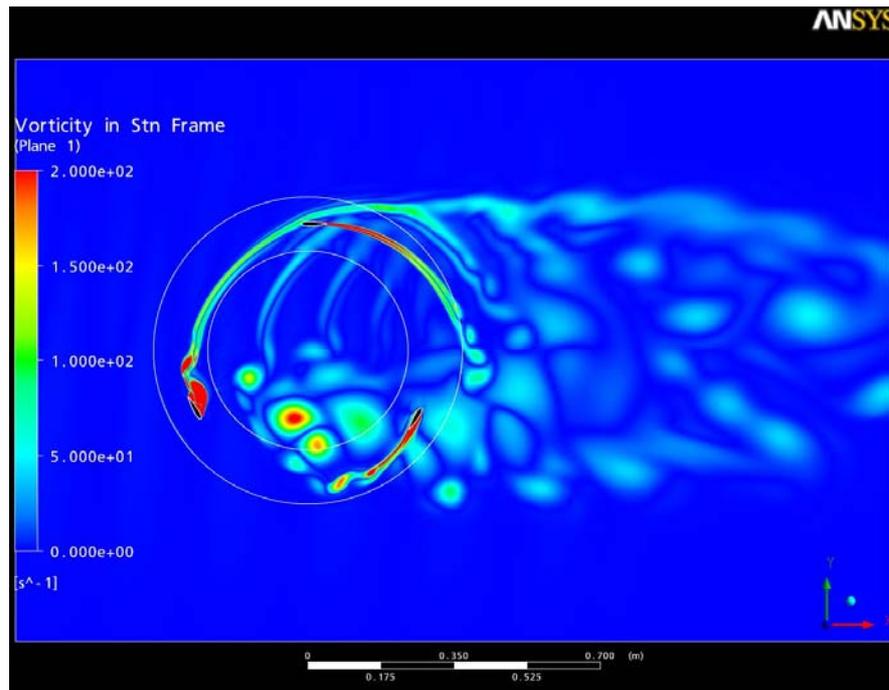


Figure IV.10 : Modélisation hydrodynamique numérique de la turbine SHIVA (doctorat de B. Paillard)

Un deuxième objectif qui fait une suite logique à ces premiers travaux est d'élaborer un système de deuxième génération à partir des résultats des premières études et des essais préliminaires. Ce système intégrerait une architecture électromécanique (moteur/génératrice) et de commande, dédiée à ce système particulier, avec pour objectif une grande fiabilité et une haute performance. Dans ce cadre il est nécessaire de développer des études sur des systèmes basés sur un entraînement direct du système (sans multiplicateur). Des structures de machines particulières peuvent alors être particulièrement pertinentes. En effet les travaux de modélisation hydrodynamiques menés ont montré que le couple mécanique de la génératrice, du fait de sa géométrie particulière, variait fortement au cours de la rotation de la turbine. La aussi des géométries de machine, où la part des parties actives rotor/stator en regard peut varier, peuvent alors permettre d'optimiser la qualité de l'énergie produite. L'intégration de moyens de stockage d'énergie (par exemple basés sur l'utilisation de super capacités) dans la chaîne de conversion d'énergie, au plus proche de la machine, peut elle aussi être une piste intéressante pour optimiser les performances du système car sur un tour l'énergie produite fluctue.

Dans le cadre de cette étude une approche multi physique pour la modélisation d'un tel système à axe transverse est également nécessaire afin de permettre l'optimisation de la conception du système global qui intègre la turbine, la génératrice, son électronique de puissance et sa commande et d'éventuels moyens de stockage d'énergie. Cette approche de conception globale devrait permettre d'augmenter fortement la fiabilité et les performances des systèmes à axe transverse.

### **2.1.3 Perspectives sur l'étude et la modélisation de systèmes électromagnétiques de contrôle d'écoulements**

Augmenter l'efficacité énergétique et donc réduire l'impact écologique d'un navire peut passer par l'augmentation des performances hydrodynamiques. Une des solutions est par exemple de réduire sa traînée de coque en agissant sur la couche limite turbulente en proche paroi. On peut également agir sur l'écoulement à proximité des surfaces des corps

portants du navire, hélices et surfaces de contrôle, afin d'améliorer les performances en termes manoeuvrabilité et d'efficacité.

Il est également envisageable de propulser partiellement ou totalement le navire en fournissant une poussée sur l'écoulement.

De nombreux programmes majeurs s'intéressent à ce type de sujet comme le programme Super Eco Ship au Japon ou des projets financés par le DARPA (US Defense Advanced Research Projects Agency) qui concernent la réduction de traînée par injection de microbulles, de couche d'air et de lubrifiants polymères.

Une autre voie pour réduire la traînée est d'utiliser un système électromagnétique pour exercer des forces locales sur l'écoulement au voisinage de la paroi par un système magnétohydrodynamique. Il pourrait être aussi particulièrement intéressant de contrôler les phénomènes perturbateurs comme la cavitation.

Au niveau de la propulsion navale, l'utilisation de la MHD est pour l'instant limitée par la nécessité de générer des champs magnétiques intenses. Les évolutions récentes des supra-conducteurs Haute Températures laissent espérer des applications industrielles futures [100,101].

Au niveau du contrôle d'écoulement les forces exercées en proche paroi nécessitent a priori moins d'énergie que pour la propulsion. Certains travaux ont déjà été menés sur l'augmentation de la portance par suppression du décollement sur les surfaces portantes ou sur la réduction du bulbe de décollement sur les corps épais [126-128].

Les travaux menés par le LEGI à Grenoble [127] et les travaux de Weier et al. [128] ont montré qu'il était possible de modifier significativement un écoulement grâce à des actionneurs MHD positionnés sur la proche paroi utilisant des aimants permanents terre rare. La figure IV.11 présente trois de ces actionneurs utilisés au cours des travaux de doctorat de Lindquist supervisé par Jean-Paul Thibault au LEGI et lors des travaux de Meier et al. La figure IV.12 montre une visualisation des travaux expérimentaux effectués par Weier et al. où l'on peut constater qu'il est possible de supprimer le décollement sur une plaque plane en exerçant des forces électromagnétiques.

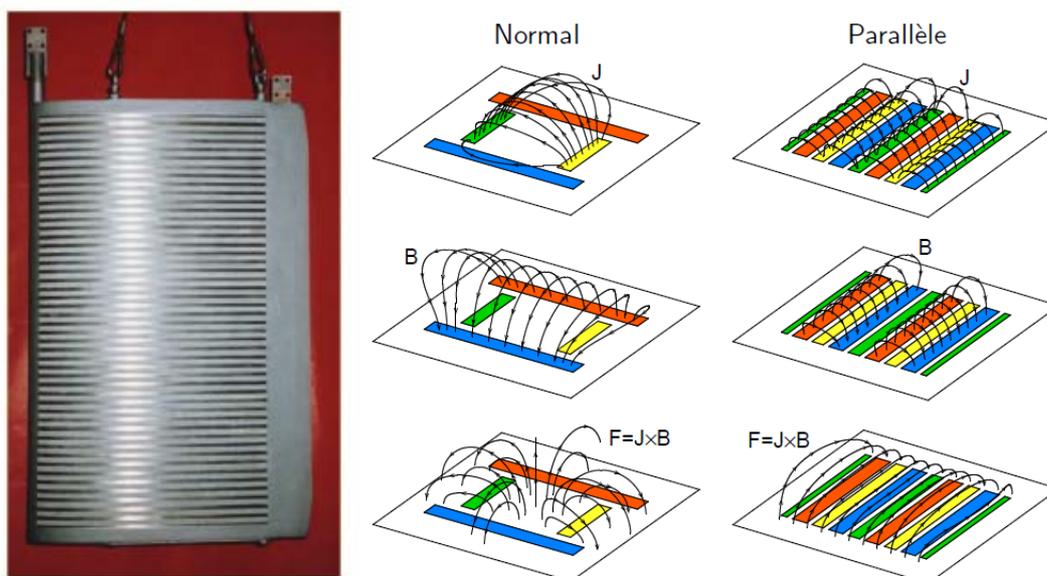


Figure IV.11 : exemples d'actionneurs utilisés pour le contrôle d'écoulement (travaux de Lindquist (à droite) [127] et profil d'aile avec actionneur parallèle de Weier et al. [128] (à gauche))

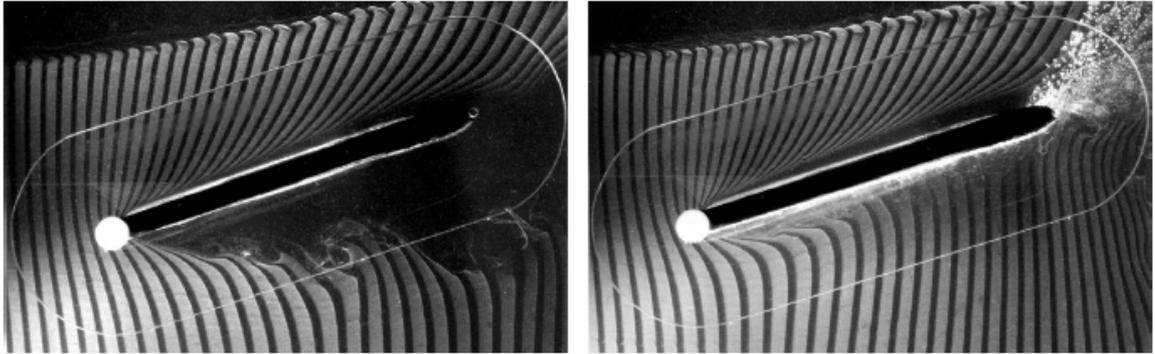


Figure IV.12 : Etude expérimentale de la suppression de la séparation de couche limite par des forces électromagnétiques sur une plaque plane [128]. (à gauche sans forces EM, à droite avec)

A notre connaissance l'idée de contrôler la cavitation n'a pas été explorée jusqu'à maintenant. Ce thème de recherche du contrôle d'écoulement ouvre à mon avis un vaste champ exploratoire pour les années à venir. Au niveau de l'IRENav, nous disposons de compétences en conception et modélisation d'actionneurs électromagnétiques capables de modifier un écoulement. Nous disposons également de compétences importantes et de moyens expérimentaux en hydrodynamique. La conjonction de ces moyens devrait nous permettre de mener des actions sur le sujet du contrôle d'écoulement avec nos collègues hydrodynamiciens du groupe M2EN.

Les travaux que nous pourrions mener pourraient concerner l'étude, la modélisation et la conception optimale d'actionneur électromagnétiques, pour le contrôle d'écoulement par des voies analytiques et numériques. En effet pour obtenir une faisabilité technologique il est à mon avis nécessaire d'optimiser la structure des actionneurs et d'explorer différentes topologies de systèmes permettant d'agir finement sur l'écoulement et sur les phénomènes parasites comme la cavitation en prenant en compte le couplage avec l'écoulement.

Cette thématique peut également être l'occasion de collaborations fructueuses. D'autres laboratoires pourraient être associés à ces actions. Je pense par exemple au LEGI (JP Thibault), ou au L2EP (S. Clenet) et au LML. Cet axe de recherche très amont pourrait progressivement monter en puissance et constituer une action fédératrice au sein du groupe M2EN et au sein des Arts et Métiers Paris-Tech.

## ***2.2 Vers des machines polyphasées pouvant répondre aux exigences particulières de la propulsion navale.***

Nous avons depuis 2002, travaillé sur les machines électriques à aimants permanents polyphasées alimentées par des onduleurs de tension. Ce travail a été mené notamment par le biais de la thèse de F. Scullier co-encadrée avec le L2EP (E. Semail et S. Clenet) sur la conception de ces machines. Ces machines sont particulièrement adaptées au contexte applicatif de la propulsion navale de forte puissance (une machine électrique de propulsion peut atteindre les 20MW) qui nécessitent des machines lentes (typiquement une vitesse de rotation nominale de l'ordre de la centaine de tours/min), un fractionnement de la puissance au niveau de l'alimentation électronique, un haut niveau de sûreté de fonctionnement et une discrétion acoustique élevé. Les travaux menés ont permis de mettre en place une méthodologie de modélisation et de conception de ces machines. Par action sur le bobinage ou sur l'aimantation nous avons alors mis en évidence des structures particulièrement pertinentes pour augmenter les performances de la machine en termes de qualité de couple et de compacité [69-72].

### 2.2.1 Vers des concepts permettant une meilleure gestion des modes dégradés

Ces travaux se poursuivent par la recherche de solutions permettant de mieux gérer des modes dégradés que ce soit par la commande [129,130] ou par la conception [131]. Ce point est fondamental pour le contexte applicatif naval. Au niveau de la conception de la machine, la conjonction d'un nombre de phases élevées et d'un grand nombre de pôles conduit à un nombre très élevé de possibilités en termes de bobinage. Il semble donc particulièrement intéressant de jouer sur les stratégies de bobinages pour atteindre les objectifs de dimensionnement d'une machine pouvant fonctionner de manière optimale en mode dégradé. Ceci peut passer par des stratégies de bobinage fractionnaire d'une machine à répartition de phases régulière ou multi-étoile.

Ces recherches de concepts ne peuvent se faire que par une approche globale conjuguant les aspects commande et alimentation et les aspects conception.

### 2.2.2 Vers des machines polyphasées conçues pour l'alimentation multi machines par un même onduleur.

L'augmentation du nombre de phases d'une machine permet des stratégies de commande et d'alimentation différentes d'une structure triphasée. Si le nombre de phases est impair, il est possible d'alimenter  $(n-1)/2$  machines  $n$  phases par un même onduleur  $n$  phases en mettant en série les 2 machines avec une connexion particulière des phases [132-134]. Cette stratégie a été étudiée plus particulièrement sur des associations de machines asynchrones [132,133] et peut être étendue au cas des machines synchrones à aimants permanents [134]. Pour le cas de systèmes pentaphasés, il est par exemple possible de commander indépendamment 2 machines 5 phases par un même onduleur 5 phases selon le schéma de connexion présenté à la figure IV.13.

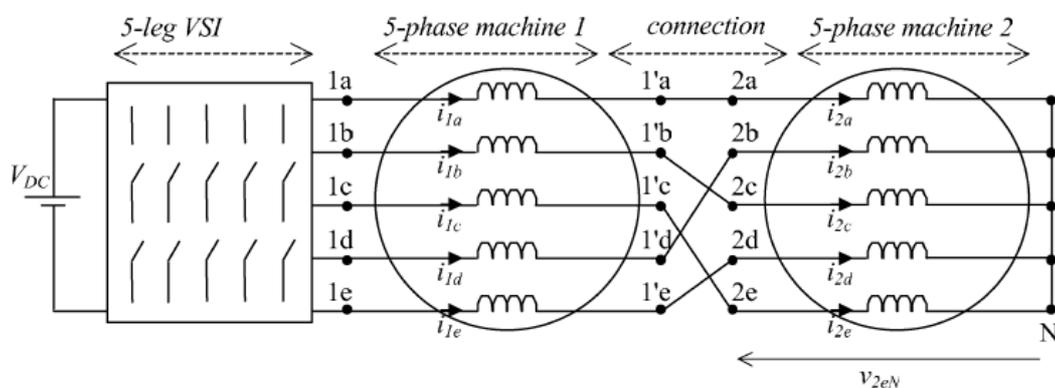


Figure IV.13 : Schéma de principe permettant la commande indépendante de 2 machines 5 phases par un onduleur 5 phases.

Au niveau du contexte applicatif il semble évident que ce type de système peut trouver des applications industrielles. Au niveau naval, on peut imaginer par exemple un navire à deux propulseurs constitué chacun d'une machine à 5 phases alimentée par un onduleur à 5 bras. Dans le cas de défaut d'un des onduleurs, il serait alors possible d'utiliser l'onduleur « sain » pour alimenter les deux propulseurs à puissance réduite et bénéficier de la manoeuvrabilité liée à l'utilisation conjointe de deux lignes d'arbre.

L'application de ce schéma conduit, si l'on considère la théorie multi machine, à ce que les courants correspondants à la machine « principale » de la première machine soient les courants alimentant la machine « secondaire » de la seconde machine et vice-versa. Le contrôle indépendant des deux machines résulte alors de la commande

indépendante des deux machines principales. Il est alors pertinent de concevoir les deux machines polyphasées de manière à ce que la première machine ne perturbe pas la commande de la deuxième et vice-versa. Atteindre cet objectif pourrait par exemple être atteint par l'utilisation de stratégies d'aimantation non conventionnelle et/ou de bobinages fractionnaires particuliers.

Il serait également intéressant d'insérer la connectique particulière des bobinages en série au sein d'une même structure magnétique pouvant entraîner de manière indépendante plusieurs rotors. Ce type de structures pourrait par exemple être particulièrement intéressant dans une architecture de propulseur « Rim-Driven » comportant plusieurs hélices commandées de manière à optimiser les performances hydrodynamiques du propulseur. On sait par exemple que la conjugaison de deux hélices en contre rotation au sein d'un même propulseur conduit à augmenter significativement les performances hydrodynamiques en « redressant » l'écoulement [135]. Il est à noter que ce type de concepts pourrait être exploré dans le cadre de la thèse débutant en septembre 2010 (suite des travaux sur les structures « RIM-Driven », doctorant : M. S. Djebbari).

### ***2.3 Des techniques de dimensionnement systématique à des techniques d'optimisation élaborées.***

Les modèles que nous avons élaborés au cours des précédents travaux ont été utilisés soit pour faire des dimensionnements directs par essais successifs comme par exemple dans le cadre des travaux de Sculler [27], soit dans le cadre de procédures de balayage systématique d'un certain nombre de paramètres comme dans le cadre des travaux de Laurent Drouen [51]. Lorsque l'on couple des modèles multi physiques comme il est nécessaire de le faire dans les projets évoqués aux paragraphes 2.2 et 2.3 cela se traduit par un nombre élevé de paramètres de dimensionnement qui rendent ces méthodes directes relativement laborieuses. Il semble alors pertinent de s'intéresser à des méthodes d'optimisation. J'ai eu l'occasion d'utiliser au début de ma carrière des méthodes d'optimisation basées sur des méthodes classiques de type gradient. Cependant ces méthodes peuvent poser des problèmes de convergence notamment du fait de la présence de minima locaux. L'utilisation de méthodes d'optimisation stochastiques telles que les algorithmes génétiques [136, 137], les techniques de plan d'expériences que j'ai abordé succinctement au cours de la thèse de Rios-Quesada [94], de recuit simulé ou de recherche tabou [138, 139] pourrait être une piste pertinente pour améliorer les environnements de conception de tels systèmes dans leur contexte multi-physique.

## **3 Vers la conception et la modélisation globale des systèmes en environnement maritime.**

Depuis quelques années la thématique des systèmes de récupération des énergies renouvelables marines et en particulier des systèmes hydroliens tend à occuper de plus en plus de place dans mes activités. Lorsque l'on considère un tel système il est difficile d'étudier ou de concevoir un des éléments du dispositif indépendamment de l'ensemble de la chaîne de transmission d'énergie, des caractéristiques de la ressource et de son contexte.

Nous avons donc été progressivement amenés à nous intéresser à une approche de modélisation et de conception à l'échelle du système qui permet une approche globale de l'ensemble. Cette approche est complémentaire et nécessaire pour dimensionner les éléments du dispositif tels que par exemple pour une hydrolienne, la génératrice et la

turbine. Il est à noter qu'une telle approche est fédératrice tant au niveau des activités de recherche sur la ville de Brest qui dispose de nombreux chercheurs travaillant sur les sciences et technologies de la mer qu'au sein de la structure fortement pluridisciplinaire de l'IRENav.

Ces activités ont été par exemple l'occasion d'un travail collaboratif important entre le LBMS (équipe de M. Benbouzid) et les composantes électrotechniques et hydrodynamiques de l'IRENav.

Nous nous sommes également impliqués récemment dans des travaux qui ont pour but de mettre au point un Système d'Information Géographique permettant une identification multi critères par un logiciel expert des combinaisons de sites et de choix technologiques optimaux pour l'extraction d'énergies renouvelables marines.

### ***3.1 Participation à la modélisation globale de la chaîne d'énergie des systèmes d'énergie renouvelable marine***

Disposer d'un environnement de modélisation globale des systèmes d'énergie renouvelables marines est particulièrement pertinent car l'étude des différents composants du système nécessite une prise en compte globale de la ressource, de la nature et du comportement des différents éléments du système jusqu'au réseau de distribution d'énergie. En effet l'interaction entre les éléments du système est très forte et seule cette prise en compte globale permettra de faire les choix technologiques et les dimensionnements optimaux en fonction de la ressource et des contraintes liées au site d'extraction d'énergie.

Nous nous sommes donc attachés en collaboration avec le LBMS à développer un environnement permettant de simuler globalement les dispositifs d'extraction d'énergie marine dans leur environnement à l'instar de ce qui peut exister dans le domaine de l'éolien. Ce travail a été amorcé par la mise en place d'une bibliothèque de composants sous un environnement Matlab/simulink des systèmes d'extraction des courants de marées. Ce travail a été effectué au cours de la thèse de S.E. Benelghali que j'ai co-encadrée avec M. Benbouzid du LBMS et qui a été soutenue en décembre 2009 [21].

Nous avons pu alors mettre au point un modèle de premier ordre de la ressource incluant les phénomènes liés à la marée, ainsi que les perturbations liées à l'état de mer et en particulier à la houle. La figure IV.4 présente la vitesse prédite du courant de marée dans le raz de sein pour un mois et un an (Courants de marée sans perturbation). La figure IV.15 présente les effets de la perturbation liée à la houle et la turbulence sur le courant de marée à l'échelle temporelle de la dizaine de secondes.

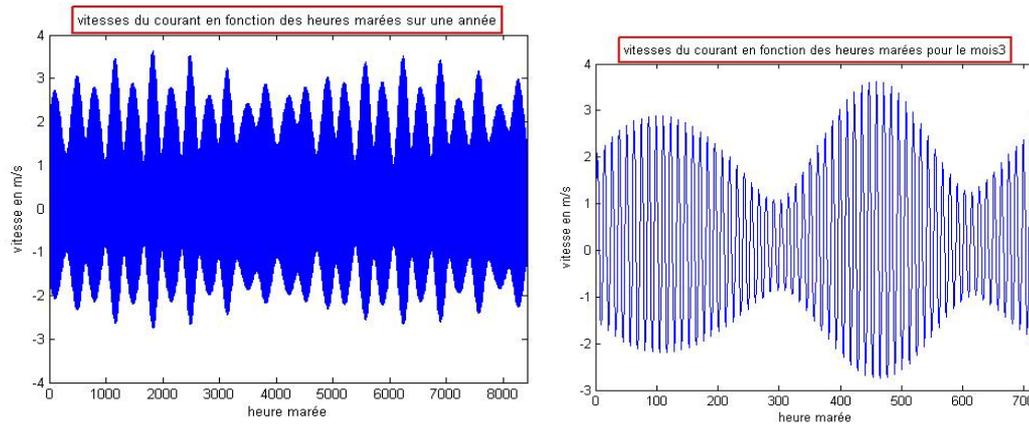


Fig. IV.14. Vitesse du courant dans le Raz de Sein sur l'année 2007 et le mois de mars 2007.

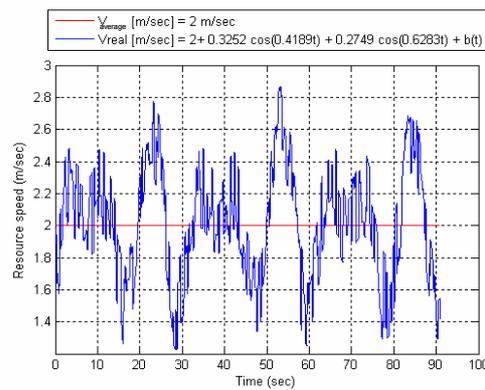


Figure IV.15 : prise en compte des perturbations liées à la houle et la turbulence

Nous avons également implanté un modèle hydrodynamique du capteur d'énergie qui est ici une hélice horizontale. Ce modèle permet de déterminer a priori a partir des caractéristiques géométriques de l'hélice les performances de l'hélice en fonction de sa vitesse de rotation et de la vitesse du fluide. L'évaluation de ces performances est faite grâce à l'implantation d'une méthode connue des mécaniciens des fluides sous le nom de « Blade Element Method ». Cette méthode est utilisée fréquemment pour l'étude des pales de turbines éoliennes. Elle permet d'obtenir in fine un modèle quasi statique du comportement de l'hélice. La figure IV.16 présente les courbes de coefficient de puissance ainsi obtenues pour une turbine tripale de 17,4 m de diamètre utilisant un profil NACA 44.

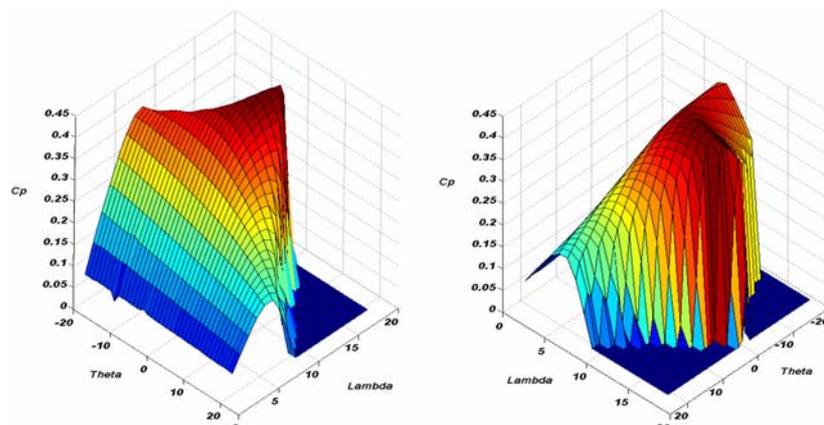


Figure IV.16 : Courbes de coefficient de puissance obtenue grâce au modèle hydrodynamique

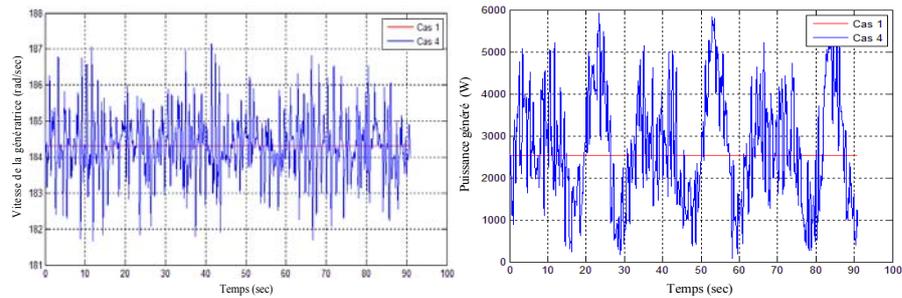
Un modèle à deux masses d'un éventuel réducteur a également été implanté. Cet ensemble de modèle a été complété par des modèle de trois types de génératrices qui ont été modélisées sous la forme classique des équations de Park : machine asynchrone à cage, machine asynchrone à double alimentation et machine synchrone à aimants permanents. Les convertisseurs qui sont ici des onduleurs à MLI sont modélisés comme des sources de tension commandables avec des limitations sur les valeurs de tension et de fréquence. Cet ensemble de modèles permet une première approche de simulation globale du système dans son environnement et la prédiction de ces performances.

Cas	Conditions de Simulations/ Vitesse du Courant (m/sec)	Puissance moyenne (kW)
1	$V_{real} = 2$ (pas de perturbation) $V_{ref} = 2$	2.535
2	$V_{real} = 2 + 0.3252 \cos(0.4189t) + 0.2749 \cos(0.6283t)$ $V_{ref} = 2 + 0.3252 \cos(0.4189t) + 0.2749 \cos(0.6283t)$	2.694
3	$V_{real} = 2 + 0.3252 \cos(0.4189t) + 0.2749 \cos(0.6283t)$ $V_{ref} = 2$	2.612
4	$V_{real} = 2 + 0.3252 \cos(0.4189t) + 0.2749 \cos(0.6283t)$ $+ b(t)$ $V_{ref} = 2$	2.691
5	$V_{real} = 2 + 0.3252 \cos(0.4189t) + 0.2749 \cos(0.6283t)$ $+ b(t)$ $V_{ref} = 2 + 0.3252 \cos(0.4189t) + 0.2749 \cos(0.6283t)$	2.821

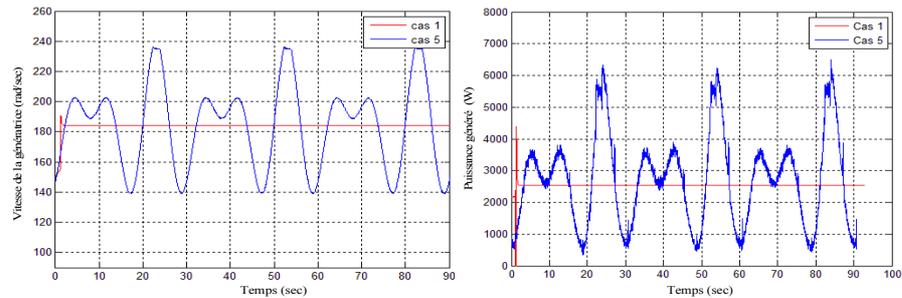
Table IV.1 Cas simulés

A titre d'exemple la figure IV-17 issue de [140] présente sur quelques secondes les performances d'une hydrolienne de puissance réduite de 10kW équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation avec une commande en vitesse basée sur une stratégie de « Maximum Power Point Tracking » (MPPT). Cette génératrice se trouve en présence d'une ressource plus ou moins perturbée par deux trains de houles et par de la turbulence.

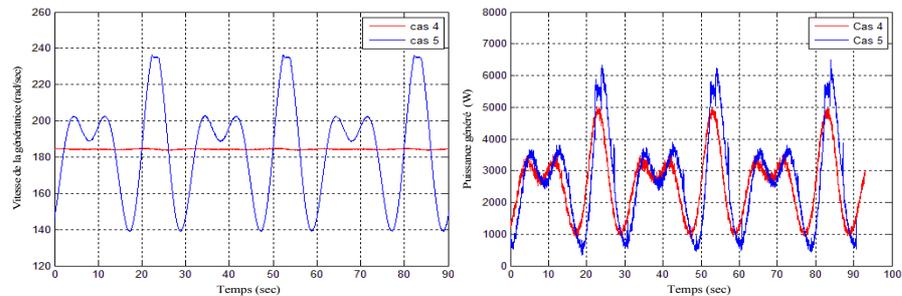
On utilise ici plusieurs références de vitesse de fluide ( $V_{ref}$ ) pour déterminer la consigne en vitesse de rotation optimale en fonction de la stratégie MPPT selon que l'on considère que cette vitesse de référence est issue d'une mesure par un capteur in situ (cas 1, 2 et 5) ou d'une estimation basée sur la ressource prédite par des données astronomiques (cas 3 et 4, la consigne de vitesse est alors constante sur les 100 secondes de simulation). Les 5 cas simulés sont décrits à la table IV.1



(a) Cas 1 et 4.



(b) Cas 1 et 5.



(c) Cas 4 et 5.

Fig. IV.17. Performances de la génératrice pour une ressource perturbée.

Si ces premiers travaux permettent déjà une évaluation assez précise des performances d'une hydrolienne dans son environnement et permettent de comparer et d'évaluer différentes configurations en terme de technologie et de commande [140-143], ils constituent seulement le premier pas vers un environnement global et ouvrent de nouvelles voies à explorer.

En effet les travaux menés [21] ont montré la difficulté de disposer d'un ensemble de modèles qui rendent possibles des simulations réalistes à différentes échelles de temps.

En effet, afin d'évaluer les performances et la rentabilité économique d'un système in situ, il est nécessaire de pouvoir effectuer des simulations à l'échelle de durée de l'ordre de l'année.

Les tests des systèmes ayant des constantes de temps plus courtes, comme par exemple la sensibilité aux perturbations de la ressource ou du réseau, des convertisseurs et de leurs commandes, nécessitent quand à eux des durées de simulation courtes (pouvant être inférieures au dixième de seconde). De ce fait il est nécessaire de disposer de modèles avec différents niveaux de précision et de complexité. Au cours de la thèse de S.E. Benelghali les aspects à grandes et moyennes échelles de temps ont été relativement explorés en utilisant des modèles relativement peu complexes. Cependant les aspects à faible échelle de temps ont été moins étudiés. Ils permettraient par exemple notamment le traitement des perturbations sur les réseaux et des perturbations à petite échelle de temps de la ressource. Ce type de simulation qui permet de tester la sensibilité des systèmes aux phénomènes « rapides » nécessite l'insertion de modèles plus élaborés notamment au

niveau hydrodynamique. En effet le modèle utilisé pour modéliser les systèmes est un modèle quasi-statique qui pourrait être remplacé pour les simulations à petites échelles de temps par un modèle dynamique.

Il en est de même au niveau de l'électronique de puissance ou les phénomènes liés à la commutation doivent être pris en compte aux échelles de temps courtes.

L'environnement développé doit être également être étendu à d'autres types de systèmes hydroliens. Il serait par exemple particulièrement intéressant d'intégrer d'autres types de turbine en particulier les turbines à axes transverses où des modèles ont été développés notamment au sein de l'IRENav à différents niveaux de complexité.

Il serait également judicieux de s'intéresser à l'interaction des machines entre elles dans un dispositif de type ferme en incluant, en collaboration avec des hydrodynamiciens, des éléments pour la prise en compte de leur interaction hydrodynamique. Il serait également possible de s'intéresser aux architectures de pilotage de l'énergie d'un ensemble de machines.

Un environnement tel que celui qui a été développé au cours de la thèse de S.E. Ben Elghali peut également être naturellement étendu à la modélisation et la simulation de systèmes multi sources incluant sur un même site éventuellement d'autres types d'énergies renouvelables marines comme les systèmes éoliens offshore ou des systèmes houlomoteurs [144] ainsi que des moyens de stockage d'énergie qui permettent d'optimiser et de lisser la puissance produite en minimisant les effets liés à l'intermittente des ressources.

Ces travaux pourraient être menés en collaboration avec le LBMS avec qui nous collaborons depuis plusieurs années, le SATIE (antenne de Bretagne) avec lequel nous avons monté un projet exploratoire qui a été financé par l'Université Européenne de Bretagne (EPT de l'UEB en 2009) et également l'équipe de la Shanghai Maritime University (Pr Tang) avec laquelle nous entamons actuellement des collaborations (échanges de chercheurs).

### ***3.2 Implications transverses dans la création de systèmes d'information géographique pour les systèmes d'énergie renouvelable marine.***

Pouvoir modéliser et simuler le comportement global de la chaîne de conversion d'un système d'extraction d'énergie pour un site donné est une nécessité pour le choix et le dimensionnement des composants.

Le besoin de reconnaissance des zones propices au développement des énergies renouvelables en mer est également un point particulièrement crucial [145].

Il nous faut encore pour cela avoir une meilleure connaissance des potentialités des sites maritimes tant au niveau des potentiels de production que des contraintes liées à l'exploitation et la mise en œuvre des systèmes.

Il est donc nécessaire de développer des méthodologies et des modèles d'analyse et de synthèse du potentiel des sites exploitables pour les énergies renouvelables marines. Il est possible de développer une méthodologie d'intégration de données géographiques et un modèle d'analyse spatiale et multi critères des potentialités de production énergétique des énergies renouvelables en milieu maritime. Ce travail peut être effectué en collaboration avec des spécialistes des systèmes d'information géographique (SIG), des géographes marins, des spécialistes de la physique des océans et des hydrodynamiciens.

Il serait alors judicieux de mettre au point un modèle élaboré à partir de données géographiques multi sources intégrant des données de Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) permettant la modélisation des courants de marée, de statistiques de

houle, de nature des fonds, et de bathymétrie ainsi que les données et les caractéristiques techniques des machines.

L'objectif étant, *in fine*, d'être capable d'évaluer selon une approche multicritère les positions optimales et les technologies pertinentes associées à un système d'extraction d'énergie marine (comme par exemple les lieux d'implantation, les choix technologiques et le nombre de machines).

L'outil développé pourrait constituer alors un système d'aide à la décision pour la mise en œuvre des systèmes. Ce type de méthodologie pourrait permettre par exemple de calculer l'énergie produite en instantané, ou pour une période donnée, selon une localisation ou une région géographique donnée. Cette évaluation serait fonction des solutions techniques retenues et des paramètres de quantification de l'énergie produite.

Il permettrait également d'estimer le coût et les contraintes d'implantation des hydroliennes. Ces coûts et contraintes sont fonctions de la technologie, du nombre de machines, des caractéristiques géographiques du site (profondeur, nature du sol, éloignement des ports et des réseaux). Ils sont également liés au coût et à la fréquence de la maintenance ainsi qu'à la durée des arrêts d'exploitation.

Il serait également possible d'évaluer le coût de construction et de vie estimé du système selon la technologie, la puissance nominale des unités et les caractéristiques physiques du site envisagé. L'étude pourrait également comprendre des aspects sur le bilan économique et écologique global et l'impact sociétal (e.g., création d'emploi et conflit d'usages, mitage du territoire maritime) en fonction de la localisation géographique et des technologies utilisées.

L'outil de modélisation développé pourrait être enfin étendu à une résolution de problèmes inverses. Ceci permettrait par exemple de procéder à la recherche d'un site optimal pour un système ou un ensemble de systèmes de récupération d'énergie donné.

Il peut s'agir par exemple d'optimiser l'installation d'une ferme d'hydroliennes d'une certaine puissance globale et d'en optimiser le rendement économique (e.g., rapport sur le nombre de kW.h produits sur les coûts d'acquisition et de maintenance). L'outil développé permettra alors de construire des scénarios d'implémentation et de choix de sites géographiques.

Ces scénarios seront par exemple fonctions du nombre de machines, de la puissance recherchée, des budgets disponibles, des choix technologiques possibles et des zones maritimes pouvant être allouées pour l'exploitation.

Des premiers travaux, en ce sens, ont été menés sur des systèmes houlomoteurs par des équipes portugaises [146].

A notre niveau, ces travaux très fortement pluridisciplinaires et transverses pourraient être menés en collaboration entre les différentes composantes de l'IRENav. L'IRENav dispose en effet d'un groupe de recherche consacré aux Systèmes d'Information Géographique en environnement maritime et de spécialistes de l'hydrodynamique au sein du groupe M2EN.

Des organismes comme l'IFREMER et le SHOM avec lequel l'IRENav collabore pourraient également être impliqués. Les équipes de la Shanghai Maritime University avec lesquels l'IREnav travaille notamment dans le domaine des SIG pourraient également contribuer à ce projet.

Nous avons initié en collaboration avec C. Claramunt, professeur en SIG à l'IRENav, une première ébauche de travaux sur ce sujet par le biais d'un stage de Master Recherche [147]. Ceux-ci ont permis d'identifier des modèles pertinents et de mettre en évidence un premier jeu de critères qualitatifs et quantitatifs pour qualifier les ressources énergétiques et les technologies de machines dans leur environnement. Nous avons pu également commencer à établir une stratégie d'acquisition et de traitement de données qui

a été implantée sur un environnement logiciel dédié au SIG [148]. Ces premiers travaux ont montré la richesse et le potentiel d'une telle thématique.

## 4 Conclusion sur les perspectives

Etre capable de produire, transformer, stocker et transporter l'énergie électrique est un enjeu majeur pour les années à venir. La mise au point de systèmes de transports fiables, surs et peu gourmands en énergie est également un point clé du développement des sociétés futures. Ces deux points sont particulièrement cruciaux dans le domaine maritime.

Le transport maritime constitue actuellement plus de 80% du transport de marchandises. Le domaine océanique est un des derniers espaces « peu réglementé » et possède des ressources énergétiques que l'on commence seulement à exploiter.

Concevoir des systèmes performants pour la propulsion et la gestion d'énergie à bord des navires ou pour l'extraction d'énergie renouvelable marine représente donc un enjeu sociétal important.

La mise en œuvre de systèmes de conversion d'énergie en milieu maritime présente en général des contraintes importantes. Les systèmes sont en général difficiles d'accès ou embarqués ce qui implique un très haut niveau de fiabilité. Les chaînes d'énergies sont complexes et les interactions entre les différents éléments d'un système complet sont très fortes. De ce fait il est particulièrement judicieux dans ces cadres de procéder par une approche pluridisciplinaire qui allie l'électrotechnique avec d'autres domaines comme l'hydrodynamique, l'océanographie ou la physique des océans.

De ce fait étudier ces types de systèmes peut conduire à s'intéresser à des systèmes électriques fortement non conventionnels qui résultent d'un compromis entre les contraintes liés aux différents domaines.

Ces constatations m'ont amené à dégager deux pistes de recherche qui m'ont paru particulièrement judicieuse dans le cadre de travaux menés dans une structure pluridisciplinaire centrée autour des activités maritimes telle que l'IRENav. Il est à noter que ces pistes de recherche nécessitent de faire appel à des activités collaboratrices transverses qui sont des éléments fédérateurs au sein d'une telle structure.

Une première piste concerne la modélisation et la conception de systèmes électromécaniques utilisés pour la propulsion navale ou les énergies renouvelables. Du fait des contraintes associées à ce contexte applicatif on est alors conduit à envisager l'utilisation de structures électromécaniques non classiques comme les machines à structures 3D ou les machines polyphasées par exemple.

Ces structures nécessitent d'adapter et d'élaborer des outils de modélisation adaptée présentant différents niveaux de complexité et permettant une approche multi physique du système. Ces outils de modélisation peuvent alors être utilisés à des fins de conception (choix des structures) et de dimensionnement. Cette piste de recherche se place dans la continuité directe des travaux précédemment menés.

Une deuxième piste de recherche, totalement complémentaire de la première consiste à considérer les dispositifs en ayant une vue globale du système dans son environnement. Cette approche est particulièrement judicieuse pour l'étude des systèmes d'énergie marine qui nécessitent une approche de l'ensemble allant de la ressource énergétique au réseau de transport d'énergie.

La mise au point d'environnement de modélisation globale de tels systèmes que ce soit pour le choix des sites, le choix des concepts technologiques et les dimensionnement des composants, est un point nécessaire au déploiement à grande échelle de ces systèmes.

## V) Annexes

### 1 Expression du potentiel vecteur dans le cas d'une machine linéaire

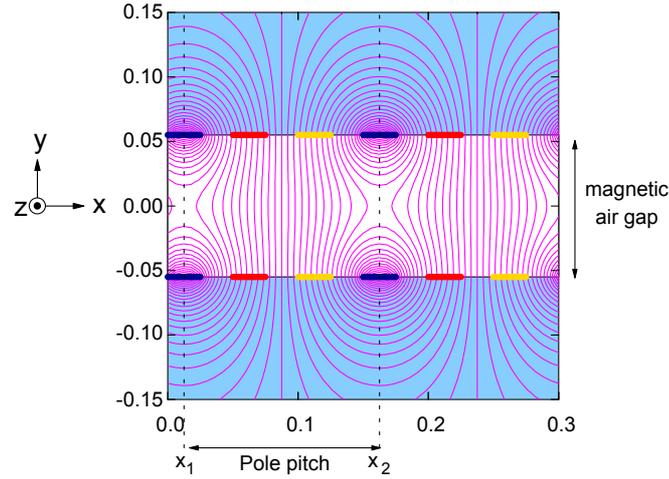


Figure A.1 Structure étudiée

L'indice  $e$  désigne l'entrefer magnétique,  $f+$  la culasse supérieure et  $f-$  la culasse inférieure.

$$A_{zf-}(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{nf} \exp\left(\frac{n\pi}{L_p} y\right) \cos\left(\frac{n\pi}{L_p} x + \theta_n\right)$$

$$A_{ze}(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{ne} \cosh\left(\frac{n\pi}{L_p} y\right) \cos\left(\frac{n\pi}{L_p} x + \theta_n\right)$$

$$A_{zf+}(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{nf} \exp\left(-\frac{n\pi}{L_p} y\right) \cos\left(\frac{n\pi}{L_p} x + \theta_n\right)$$

Et

$$\theta_n = \text{Arctan}\left(-\frac{j_{bn}}{j_{an}}\right)$$

$$A_{ne} = \frac{\frac{\mu_0 L_p}{n\pi} \sqrt{j_{an}^2 + j_{bn}^2}}{\frac{1}{\mu_f} \cosh\left(\frac{n\pi}{L_p} h\right) + \sinh\left(\frac{n\pi}{L_p} h\right)}$$

$$A_{nf} = \frac{\frac{\mu_0 L_p}{n\pi} \cosh\left(\frac{n\pi}{L_p} h\right) \sqrt{j_{an}^2 + j_{bn}^2}}{\exp\left(-\frac{n\pi}{L_p} h\right) \left( \frac{1}{\mu_f} \cosh\left(\frac{n\pi}{L_p} h\right) + \sinh\left(\frac{n\pi}{L_p} h\right) \right)}$$

## 2 Expression du champ créé par une plaque chargée magnétiquement

Le champ créé par une plaque chargée en un point de l'espace dans la configuration décrite à la figure A.2 est selon [89].

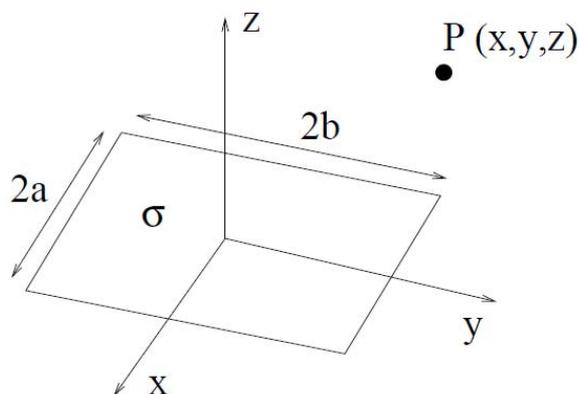


Figure A.2 : Configuration de calcul du champ créée par une plaque chargée magnétiquement

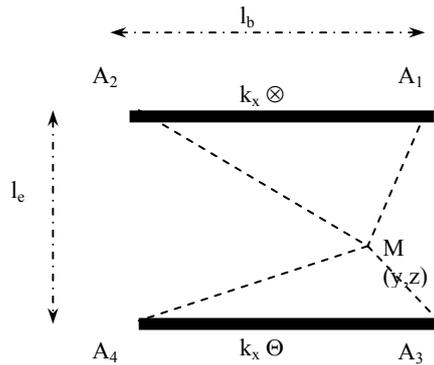
$$\begin{bmatrix} H_x(x, y, z) \\ H_y(x, y, z) \\ H_z(x, y, z) \end{bmatrix} = \frac{\sigma}{4\pi\mu_0} \sum_{(i,j) \in [0,1]^2} (-1)^{i+j} \begin{bmatrix} \ln(R_{ij}(x, y, z) - T_j(y)) \\ \ln(R_{ij}(x, y, z) - S_i(x)) \\ \tan^{-1}(S_i(x).T_j(y) / R_{ij}(x, y, z).z) \end{bmatrix}$$

avec

$$\begin{cases} S_i(x) = x - (-1)^i . a \\ T_j(y) = y - (-1)^j . b \\ R_{ij}(x, y, z) = (S_i(x)^2 + T_j(y)^2 + z^2)^{1/2} \end{cases}$$

### 3 Expression de l'induction créé par deux nappes parallélépipédiques de courant (cas du propulseur magnétohydrodynamique)

L'origine du repère est alors choisie au centre du quadrilatère ( $A_1 A_2 A_4 A_3$ ). L'axe  $x$  est alors l'axe d'avance du navire (perpendiculaire au domaine d'étude) et  $M$ , le point de calcul, a pour coordonnées  $(y,z)$ . Les 2 nappes ainsi que le point de calcul sont représentés à la figure A.3. Les 2 nappes de conducteurs sont placées de  $A_1$  à  $A_2$  et de  $A_3$  à  $A_4$ .



FigureA.3: position des nappes et point de calcul

Les expressions de l'induction magnétique sont alors selon [85] :

$$B_y = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I_{supra}}{l_b} \cdot \text{Ln} \left[ \frac{\left[ \left( y - \frac{l_e}{2} \right)^2 + \left( z + \frac{l_b}{2} \right)^2 \right] \left[ \left( y + \frac{l_e}{2} \right)^2 + \left( z + \frac{l_b}{2} \right)^2 \right]}{\left[ \left( y - \frac{l_e}{2} \right)^2 + \left( z - \frac{l_b}{2} \right)^2 \right] \left[ \left( y + \frac{l_e}{2} \right)^2 + \left( z - \frac{l_b}{2} \right)^2 \right]} \right]$$

$$B_z = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_{supra}}{l_b} \cdot \left[ \text{tg}^{-1} \left( \frac{z - \frac{l_b}{2}}{\frac{l_e}{2} - y} \right) - \text{tg}^{-1} \left( \frac{z + \frac{l_b}{2}}{\frac{l_e}{2} - y} \right) - \text{tg}^{-1} \left( \frac{\frac{l_b}{2} - z}{\frac{l_e}{2} + y} \right) + \text{tg}^{-1} \left( \frac{-\frac{l_b}{2} - z}{\frac{l_e}{2} + y} \right) \right]$$

## Bibliographie

- [1] JF Charpentier-« Modélisation des ensembles convertisseurs/ machines électriques par couplage des équations du champ électromagnétique et du circuit électrique ». Thèse de doctorat de l'INPT -8 octobre 1996.
- [2] F. Hecht and A. Marrocco, "A finite element simulation of an alternator connected to a non linear external circuit," I.E.E.E. transactions on Magnetics, vol. 26, no. 2, pp. 964–967, 1990.
- [3] D. Shen, G. Meunier, J. Coulomb, and J. Sabonadiere, "Solution of magnetic field and electrical circuits combined problems," I.E.E.E Trans on Magnetics, vol. Mag21, pp. 2288–2291, November 1985.
- [4] Lindfors and Luomi, "A general method for the numerical solution of coupled magnetic field and circuit equations," in ICEM-1988, pp 88.
- [5] S. Brisset and P. Brochet, "Numerical simulation of the transients of a switched reluctance motor using an electronic-electromagnetic-mechanical coupled finite element model," in ICEM, 94.
- [6] P. Lombard and G. Meunier, "Couplage des équations électriques et magnétiques," Journal de physique III france, vol. 3, pp. 397–412, 1993.
- [7] F. Piriou and A. Razek, "simulation of electromagnetic systems by coupling of magnetic and electric equation," Mathematics and computer in simulation, vol. 31, pp. 189–194, 1989.
- [8]-J. F. Charpentier, Y. Lefèvre, H. Piquet, 1997- Une méthode Générale pour modéliser les convertisseurs statiques associés à des dispositifs magnétiques, *Journal de Physique III* november 1997 pp 2225-2237.
- [9]-J. F. Charpentier, Y. Lefèvre, H. Piquet, 1997-An Original and Natural method of coupling electromagnetic field equations with circuit equations put in a state form- COMPUMAG'97 Rio Brazil november 3-6 1997
- [10]-J.F. Charpentier, Y. Lefèvre, H. Piquet, 1997-Modeling of Power Electronics Circuits Associated With Non-Linear Magnetic Devices, E. P. E.'97 (European Conference on Power Electronics and Applications), Trondheim, Norway, september 8-10 1997, in proceedings pp 2.309-2.314 .
- [11] Description du logiciel Maxwell-Ansoft V13.0 : <http://www.ansoft.com/products/em/maxwell/> (consulté le 30/8/10)
- [12] Description du logiciel Flux3D-Cedrat V.10.3 : (document pdf édité par CEDRAT)
- [13] Description du logiciel OPERA-Vector Field : (document pdf édité par COBHAM juillet 2010)
- [14] M. Lajoie-Mazenc, H. Hector, et R. Carlson. Procédé d'analyse des champs électrostatiques et magnétostatiques dans les structures planes et de révolution : programme difimedi. in the Proceedings of Compumag, Grenoble, France, September 1978.
- [15] P.E. Gill, W. Murray and M.H. Wright, 'Practical Optimization', Academic Press, NY, 1981.
- [16]-J.F. Charpentier, J. Cros, Ph. Viarouge, 1998 Efficient Meshing Method for Iterative Optimal Design of Electromagnetic Devices , CEFC'98 Tucson, Arizona June 1- 3, 1998 in proceedings p 40 .
- [17] - J.F. Charpentier, J. Cros, Ph. Viarouge, 1998-Determination of meshing laws in finite difference field calculation for the design of electromagnetic devices using constraint non linear optimization techniques-4th International Workshop on Electric and Magnetic Field (EMF 98) 12-15 may 1998, Marseille, France, in proceedings pp 255-260.
- [18] J.-P. Yonnet, "Magneto-mechanical devices," in Rare Earth Iron Permanent Magnet, J. M. D. Coey, Ed. Oxford, U.K.: Oxford Univ.Press, 1996, ch. 9.
- [19] site de l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale : <http://www.ecole-navale.fr/RECHERCHE,1803.html> (consulté le 30/8/10)
- [20] Rapport d'évaluation de l'AERES sur l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale : <http://www.aeres-evaluation.fr/content/download/12073/175208/file/EVAL-0753237L-S2100016000-UR-RAPPORT-2.pdf> (consulté le 30/8/10)
- [21] S.E. Benelghali "On multiphysics modeling and control of marine current turbine systems". Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale-8/12/2009.
- [22]Z. Q. Zhu et D. Howe. Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, part i : Open-circuit field. IEEE Transactions on Magnetics, 29(1) :124–135, January 1993. II.3.2
- [23] Z. Q. Zhu et D. Howe. Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, part ii : Armature-reaction field. IEEE Transactions on Magnetics, 29(1) :136–142, January 1993. II.2.2.1, II.3.2
- [24] Z. Q. Zhu et D. Howe. Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, part ii : Magnetic field on load. IEEE Transactions on Magnetics, 29(1) :152–158, January 1993. II.3.2
- [25] Z. Q. Zhu et D. Howe. Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent

- magnet dc motors, part iii : Effect of stator slotting. IEEE Transactions on Magnetics, 29(1) :143–151, January 1993. II.3.2, II.3.2.3
- [26] A. D. Kone. Contribution à la conception des actionneurs électriques par formulation en terme d'optimisation. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1993.
- [27] F. Scuiller- développement d'outil de conception de machines polyphasées à aimants utilisant l'approche multimachine- Thèse de doctorat de l'ENSAM, 2006.
- [28] E. Matagne. Cours elec 2311 : Physique interne des convertisseurs électromécaniques. milieux magnétiques composites. Notes de cours de l'Université Catholique de Louvain, Belgique, <http://www.lei.ucl.ac.be/~matagne/ELEC2311/SEM04/S04P12B.HTM>. (consulté le 30/8/10)
- [29] E. Matagne. Contribution à la Modélisation des Dispositifs électrotechniques en vue de leur optimisation. Thèse de Doctorat, Université Catholique de Louvain, 1991.
- [30] B. Nogarede. Etude de moteurs sans encoches à aimants de forte puissance à basse vitesse. Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1990.
- [31] J. P. Caron. Modélisation des machines électriques par le calcul analytique des champs. Notes de cours.
- [32] H. A. Toliyat, T. A. Lipo, et J. C. White. Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications. part 1 (motor analysis). IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.6(4) :679–683, December 1991. II.2.2
- [33] H. A. Toliyat, T. A. Lipo, et J. C. White. Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications. part 2 (motor design and performance). IEEE Transactions on Energy Conversion, 6(4) :684–692, December 1991.
- [34] F. Scuiller, E. Semail, JF Charpentier, « General modeling of the windings for multi-phase AC machines. Application to the analytical estimation of the mutual stator inductances for smooth air gap machines », EPJ Applied physics, Vol 50 n°3 June 2010, DOI: 10.1051/epjap/2010058, 15pp
- [35] K. Halbach. Design of permanent magnets multipole with oriented rare earth cobalt material. Nucl. Instrum. Methods, 169 :1–10, 1980.
- [36] M. Marinescu et N. Marinescu. New concept of permanent magnet excitation for electrical machines. analytical and numerical computation. IEEE Transactions on Magnetics, 28(2) :1390–1393, March 1992.
- [37] Z. Q. Zhu, Z. P. Xia, Y. F. Shi, D. Howe, A. Pride, and X. J. Chen Performance of Halbach Magnetized Brushless AC Motors, IEEE TMag vol 39 n°5 sept 2003 pp 2292-2295.
- [38] A. B. Proca, A. Keyhani, A. El-Antably, W. Lu, et M. Dai. Analytical model for permanent magnets motors with surface mounted magnets. IEEE Transactions on Energy Conversion, 18(3) :386–391, September 2003.
- [39] Z. Q. Zhu et D. Howe. Analytical prediction of the cogging torque in radial-field permanent magnet brushless motors. IEEE Transactions on Magnetics, 28(2) :1371–1374, March 1992.
- [40] E.S Hamdi-« design of small electrical machines » -Wiley and sons 1994
- [41] JR Hendershot and TJE Miller « design of brushless PM Motors » Oxford Science Publication 1994
- [42] J Cros-« Définition d'un cationneur pour l'automobile », These de doctorat de l'INP Toulouse 1992.
- [43] L. Drouen , F. Scuiller, JF Charpentier, E. Semail, S. Clenet-, Modèles analytiques pour le pré-dimensionnement de machines à aimants à basse vitesse, grand diamètre et grand entrefer-in CDROM proceedings Electrotechnique du Futur EF 07 Toulouse 6-7 sept 2007.
- [44]S. Abu Sharkh, M. Harris, S. Turnock, R. Crowder, P. Chappell. Prototype Integrated Electric Thrusters for Work-Class Underwater Vehicles: Design Construction and Test, EPSRC Research Grant Report, 2000.
- [45]M. Lea et al., “Scale model testing of a commercial rim-driven propulsor pod” in *J. of Ship Prod.*, May 2003, Vol.19, N°2, pp.121-130
- [46] B. Van Blarcom, J. Hanhinen and F. Mewis, The Commercial Rim-Driven Permanent Magnet Motor Propulsor Pod, Ship Production Symposium, Boston MA, USA, Sept. 25.-26., 2002
- [47] P. Van Dine et al., Rim-Driven propulsion pod arrangement. US6837757 B2, 2005.
- [48] Ø. Krøvel, R. Nilssen, S.E. Skaar, E. Løvli, N. Sandoy, “Design of an integrated 100kW Permanent Magnet Synchronous Machine in a Prototype Thruster for Ship Propulsion” in CD Rom Proceedings of *ICEM'2004*, Cracow, Poland, Sept. 2004, pp.117-118
- [49] Richards, Eaton, Friesch, Lea, Thompson, Van Blarcom -Applicability of a rim drive POD for high speed ship propulsion in 7th conference on fast sea transportation-Napoly october 2003 6pp.
- [50] G. Kuiper, “The Wageningen propeller series, MARIN Publication 92-001, 1992
- [51] L. Drouen, F. Hauville, J.F. Charpentier, E. Semail, S. Clenet-, A coupled electromagnetic and hydrodynamic design model for an integrated rim-driven naval propulsion system- in CDROM Proceedings Electrimacs 2008 international conference, June 8-11, Québec, Canada.
- [52]R. Hebner, J. Beno, A. Wallis : « Flywheel Batteries : Come around again », IEEE Spectrum, avril 2002, pp. 46-51

- [53] N. Bernard : « Conception, dimensionnement et commande d'un moteur/générateur synchrone à excitation homopolaire et à bobinages dans l'entrefer pour accumulateur électromécanique d'énergie », thèse de doctorat de l'ENS Cachan, 17 décembre 2001.
- [54] C. Kerzrého : « Caractérisation et optimisation d'une batterie électromécanique sous chargement cyclique », thèse de doctorat de l'ENS Cachan, 8 janvier 2002.
- [55] H. BEN AHMED , B. MULTON , N. BERNARD , C. KERZREHO « Le stockage inertiel électromécanique » Revue 3EI n°48, mars 2007, pp. 18-29
- [56] G. ROBIN, M. RUELLAN, B. MULTON, H. BEN AHMED, P.Y. GLORENNEC, « Solutions de stockage de l'énergie pour les systèmes de production intermittente d'électricité renouvelable », Colloque SeaTechWeek 04 (Semaine Internationale des Technologies de la Mer), 20-21 oct. 04
- [57] Satish Samineni, Brian K. Johnson, Herbert L. Hess and Joseph D. Law « Modeling and Analysis of a Flywheel Energy Storage for System for Voltage Sag Correction » IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 42, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 2006 pp 42-52.
- [58] D. W. Swett and J. G. Blanche , « Flywheel Charging Module for Energy Storage Used in Electromagnetic Aircraft Launch System » IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 41, NO. 1, JANUARY 2005 pp 525-529
- [59] G. Bonizec. « Stockage inertiel d'énergie sur un réseau de bord de navire » Rapport de Master Recherche de l'INP Toulouse-IRENav 2008.
- [60] N. Boules. Two dimensionnal field analysis of cylindrical machines with permanent magnets excitation. IEEE Transactions on Industry Applications, IA-20(5), September/ October 1984. II.3.1
- [61] J. De La Ree et N. Boules. Induced voltage harmonic reduction of pm cylindrical machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 28(3) :619–624, May-June 1992. II.3.1
- [62] Ahmed Chebak, Philippe Viarouge and Jérôme Cros-« Analytical Model for Design of High-Speed Slotless Brushless Machines with SMC Stators » Proceedings of the International Conference on Electric Machines and Drives IEMDC'07, Turkey, May 2007, pp. 159-164.
- [63] A. Bellara, Y. Amara, G. Barakat and P. Reghem « Analytical Modelling of the Magnetic Field in Axial Flux Permanent Magnet Machines with Semi-Closed Slots at No Load » in CDROM ICEM 2010 Roma Italy 6-8 sept 2010 6pp.
- [64] E. Semail. Outils et méthodologie d'étude des systèmes électriques polyphasés. Généralisation de la méthode des vecteurs d'espace. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et des Technologies de Lille, 2000
- [65] Eric Semail et Xavier Kestelyn. Modélisation multi-machines d'une machine synchrone polyphasée. In EF'2001 (Electrotechnique du Futur), Nancy (France), 14-15 novembre 2001.
- [66] X. Kestelyn. Modélisation Vectorielle Multimachines pour la Commande des Ensembles Convertisseurs-Machines Polyphasées. Thèse de Doctorat, Université de Lille I, 2003.
- [67] E.A. Klingshirn. High phase order induction motor, part i and ii. IEEE Transactions Power Apparatus Systems, PAS - 102 :47–59, 1983.,
- [68] E.A. Klingshirn. Harmonic filters for six-phase and other multiphase motors on voltage source inverters. IEEE Transactions on Industry Applications, IA-21(4) :588–594, May/June 1985.
- [69] F. Scuiller, J.F. Charpentier, E. Semail, S. Clenet, 2007. - Comparison of two 5-phase Permanent Magnet machine winding configurations. Application on naval propulsion specifications - Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEEE-IEMDC '07 Volume1,3-5 May2007,pp.34-39
- [70] F. Scuiller, J.F. Charpentier, E. Semail, S. Clenet, 2006. - A global design strategy for multiphase machine applied to the design of a 7-phase fractional slot concentrated winding PM machine - in Proceedings (CDROM) XVIII International Congress on Electrical Machines ICEM 2006 Chania Greece Sept 2006 (6pp)
- [71] F. Scuiller, E. Semail, JF Charpentier S. Clenet, P. Letellier, 2006- Study of unconventional designs of multiphase PM Synchronous machines to increase the torque density for POD propulsion applications -in CDROM proceedings TPOD 2006 2nd International conference in technological advances in podded propulsion , Brest France , October 2006.
- [72] F. Scuiller, E. Semail, JF Charpentier, “Multi-star multi-phase winding for a high power naval propulsion machine with low ripple torques and high fault tolerant ability » 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Sept 1-3 2010 Lille France 6pp
- [73] F. Scuiller, E. Semail, J.F. Charpentier S. Clenet, P. Letellier, « Multi criteria based design approach of multiphase PM synchronous machine », - IET Electric Power applications Volume 3, Issue 2, March 2009 Page(s):102 – 110
- [74] M. R. Doyle, D. J. Samuel, T. Conway, and R. R. Klimowski, “Electromagnetic aircraft launch system EMALS”, IEEE Trans. Magn., vol. 31, pp. 528 533, Jan. 1995.
- [75] R. R. Bushway, “Electromagnetic aircraft launch system development considerations”, IEEE Trans. Magn., vol.37, pp. 52 54, Jan. 2001.

- [76] D. Patterson, A. Monti, C. Brice, R. Dougal, R. Pettus, D. Srinivas, K. Dilipchandra, and T. Bertonecelli, "Design and simulation of an electromagnetic aircraft launch system", 37th IAS Annual Meeting, IEEE, vol.3, pp. 1950- 1957, 2002.
- [77] J. Rios Quesada and J.F. Charpentier, "Finite difference study of unconventional structures of PM linear machines for electromagnetic aircraft launch system", IEEE Transactions on magnetics, vol. 41 n°1 pp 478-483, January 2005.
- [78] B. Reck, "First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range", IEEE Trans. Magn., vol. 39, pp. 310 313, Jan. 2003.
- [79] Gurol, H. "General Atomics Linear Motor Applications: Moving Towards Deployment", Proc of the IEEE, Nov 2009, Issue 11 pp 1864-1871
- [80] ZESHENG DENG, I.BOLDEA, AND S . A. NASAR Fields in Permanent Magnet Linear Synchronous Machines, IEEE trans Mag vol 22 n°2 march 1986 pp 107-112.
- [81] A. Foggia, "Méthode de calcul des inductances de fuite", Techniques pour l'Ingénieur D3 440
- [82] F. El Hadad, J Rios-Quesada, JF Charpentier , A new analytical tool for the systematic design of EMALS PM linear launch machine- All Electric Ship 2005 5th International symposium October 2005 Versailles France France (6p in CD rom Proceedings ISBN 2-912328-25-X)
- [83] A. Thoreux Etude de l'influence des effets de diverses disparités sur le fonctionnement et la stabilité d'un actionneur asynchrone. (MR INP Loraine ENSEM 2009) IRENav 2009.
- [84] Olivier GEOFFROY, « Physique des matériaux magnétiques », Techniques pour l'Ingénieur D2080.
- [85] Durand, « magnétostatique » Masson éditeurs 1953
- [86] J.F. Charpentier and G. Lemarquand, - "Calculation of ironless Permanent magnet coupling using semi-numerical magnetic pole theory method", Compel The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering Vol20 n°1 2001 pp 72-89
- [87] R. Ravaut, G. Lemarquand, and V. Lemarquand, Force and Stiffness of Passive Magnetic Bearings Using Permanent Magnets. Part 2: Radial Magnetization IEEE, Trans mag vol 45 issue 9 sept 2009 pp 3334 3342
- [88] R. Ravaut, G. Lemarquand, and V. Lemarquand, "Ironless permanent magnet motors: Three-dimensional analytical calculation" in CDROM IEMDC 2009-6 pp
- [89] Akoun, G.; Yonnet, J.-P "Analytical calculation of the forces exerted between two cuboidal magnets", IEEE Transactions on Magnetism, Volume 20, Issue 5, Sep 1984 Page(s):1962 – 1964
- [90] Fadli, N., J. Jennane, J.F. Charpentier and J. Rios-Quesada, 2004- "Semi-Analytical Study of 3 kinds of axial flux PM machine" - International Journal of applied electromagnetics and mechanics vol 19 n°1-4-2004: 299-302
- [91] T.N.L Patterson, 'On Some Gauss and Labotto based integration Formulae', Math. Comp., Vol. 22, pp. 877-881, 1968.
- [92] T.N.L Patterson -"The Optimum addition of points to quadrature formulae", Math Comp. Vol. 22, pp. 847-856. 1968
- [93] JF Charpentier, "Analytical and numerical study of a new kind of PM Brushless Motor with Trapezoidal EMF for Low cost and Low inertia applications- IEEE International Electrical machine and Drive Conference (IEMDC 2005) may 2005, San Antonio Texas (8p in CD rom Proceedings ISBN 0-78038988-3)
- [94] J. Rios-Quesada « Contribution à l'étude d'un alternateur monophasé à aimants permanents et stator en poudre de fer à faible encombrement axial »- Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale (10 octobre 2002)
- [95] J. Rios-Quesada, V. lemarquand, JF Charpentier, G. Lemarquand "Study of triangular winding alternators" IEEE Trans Mag Vol 38 n°2 pp 1361-1364
- [96] L. Drouen, J.F. Charpentier, E. Semail, S. Clenet,. - Study of an innovative electrical machine fitted to marine current turbines - IEEE-OCEAN 2007 Aberdeen Scotland June 2007 (6pp) in CD-Rom Proceedings
- [97] L. Drouen, J.F. Charpentier, E. Semail, S. Clenet- Investigations on the performances of the electrical generator of a rim-driven marine current turbine- in CDROM Proceedings of ICOE (International Congress on Ocean Energy ) Brest France 15-17 oct 2008
- [98] G. Xiong, S.A. Nasar, "Analysis of fields and forces in a permanent magnet linear synchronous machine based on the concept of magnetic charge", IEEE Transactions on magnetics, Vol. 25, N°. 3, May 1989
- [99] L. Drouen, JF Charpentier, E. Semail, S. Clenet-, « Modèle analytique intégrant des effets d'extrémités pour le prédimensionnement de machines courtes à grand entrefer » in CDROM proceedings Electrotechnique du Futur EF 09 UTC Compiegne 24 et 25 septembre 2009
- [100] F. Quénehervé : Etude, modélisation et prédimensionnement d'un système de propulsion navale magnétohydrodynamique (MR INP Toulouse ENSEEIHT 2005)

- [101] F. Quenhervé, JF Charpentier, Modélisation et Conception de propulseurs magnétohydrodynamique en eau de mer par des voies analytique- in CDROM proceedings Electrotechnique du Futur EF 07 Toulouse 6-7 sept 2007
- [102] AKAGI S. et al., Optimal design of thruster system for superconducting electromagnetic propulsion ship, Proceedings of the 5th International Marine Design Conference, mai 1994, p561 à 574.
- [103] THIBAUT J.-P., Propulsion magnétohydrodynamique en eau de mer, L'onde électrique, Vol. 75, n° 2, mars-avril 1995, p 19- 23
- [104] YAN L.G. et al., Progress of the MHD ship propulsion project in China, IEEE transactions on applied superconductivity, vol., n° 1, mars 2000, p 951 à 954
- [105] Gérard FILLIAU, Laurent MAZODIER, Alain BONDU Le navire tout électrique – Évolutions et systèmes de conduite D5620.
- [106] E.P. Furlani. Permanent magnet and electromechanical devices, Academic Press 2001
- [107] Giannini G.M., (1982), "Magnetic Couplings come of age", Mechanical Engineering, November issue, pp 54–56
- [108] J.F. Charpentier and G. Lemarquand,- Optimization of Unconventional P.M. Couplings , I.E.E.E. Transactions on Magnetics vol 38 n° 2 March 2002 pp 1093-1097
- [109]-J.F. Charpentier and G. Lemarquand, - Study of the mechanical behavior of axially magnetized Permanent Magnet Gears, , I.E.E.E. Transactions on Magnetics Vol 37 n° 3 May 2001 pp 1110-1118.
- [110]-J.F. Charpentier and G. Lemarquand,- Calculation of ironless Permanent magnet coupling using semi-numerical magnetic pole theory method, Compel The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering Vol20 n°1 2001 pp 72-89.
- [111]-J. F. Charpentier and G. Lemarquand, - A study of Permanent magnet couplings with Progressive magnetization using analytical exact formulation, IEEE trans. on Magnetics, Vol 35, no 5 September 1999 pp 4206-4217
- [112]-V. Lemarquand, J. F. Charpentier and G. Lemarquand, - Non Sinusoidal Torque of Permanent Magnet Couplings, I.E.E.E. Transactions on Magnetics, Vol 35, no 5 September 1999 pp 4200-4205 .
- [113]-J. F. Charpentier, G. Lemarquand - Optimal Design of cylindrical air-gap synchronous Permanent magnet Couplings, I. E.E. E. Transactions on Magnetics Vol 35 no 2 March 1999, pp 1037-1046.
- [114] J.F. Charpentier J. Jennane and N. Fadli ,-, Study of Ironless Permanent Magnet Devices being Both a Coupling and an Axial Bearing for Naval Propulsion, I.E.E.E. Transactions on Magnetics Vol 39 n°5 Sept 2003 pp 3235-3238
- [115] F. Bancel, "Fy and Fz forces between magnets," 1998, private communication, unpublished.
- [116] P. Eliès and G. Lemarquand, "Analytical optimization of the torque of a permanent magnet coaxial synchronous coupling," IEEE Trans. Magn., vol. 34, no. 4, pp. 2267–2273, Jul. 1998.
- [117] Hicham Allag and Jean-Paul Yonnet, 3-D Analytical Calculation of the Torque and Force Exerted Between Two Cuboidal Magnets, IEEE Trans Mag Vol 45 n° 10 pp 3969-3972
- [118][http://wwz.ifremer.fr/index.php/rd\\_technologiques\\_en/rd\\_technologiques/moyens/moyens\\_d\\_essais/bassin\\_a\\_houle\\_et\\_courant\\_de\\_boulogne\\_sur\\_mer](http://wwz.ifremer.fr/index.php/rd_technologiques_en/rd_technologiques/moyens/moyens_d_essais/bassin_a_houle_et_courant_de_boulogne_sur_mer) (consulté le 8/9/10)
- [119] L. Baldeck Evaluation de la faisabilité d'une hydrolienne à entraînement circconférentiel à géométrie par secteurs (MR INP Toulouse ENSEEIHT 2009) IRENav 2009.
- [120] Edrington, C.S.; Minor, S.P., "Design and Analysis of a 5-phase DSRM Drive," Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE , vol., no., pp.364-369, 9-12 Sept. 2007
- [121] Chiara Boccaletti, Ezio Santini, Leonardo Santini, Paolo Sordi, DESIGN AND MANUFACTURING OF A FOUR POLES SLOTLESS AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET MACHINE, in Proceedings of Speedam 2002, June 11-14 Ravello Italy, 6pp
- [122] Peethamparam Anpalahan, Design of Transverse Flux Machines using Analytical Calculations & Finite Element. Analysis. Licentiate Thesis, March 2001
- [123] Nicolas Dehlinger, Maxime R. Dubois, "Clawpole Transverse Flux Machines with Amorphous Stator Cores" in proceedings ICEM 08 Villamoura Portugal 6-9 sept 2008.
- [124] Nicolas Dehlinger, Maxime R. Dubois, A New Design Method for the Clawpole Transverse Flux Machine. Application to the Machine No-Load Flux optimization. Part I and II 12pp in ICEM 2010 proceedings Roma Italy 6-8 sept 2010
- [125] Paillard, B., Hauville, F., Astolfi, J.-A., "Evaluation of active variable pitch technologies as current turbines", In proceedings of World Renewable Energy Congress (WRECX) Glasgow juillet 2008
- [126] Tom Weier, Victor Shatrov, and Gunter Gerbeth Flow Control and Propulsion in Poor Conductors, in book "Magnetohydrodynamics Historical Evolution and Trends", Sergei Molokov, René Moreau and Keith Moffatt-Springer Netherlands-2007
- [127] Claudio Lindquist, Contrôle électromagnétique d'écoulements Études expérimentale et numérique sur le forçage d'écoulements initialement au repos et en tunnel hydrodynamique Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier Grenoble 2005

- [128] Tom Weier Tom Weier , Gunter Gerbeth and Gerd Mutschke “Control of Flow Separation Using Electromagnetic Forces” in *Flow, Turbulence and Combustion* 71 (2003), 5–17
- [129] F. Mekri, JF Charpentier, X. Kestelyn-« High Order Sliding mode optimal current control of Five Phase Permanent magnet Motor under Open Circuited phase Fault Conditions »- 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Sept 1-3 2010 Lille France.
- [130] Fatiha Mekri, Jean-Frederic Charpentier, Xavier Kestelyn, E. Semail Commande avec prise en compte de défauts d’ouverture de phase d’une machine pentaphasée à aimants associé à un onduleur de tension, EPF (Électronique de Puissance du Futur) 2010 -30 juin-2 juillet- Saint Nazaire.
- [131] F. Scuiller, E. Semail, JF Charpentier, “Multi-star multi-phase winding for a high power naval propulsion machine with low ripple torques and high fault tolerant ability » 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Sept 1-3 2010 Lille France
- [132] E. Levi. M. Jones, S.N. Vukosavic, H.A. Toliyat, "A Novel Concept of a Multiphase, Multimotor Vector Controlled Drive System Supplied From a Single Voltage Source Inverter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 2, March 2004, pp. 320-335.
- [133] E. Levi, M. Jones, S.N. Vukosavic, H.A. Toliyat, "A Five-Phase Two-Machine Vector Controlled Induction Motor Drive Supplied from a Single Inverter", *EPE Journal*, vol. 14, no. 12, August 2004, pp 38-48.
- [134] Semail E., Levi E., Bouscayrol A., Kestelyn X., "Multi-machine modelling of two series connected 5 phase synchronous machines: effect of harmonics on control," *Proc. of EPE 2005, European Conference Power Electronics and Applications*, 2005.
- [135] AUCHER Max. Hélices marines, *Techniques de l'ingénieur - B 4360*
- [136] Sareni, B.; Krahenbuhl, L.; Nicolas, A.; « Efficient genetic algorithms for solving hard constrained optimization problems » *IEEE Transactions on Magnetics*, Volume: 36 , Issue: 4 , Part: 1 July 2000 Page(s): 1027 – 1030
- [137] Bruno Sareni « Methodes d’optimisation Multimodales associées à la modélisation numérique en électromagnétisme » Thèse de Doctorat de l’Ecole Centrale de Lyon 20 janvier 1999.
- [138] T. V. Tran, S. Brisset, and P. Brochet, « A New Efficient Method for Global Discrete Multilevel Optimization Combining Branch-and-Bound and Space-Mapping », *IEEE Trans. Mag Vol 45 n° 3 march 2009* pp 1590-1593.
- [139] Hajji, O. ; Brisset, S. ; Brochet, P., « Comparing stochastic optimization methods used in electrical engineering », in *proceedings 2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 6pp
- [140] S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, "Modélisation et commande d'une hydrolienne équipée d'une génératrice asynchrone double alimentation" *EJEE (ex RIGE) volume 13 n°2/2010 avril 2010* pp 161-178.
- [141] Ben Elghali, S.E.; Benbouzid, M.E.H.; Charpentier, J.F.; Ahmed-Ali, T.; Munteanu, I.; “Experimental Validation of a Marine Current Turbine Simulator: Application to a PMSG-Based System Second-Order Sliding Mode Control » sous presse à paraître dans *IEEE Transactions on Industrial Electronics*
- [142] S. E. Ben Elghali, MEH Benbouzid, T. Ahmed-Ali, and JF Charpentier, « High-Order Sliding Mode Control of a Marine Current Turbine Driven Doubly-Fed Induction Generator » *IEEE- Journal on Oceanographic engineering*, Vol35 issue 2, April 2010, pp 402-411
- [143] S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, “Modeling and Control of a Marine Current Turbine Driven Doubly-Fed Induction Generator » *IET-Renewable Power Generation vol 4 issue 1 january 2010* pp1-11.
- [144] Marie Ruellan, “Méthodologie de dimensionnement d’un système de récupération de l’énergie des vagues”, Thèse de Doctorat de l’ENS Cachan, 11 décembre 2007.
- [145] Mark T. Brown, Matthew J. Cohen, Sharlynn Sweeney, “Predicting national sustainability: The convergence of energetic, economic and environmental realities”, *Ecological Modelling* 220, USA Octobre 2009, p. 3424 – 3438
- [146] Ana Nobre & al, “Geo-spatial multi-criteria analysis for wave energy conversion system deployment”, Elsevier Ltd., *Renewable Energy* 34 (2009) 97-111
- [147] Aro RAMAROTAFIKA- “ Etude d’outils d’évaluation du potentiel hydrolien d’un site en fonction des technologies de machines implantées »-Rapport de Master Recherche Arts et Métiers Paris-Tech IRENAV 2010
- [148] Nathalie Sillard, “ArcGIS v. 8.1 : Fonctionnalité”, Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), Centre d'Etudes et de Recherches en SIG (CERSIG), Juillet 2002

