

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BATNA

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Présentée pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR EN ELECTROTECHNIQUE

Par

Nabil IKHLEF

**MODELISATION NUMERIQUE D'UNE INSTALLATION
CONVERTISSEUR –PLASMA D'INDUCTION
EN VUE D'UNE COMMANDE OPTIMALE**

Soutenue publiquement le 15 Avril 2010

Devant le jury:

Mr. A. GUETTAFI	Professeur	U. Batna	Président
Mr. M. R. MEKIDECHE	Professeur	U. Jijel	Rapporteur
Mme. F-Z. LOUAI	Professeur	U. Batna	Examineur
Mr. M. E. H. LATRECHE	Professeur	U. Constantine	Examineur
Mr. M. S. MIMOUNE	Professeur	U. Biskra	Examineur
Mr. S. BOUKHETACHE	Maître de Conférences	U. Batna	Examineur

-2010-

Travaux Scientifiques Publiés Relatifs à cette Thèse

Publications de revues

1. **N. Ikhlef**, M. R. Mékidèche and O. Leroy, “ Cavity Effect on Power Absorbed by Plasma Microwave”, Revue Internationale de Génie Electrique (RIGEL), Vol 1, pp. 61-67, 2009.
2. **N. Ikhlef**, M. R. Mékidèche, O. Leroy and A. Kimouche,” 3D Electromagnetic Simulation of a Large Diameter Cylindrical Surface Wave Excited Plasma Reactor’’, COMPEL, Vol. 27, N° 5,pp.1069 – 1080, 2008.

Communications Internationales

1. **N. Ikhlef**, A. Rezig, O.Leroy and M.R. Mékidèche, "Electromagnetic phenomena in inductively torches systems with and without plasma”, XIV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, 10- 12 September (ISEF 2009), ARRAS, France
2. **N. Ikhlef**, M. Mékidèche, A.Rezig and O. Leroy,” The Nonlinear Modeling of Inductively Coupled Plasma Torches” International conference on Ecologic Vehicles & Renewable Energies,26-29 March 2009, Monaco, France
3. **N. Ikhlef**, O. Leroy and M. Mékidèche,”Modélisation électromagnétique d’un réacteur PEVCD de dépôt “ 10^{ème} congrès de la Division Plasma de la Société Française de Physique (SFP’08) 19-21 May 2008,Paris, France,
4. **N. Ikhlef**, M. Mékidèche, A.Rezig and O. Leroy,” Double Excitation Effect in a Microwave Plasma Resonant Cavity Reactor used for Thin Film Deposition”, 16th Conference on the Computation of. Electromagnetic Fields. COMPUMAG. 2007. June 24th - 28th. Aachen, Germany
5. **N. Ikhlef**, M. R. Mékidèche, A. Rezig, H. Allag, Z. Belli “ Etude Paramétrique des Grandeurs Electromagnétiques pour But d’Optimisation dans une Torche à Plasma Inductif”, 4th international conference on Electrical Engineering 07 – 08 November 2006; Batna, Algeria
6. **N. Ikhlef**, A. Rezig, H. Allag, Z. Belli, M. R. Mékidèche “Finite Elements Analysis of the Electromagnetic phenomena in a Plasma Torch”, 7th International Symposium on Electric and Magnetic Fields, EMF 2006, Jun 19-22, Aussois, France.
7. **N. Ikhlef**, M. Mékidèche, A.Rezig, “ modeling of electromagnetic fields in plasma devise ”, International Conference on Electrical Engineering and its Applications (ICEEA’06), 22-23 Mai (2006). Sidi Bel Abbes, Algeria

Remerciements

Louange à **Allah** qui a créé l'être humain et lui a appris à s'exprimer. De par sa grâce, nous avons commencé et fini cette thèse avec toutes les épreuves et difficultés traversées dans la quête du savoir. Nous en sommes reconnaissants et continuons infiniment à le remercier et le glorifier, Pureté a Lui.

Je suis reconnaissant à mon directeur de thèse, le Professeur **Mohamed Rachid MEKIDECHE** d'avoir accepté de diriger ma thèse, de son soutien, de la confiance qu'il a placée en moi et de toutes les choses que j'ai pu apprendre à ses côtés.

J'exprime toute ma gratitude à mes rapporteurs de thèse pour le temps consacré à l'évaluation de ce travail et pour la pertinence de leurs remarques et leurs suggestions.

Je voudrais remercier également, Pr. *Amor GUETTAFI* pour l'intérêt qu'il a témoigné en acceptant de présider mon jury.

Je voudrais remercier ceux qui m'ont accueilli au sein de leurs Laboratoires, LPGP particulièrement, Mr. *Olivier LEROY*. Je voudrais remercier aussi, tous les membres de Laboratoire LAMEL, de m'avoir offert un environnement propice pour mener à bien ce travail et Mrs: *M. KADJOU DJ* et *B. AZOUI* pour leurs aides.

Je voudrais remercier pour ces années passées au Laboratoire LAMEL tous ses membres pour la bonne humeur et la convivialité qui y régnait ainsi que les activités scientifiques très riches.

Enfin, ma profonde gratitude et toute ma reconnaissance, je l'exprime à mes parents et ma chère femme à qui je dédie ce travail. Je remercie ma mère et ma femme pour leur amour et leur patience et mon père pour sa présence et son encouragement. Mes remerciements s'adressent également à toute ma famille et tous mes amis particulièrement, *H. ALLAG* et *A. REZIG*. Un coucou plein d'amour à mes enfants, *Mohamed amine, Anfel et Amani*, et aux autres enfants de ma famille.

Sommaire

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENRALE	1
Chapitre I Plasmas et Torche à Couplage Inductif	
INTRODUCTION.....	6
I.1 Définition du Plasma.....	8
I.2 Génération d'un Plasma	8
I.2-1 Principe	8
I.2-2 Fréquences dans un plasma.....	9
I.3 Grandeurs Caractéristiques des Plasmas.....	10
I.3-1 Température des espèces.....	10
I.3-2 Taux d'ionisation.....	11
I.3-3 Longueur de Debye λ_D	12
I.3-4 Pression.....	12
I.4 Classification des Plasma.....	14
I.5 Technologie par Plasma.....	15
I.6 Les Plasmas Thermiques.....	15
I.6-1 Plasma à Couplage Direct (DCP)	16
I.6-2 Plasma à Couplage Inductif (ICP)	16
I.7 Les Torches ICP.....	17
I.7-1 Définition.....	17
I.7-2 Construction des torches ICP.....	17
I.7-3 Amorçage d'une torche ICP et Aspects électromagnétiques	19
a) Amorçage et puissance de maintien.....	19
b) Champ EM et épaisseur de peau.....	20
c) Couplage inducteur – induit.....	21
I.8 Paramètres Thermodynamiques d'un Plasma Inductif.....	23
I.8-1 Equilibre thermodynamique local.....	23
I.8-2 Les Propriétés thermodynamiques.....	24
a) La Composition.....	24
b) L'enthalpie.....	25

c) <i>La capacité calorifique</i>	25
I.8-3 Les Propriétés de Transport.....	26
a) <i>La Viscosité</i>	27
b) <i>La Conductivité thermique</i>	27
c) <i>La Conductivité électrique</i>	28
I.8-4 Propriétés Radiatives du Plasma.....	29
I.9 Les Installations des Torches ICP.....	31
I.9-1 Installations de forte puissance.....	31
I.9-2 Installations de faible puissance.....	32
I.10 Applications des Torches ICP.....	34
CONCLUSION.....	36

Chapitre II *Modélisation d'une Torche à Plasma Inductif*

INTRODUCTION.....	37
II.1 Description Mathématique d'un Plasma.....	39
II.2 La Magnétohydrodynamique (MHD)	39
II.3 Equations de Maxwell.....	39
II.3-1 Relations de continuité.....	41
a/ <i>Conditions aux interfaces</i>	41
b/ <i>Conditions aux limites naturelles</i>	41
II.3-2 Formulation du problème magnétodynamique.....	42
II.3-3 Le modèle magnétodynamique.....	42
II.3-4 Hypothèses.....	44
II.3-5 Formulation en coordonnées cylindriques axisymétriques.....	45
II.4 Équations de Conservation dans un Fluide Compressible.....	47
II.4-1 Définition.....	47
II.4-2 Fluide compressible.....	47
II.5 Equation de Conservation de La Quantité de Mouvement.....	47
II.5-1 Équation de conservation de masse ou équation de continuité.....	48
II.5-2 Formulation en coordonnées axisymétriques.....	49
II.5-3 Termes sources.....	50
II.6 Équation de la Thermique.....	50
II.6-1 Les modes de transfert thermique.....	51

II.6-2 Formulation vectorielle.....	51
II.6-3 Formulation en coordonnées cylindriques.....	52
II.6-4 Terme source.....	52
II.7 Récapitulatif des Equations de Modèle MHD et Hypothèses.....	53
II.8 Modèle Axisymétrique Simplifié d'une Torche à Plasma Inductif.....	55
II.9 Modèle Numérique.....	56
II.9-1 La méthode des éléments finis.....	57
II.9-2 Résolution des EDPs par la Méthode des Eléments Finis.....	59
II.9-3 Résolution du modèle magnétohydrodynamique par la MEF.....	59
II.10 Formulation Eléments Finis de l'Equation Electromagnétique.....	60
II.10-1 Formulation intégrale	61
II.10-2 Conditions aux limites.....	61
II.11 Formulation Eléments Finis de l'Equation d'Ecoulement.....	62
II.11-1 Formulation intégrale	62
II.11-2 Conditions aux limites.....	63
II.11-2-1 Entrée de l'applicateur.....	64
II.11-2-2 Parois interne de l'applicateur.....	64
II.11-2-3 Axe de l'applicateur.....	64
II.11-2-4 Sortie de l'applicateur.....	65
II.12 Formulation Elément Finis de l'Equation Thermique.....	66
II.12-1 Formulation intégrale	66
II.12-2 Conditions aux limites.....	67
II.12-2-1 Entrée de l'applicateur.....	67
II.12-2-2 Sortie de l'applicateur.....	67
II.12-2-3 Axe de l'applicateur.....	67
II.12-2-4 Parois internes de l'applicateur.....	68
II.13 Méthode de Résolution des Systèmes d'Equations Algébriques.....	70
II.14 Applications et Discussions des Résultats.....	71
II.14-1 Moyens et implémentation du modèle fort	71
II.14-2 Difficultés liées à la modélisation du modèle	72
II.14-2-1 Difficultés liées aux conditions aux limites.....	72

II.14-2-2 Difficultés liées à la présence du terme de transport dans l'équation de la température	71
II.14-2-3 Difficultés liées à la condition initiale.....	73
II.14-3 Description du modèle de la torche.....	73
II.14-4 Caractéristiques d'Applicateur (géométriques, physiques et électriques)	74
II.14-5 Résultats et Discussions.....	76
II.14-5-1 Etude électromagnétique.....	76
II.14-5-2 Etude de la température.....	86
II.14-6 Bilan de Puissance.....	92
CONCLUSION.....	95

Chapitre III Modélisation d'un Ensemble Convertisseur à Triode – Applicateur

INTRODUCTION.....	97
III.1 Principe de Fonctionnement de la Triode.....	99
III.2 Les Différentes Variantes de Schéma Electrique d'un Générateur à Triode.....	100
III.3 Principe de la Méthode d'Analyse.....	103
III.3-1 Schéma du montage étudié et hypothèses simplificatrices.....	103
III.3-2 Liste des notations utilisées.....	106
III.3-3 Fonctionnement de la triode dans le régime n°1.....	107
III.3-4 Fonctionnement de la triode dans le régime n°2.....	114
III.4 Simulation du Comportement de la Triode HF sous MATLAB.....	120
III.4-1 Etude du montage simplifié sans couplage.....	120
III.4-2 Schéma d'ensemble avec variante (a).....	123
III.5 Etude du Montage Simplifié après le Couplage.....	125
III.5-1 Simulation et interprétation.....	125
CONCLUSION.....	127

Chapitre IV Modélisation d'un Réacteur à Plasma Micro-onde (MO)

INTRODUCTION.....	128
IV.1 Dépôt par Voie Chimique Assisté par Plasma PECVD.....	129
IV.1-1 Les réacteur microonde PEVCD.....	130
IV.1-2 Description d'un réacteur PECVD existe au LPGP.....	131
IV.1-3 Intérêt des décharges micro-onde.....	133
IV.2 Plasmas Micro-onde Entretenus par Onde de Surface.....	134
IV.2-1 Onde de Surface (OS)	134
IV.2-2 Description diélectrique du Plasma.....	135
IV.2-3 Caractérisation énergétique de la décharge.....	139
IV.2-4 Bilan de puissance dans la décharge.....	139
IV.2-5 Modes de guide et modes plasma.....	141
a) Modes de guide.....	141
b) Modes plasma.....	142
IV.3 Résolution des Equations de Maxwell.....	144
IV.3-1 Equations de Maxwell sous forme intégrale.....	144
IV.3-2 La technique d'intégration finie FIT.....	144
IV.4 Résultats de Modélisation et Discussions	147
IV.4-1 Cas d'une simple excitation.....	149
IV.4-1-1 Etude sans plasma dans une structure de grand diamètre (120-125-160)	149
IV.4-1-2 Etude sans plasma dans une structure de petit diamètre (40-45-80)	155
IV.4-1-3 Etude avec plasma dans une structure de grand diamètre (120-125-160)	156
IV.4-1-4 Etude avec plasma dans une structure de petit diamètre (40-45-80)	159
IV.4-1-5 Influence de la densité électronique dans une de grand structure (120-125- 160)..	160
.....	160
a) Faible densité électronique.....	160

<i>b) Forte densité électronique.....</i>	162
IV.4-2 Cas de double excitation.....	164
IV.4-3 Influence des gradients de densité.....	166
<i>a) Comparaisons verticales.....</i>	168
<i>b) Comparaisons horizontales.....</i>	170
IV.4-4 Etude de puissance.....	171
IV.4-5 Résultats de mesure.....	173
CONCLUSION.....	175
CONCLUSION GENERALE.....	176
BIBLIOGRAPHIE.....	180
<i>Annexe I formules vectorielles.....</i>	<i>186</i>
<i>Annexe II Propriétés Thermodynamiques et de Transport de l'Argon.....</i>	<i>187</i>
<i>Annexe III Comparaison entre les Paramètres de Décharges RF et MO.....</i>	<i>190</i>
<i>Annexe IV Propagation des Ondes dans un Plasma à l'Intérieur d'un Caisson... ..</i>	<i>192</i>