



# MASTERE SYSTEMES ELECTRIQUES

**Coordinatrice du Mastère :** **ILHEM SLAMA-BELKHODJA**

Département Génie Electrique

Laboratoire des Systèmes Electriques

Tél. : (+216) 71 874 700 (Poste 448)

Fax : (+216) 71 872 729

[Ilhem.slama@enit.rnu.tn](mailto:Ilhem.slama@enit.rnu.tn)

## 1. Le Génie Electrique

Le Génie Electrique est un important secteur industriel englobant la production, le transport, la distribution, les applications et le contrôle de l'énergie électrique. Cette énergie est à la base de tous les développements techniques majeurs récents. Grâce à sa souplesse de transformation, son rendement élevé de conversion, sa facilité de transport, de distribution et ses aptitudes au contrôle aisé au moyen des techniques informatiques modernes, son champ d'application est de plus en plus large. L'énergie électrique prend de ce fait une part prépondérante dans tous les secteurs domestiques et industriels ainsi que dans les technologies de pointe.

## 2. Les Systèmes Electriques

Depuis une décennie, le tout électrique envahit de plus en plus les sociétés industrialisées. Les réseaux d'énergie électrique, les variateurs électriques et plus généralement les convertisseurs prennent une place de plus en plus importante (entraînements industriels, alimentation à bord des avions, bateaux, trains, automobiles et véhicules routiers ; électroménager ; robotique ; productique ; automatisation des procédés industriels ; transformation et traitement de la matière première au moyen de procédés électriques, ...)

L'étude de ces réseaux, variateurs et convertisseurs statiques implique un large éventail de connaissance allant de l'automatique à l'informatique en passant bien sûr par les convertisseurs statiques, les machines électriques et leurs entraînements électriques.

Une des responsabilités de la discipline est de relier ce large spectre de connaissances aux besoins de la société en générant des procédés d'analyse, de conception et de commande des systèmes électriques.

L'existence d'un Mastère Systèmes Electriques, servant de base à une formation doctorale, ouverte sur les besoins et les aptitudes des écoles d'ingénieurs sera d'un apport crucial en terme d'animation des laboratoires développant des activités à **caractère technologique prépondérant**.

## 3. Les objectifs et les débouchés de la formation

Le département de Génie Electrique de l'ENIT propose aux diplômés des écoles d'ingénieurs et des universités une formation dans le domaine de l'analyse, la conception et la commande des Systèmes Electriques, **par et pour la recherche (Mastère, Doctorats)**.

L'objectif de cette formation doctorale en Systèmes Electriques est de former des spécialistes de haut niveau dans le domaine et de répondre aux besoins de l'université et de l'industrie.

Les cours de ce Mastère conjuguent :

- *D'une part, l'approche fondamentale* requise par la connaissance des systèmes étudiés (modélisation et identification), des différents éléments les constituants, en particulier les



### Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénieur

convertisseurs statiques avec leurs composants, les systèmes de commande électronique et numérique,...

– *D'autre part, la maîtrise des techniques et procédés* qui déterminent la performance finale du produit (stratégie de commande, méthodes de diagnostic, implantation numérique,..). Ceci sans oublier les aspects d'environnement aussi bien du côté analyse des parasites et perturbations électromagnétiques générés par les convertisseurs statiques avec les cours de CEM, que du côté production avec les énergies renouvelables.

Cette formation permet à l'étudiant d'acquérir un savoir-faire de haut niveau dans les domaines considérés (Réseaux électriques, Variateurs de vitesse, convertisseurs statiques,..), et lui ouvre un large spectre de débouchés vers l'Université (enseignement supérieur, recherche) et vers l'industrie (dans les secteurs de la production et du transport de l'électricité, et également dans tous les domaines où l'électricité, l'électronique de puissance et la commande électrique prennent une part de plus en plus importante).

#### 4. Organisation des études

La formation du Mastère s'étale sur trois semestres, conformément aux textes de loi, le premier étant consacré aux cours, et les deux autres au mémoire d'initiation à la recherche, à la formation pédagogique, avec des conférences et des séminaires.

Les enseignements de mastère proprement dits démarrent mi-Septembre avec la rentrée des élèves ingénieurs de 3<sup>ème</sup> année et s'étalent sur le premier semestre de l'année universitaire.

Les étudiants inscrits au Mastère, dont le cursus passé aura comporté des enseignements couvrant une partie substantielle de l'un des modules proposés pourront être dispensés par la commission du Mastère sur présentation des justificatifs appropriés.

#### 5. Les enseignements

Les enseignements ne comportent pas d'option. Ils sont organisés en groupes de modules de cours dispensés lors du premier semestre.

Durant les deux semestres qui suivent, et pour ceux qui auront, à la fin du premier semestre, réussi aux épreuves des enseignements approfondis, des *séminaires d'initiation pédagogique, des conférences et Travaux d'Enseignements et de Recherche seront organisés*. Ils seront menés en parallèle avec la préparation du mémoire de recherche.

#### Groupe de modules :

Intitulé	Cours (h)
Modélisation et commande	78
Energie Electrique	93
Automatique	57
<i>Total</i>	<i>228</i>

Les enseignements sont assurés par des enseignants permanents de l' E.N.I.T., des enseignants permanents de l'Université Tunisienne.

Tous les enseignements ont lieu à l'E.N.I.T., Campus Universitaire El Manar.

#### 5.1 Séminaires et conférences

Dans le cadre des *formations à caractère pédagogique*, des conférences effectuées par des intervenants ayant une *grande expérience pédagogique* seront assurées. Elles auront pour objectif, outre que celui

### Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénieur

pédagogique, de donner un complément d'informations, une ouverture sur les travaux de recherche actuels et sur l'évolution technologique ainsi que les perspectives futures dans le domaine des Systèmes Electriques.

La liste de ces séminaires est affichée au début de l'année universitaire. Les étudiants y assistent et rédigent un compte rendu.

#### 5.2 Le mémoire du stage de recherche

Le projet de mémoire de mastère est réalisé, selon les textes en vigueur, après la réussite des examens du premier semestre. Il s'étale sur deux semestres.

Il relève d'un travail scientifique d'initiation à la recherche et d'approfondissement d'une problématique liée au Contrôle des Systèmes Electriques. Un intérêt particulier est donné à l'approche appliquée. De même qu'un lien avec l'environnement et en particulier le secteur productif est vivement souhaitable.

La commission du mastère, formée des enseignants intervenant dans la formation, examine chaque année, au moment opportun, les propositions de sujets de Mastère et autorise les stages. Le stage de Mastère est réalisé au sein d'un groupe de recherche ou dans un organisme économique sous la supervision d'un enseignant habilité par ladite commission.

#### 6. Stages d'initiation à la recherche- Laboratoires d'accueil

Dans le domaine des Systèmes Electriques, l'Unité de Recherche Systèmes Electriques, (L.S.E.) du département Génie Electrique de l'ENIT, constitue le noyau autour duquel le Mastère s'articule. Néanmoins il y a possibilité, avec accord du responsable de la formation et sous certaines conditions de faire le stage dans un autre laboratoire universitaire ou dans un laboratoire industriel, tunisien ou étranger.

#### 7. Qui peut postuler au Mastère Systèmes Electriques ?

Le Mastère est ouvert aux Ingénieurs Diplômés du Génie Electrique. Toutefois, d'autres candidatures en maîtrise et/ou en sciences de l'ingénieur, dont la formation est jugée compatible par la Commission du Mastère, seront examinées.

#### 8. Recrutement et déroulement des études

Le recrutement se fait, pour les élèves de 3<sup>ème</sup> année ENIT - Génie Electrique en fonction **de leur classement durant les années précédentes**, et pour les étudiants titulaires d'un diplôme d'ingénieur ou d'une maîtrise, **sur examen de dossier**.

Pour les élèves ingénieurs en 3<sup>ème</sup> année de l'ENIT, Génie Electrique, option Systèmes Electriques, et inscrits dans ce Mastère, la majorité des enseignements de leur formation d'ingénieur sont validés pour ce mastère : en effet, sur l'ensemble des cours du mastère *50% environ des cours coïncident pas avec les enseignements de la 3<sup>ème</sup> année GE, Option Systèmes Electriques. Les autres sont :*

Intitulé des cours ne coïncidant pas avec ceux de la 3 <sup>ème</sup> année GE-SE de l'ENIT	Volume horaire (h)
Adéquations convertisseurs-machines	15
Filtrage actif et Convertisseurs multiniveaux	21
Méthodologies de Conception et de Contrôle des Systèmes Electriques	9
Méthodologies de Conception et de Contrôle des Systèmes Electriques	9
Perturbations et modélisation des réseaux d'énergie	21
Systèmes Complexes	21
Systèmes non linéaires : Stabilité et Commande	21
Total	117



## Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénieur

**9. Le contrôle des connaissances.**

Le système d'évaluation est celui en vigueur à l'ENIT

**10. Effectifs prévisionnels**

La Commission de Mastère fixera l'effectif de la promotion selon la capacité d'encadrement réelle disponible.

**11. Les programmes des Cours**

	<b>Modules Modélisation et Commande : Intitulé des Cours</b>	Heures
MC1	Entraînements électriques à vitesse variable	21
MC2	Diagnostic des systèmes électriques	9
MC3	Adéquations convertisseurs-machines	15
MC4	Modélisation et calcul de champ	15
MC5	Méthodologies de Conception et de Contrôle des Systèmes Electriques	9
MC6	Fiabilité de fonctionnement des systèmes Industriels	9
Total		78

	<b>Modules Energie Electrique : Intitulé des Cours</b>	Heures
EE 1	Stabilité des Réseaux Electriques	15
EE 2	Perturbations des réseaux d'énergie	21
EE3	Alimentation à découpage	21
EE4	Filtrage actif et Convertisseurs multiniveaux	21
EE5	CEM	15
Total		93

	<b>Modules Automatique : Intitulé des Cours</b>	Heures
AU1	Réseaux de neurones et logique floue	15
AU2	Systèmes non linéaires : Stabilité et Commande	21
AU3	Systèmes Complexes	21
Total		57

## Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénieur

## 12. Les Programmes

	<i>Enseignements spécialisés</i>	C (h)
AU1	<p><b>Réseaux de neurones et logique floue</b></p> <p><i>Généralités</i> : Historique et problématique. - Les différentes approches (système expert, logique floue, réseau de neurones, etc...). - Les domaines d'application typiques des différentes techniques</p> <p><i>Réseaux neuronaux</i> : Principe, typologie, méthodes d'apprentissage. - Applications à la commande</p> <p><i>Logique floue</i> : Méthodes et techniques de raisonnement flou. Applications à l'identification, la commande et la supervision .</p>	15
AU2	<p><b>Systèmes non linéaires : Stabilité et Commande</b></p> <p>Introduction aux systèmes linéaires - Stabilité des systèmes non linéaires : construction des fonctions de Lyapunov , notions de passivité- Commande robuste - Commande par modes glissants - Méthode de synthèse récursive -</p>	21
AU3	<p><b>Systèmes Complexes</b></p> <p>Synthèse des régulateurs classiques ; Régulateurs RST</p> <p>Commande par approche modale : Placement de pôles par retour d'état- Placement de structure propre : gestion des modes et des couplages consignes/modes/états/sorties par placement des vecteurs propres. Retour de sortie - commande non interactive : indices caractéristiques, dynamique des zéros, compensateurs, dynamique inhérente</p> <p>Système à deux échelles de temps, description, interconnexion, modes rapides et modes lents, réduction de modèle, méthode d'agrégation et méthodes des perturbations, applications aux machines électriques</p> <p>Systèmes faiblement couplés, interconnexion, séparation, application aux réseaux d'énergie électrique.</p> <p>Stabilisation : Décentralisation, stabilisation des sous-systèmes par la localisations des pôles, stabilisation avec critères quadratiques, Indice de stabilité, conditions de stabilité du système global, stabilisation optimale, conditions d'optimalité, méthode du gradient.</p>	21
EE1	<p><b>Analyse des Réseaux Electriques</b></p> <p>Stabilité statique et stabilité transitoire : choix des modèles des générateurs et des charges. Modèles classiques de stabilités. Stabilité multimachines. Application au cas d'une machine reliée à un réseau infini : critère d'égalité des aires. Stabilité à long terme : simulation du comportement dynamique du réseau à l'échelle de minutes ou de dizaines de minutes après une perturbation. Modélisation : réglage primaire et secondaire de fréquence.</p>	15
EE2	<p><b>Perturbations et modélisation des réseaux d'énergie</b></p> <p>Ce cours décrit et analyse les différents types de perturbation pouvant affecter les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique : micro-coupures, flicker, harmoniques. Les différents types de défauts (courts circuits) sont également abordés, avant de passer à l'étude des principes de systèmes de protection. Des modèles spécifiques des éléments du réseau sont développés.</p>	21
EE3	<p><b>Alimentations à fréquence de découpage élevée</b></p> <p>Caractéristiques et commande des principaux semi-conducteurs actifs de puissance; Comportement thermique -fiabilité- Durée de vie</p> <p>Propriétés, calcul et dimensionnement des composants passifs : Inductance, capacités, transformateurs.</p> <p>Modes de commutation ZVS, ZCS -Etude des structures de conversion DC/AC et AC/AC - Convertisseurs haute fréquence DC/DC en mode ZVS et ZCS</p>	21

## Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénieur

EE4	<p><b>Filtrage actif et Convertisseurs multiniveaux</b></p> <p><i>Les limites du convertisseur de tension à deux niveaux :</i> Topologie - niveau de puissance et composants - niveau de la tension - niveau du courant à commuter - fréquence de découpage - spectre harmonique-limites en tension</p> <p><i>Structure des convertisseurs Haute tension (HT) - mise en série directe de composants avec commande synchrone - mise en série des convertisseurs via un transformateur- L'association en série des onduleurs monophasés – Les convertisseurs multiniveaux à neutre écrêtés - Les convertisseurs multiniveaux à cellules capacitatives imbriquées - Equilibrage des tensions des condensateurs - Tableau récapitulatif</i></p> <p><i>Commande des convertisseurs multi niveaux :</i>Commande des convertisseurs 3 Niveaux – Commande des convertisseurs multiniveaux à cellules capacitatives imbriquées - Commande à structure variable des onduleurs multiniveaux</p> <p><i>Filtrage actif - Références normatives - Filtrage passif - Filtrage série –Filtrage parallèle - Filtrage hybride - Les méthodes d'identification des harmoniques - Les lois de commande</i></p>	21
EE5	<p><b>Compatibilité électromagnétique</b></p> <p><i>Généralités sur la CEM :</i> sources de perturbations : naturelles (éclairs, décharges électrostatiques,..) humaines (transitoires,..)-</p> <p><i>Couplages :</i> conduits (modes commun, mode différentiel, impédance commune,... ) rayonnés (champ à fil, champ à boucle,..)</p> <p><i>Mesures :</i> conduits (RSIL ; sondes,..)-rayonnés (antennes, chambres de mesures,..) appareils (analyseur de spectre, récepteur de mesure..)</p> <p><i>Normes</i></p> <p><i>Remèdes à la Compatibilité Electromagnétique rayonnée (filtrage, blindage, masses, limiteurs,..)</i></p>	15
MC1	<p><b>Entraînements électriques à vitesse variable</b></p> <p><i>Généralités: Structure d'un Entraînement Electrique à Vitesse Variable (EEVV) :</i> Mise en évidence des contraintes et des exigences qui s'en suivent. Comparaison entre les différents types de machines usuelles de point de vue commande. Exemple d'applications industrielles</p> <p><i>Commande de la Machine à Courant Continu:</i> Stratégies de commande</p> <p><i>Caractérisation des machines alternatives à fréquence variable - Actionneur asynchrone (contrôles scalaire et vectoriel) - Actionneur synchrone (contrôle du couple, de la vitesse, de la position) -Contrôle direct du couple de la machine asynchrone (DSC et DTC)- Observation déterministe et stochastique des grandeurs non mesurables (flux, couple, vitesse)- Exemple de variateurs</i></p>	21
MC2	<p><b>Méthodes de diagnostic des Systèmes Electriques</b></p> <p><i>Généralités :</i> Terminologie et normes. Organisation générale de la procédure de diagnostic.</p> <p><i>Classification des méthodes de diagnostic:</i> Les différentes classifications (méthodes internes et externes ; méthodes inductives et déductives ; Méthodes de prétraitement de données, ..) Principes et domaines d'applications - Méthodes appliquées aux systèmes électriques</p> <p><i>Méthodes utilisant les modélisations fonctionnelles et matérielles</i> Introduction aux techniques d'analyse fonctionnelle Représentation du fonctionnement par arbres fonctionnels et matériels ; Analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE) ; Méthode de l'arbre de défaillance ; Autres méthodes issues des études de sûreté de fonctionnement</p> <p><i>Méthodes utilisant les de diagnostic par modélisation physique :</i> Méthode du modèle, Génération d'équations de redondance analytique, Génération de résidus à l'aide d'observateurs, Méthodes par identification paramétrique, Méthodes par estimation du vecteur d'état.</p> <p><i>Etude de cas :</i> Méthodes appliquées aux systèmes électriques –</p>	9



## Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénieur

MC3	<p><b>Adéquation structures électromécaniques et alimentation</b></p> <p>Eléments internes et externes d'un entraînement électrique; rôles et contraintes de fonctionnement des éléments; Principales structures d'ensembles convertisseurs – machines à courant alternatif ; facteurs d'interdépendances et fonctionnement optimal; paramètres de classification (types de semi-conducteurs; topologie des convertisseurs côté moteur et réseau; type de moteurs; stratégies de commande, niveau des tensions et des puissance, facteur de puissance, ondulation de couple, survitesse, possibilité de récupération).</p> <p>Evaluation des performances en fonction des critères et des objectifs d'applications. Eléments de dimensionnement. Etude de cas</p>	15
MC4	<p><b>Modélisation et calcul des champs</b></p> <p>Généralités : notion de modèles, méthodes d'approximations de fonctions, les méthodes de résolution des EDP- Méthodes des éléments finis - Equations du champ électromagnétique : classification et domaines d'applications, les différentes formulations; - Résolution des équations par la méthode des éléments finis Applications aux machines électriques - Association des équations électriques aux équations du champ</p>	15
MC5	<p><b>Méthodologies de Conception et de Contrôle des Systèmes Electriques</b></p> <p>Contexte de l'approche système en Génie Electrique : Présentation du formalisme Bond Graph (BG)- Conception par l'analyse et la simulation avec l'outil Bond Graph. Etude de cas : Etude des systèmes mono et multi - machines pour l'entraînement électrique à vitesse variable. Etude des systèmes de la production décentralisée de l'énergie électrique</p>	9
MC6	<p><b>Fiabilité de fonctionnement des systèmes Industriels</b></p> <p>Les Indicateurs de la sûreté de fonctionnement - (sensibiliser les élèves ingénieurs à l'utilité de la prise en compte des paramètres de la sûreté de fonctionnement lors de la conception et l'exploitation des systèmes industriels.)</p> <p><i>La fiabilité</i> : Définition, Les lois de survie et de dégradation, Taux de défaillance, MTBF et MTTF, Fiabilité Prévisionnelle, Fiabilité Opérationnelle, Courbe en baignoire</p> <p><i>Fiabilité des associations</i> association série, redondance active totale, redondance active partielle redondance majoritaire, redondance passive</p> <p><i>Les essais de fiabilité</i> Evaluation de la fiabilité prévisionnelle, Les plans d'essais</p> <p><i>Analyse de la fiabilité par les paramètres de Weibull</i> Définition des paramètres, Détermination graphique des paramètres de Weibull, Exemples d'applications</p> <p><i>La maintenabilité</i> Définition , Taux de réparation, MTTR</p> <p><i>Disponibilité</i> Définition, Calcul de disponibilité ( application des chaînes de Markov), Disponibilité intrinsèque</p> <p>AMDEC Analyse des modes de défaillance de leur effets et leur Criticité) Arbre de défaillance et AMDEC – Arbre de défaillance</p>	9
Total		228