

## MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

### Langue principale d'enseignement :

Français  Anglais  Arabe

Campus où le programme est proposé : CST

### OBJECTIFS

---

Ce Master vise à former :

- Des enseignants et des chercheurs
- Des spécialistes de haut niveau dans les diverses administrations concernées et bureaux d'études
- Des chercheurs étrangers : en raison de l'importance des problèmes abordés, l'ouverture à des étudiants étrangers du bassin méditerranéen peut amener une synergie favorable à une meilleure utilisation commune des ressources.

### COMPÉTENCES

---

- Identifier, formuler et résoudre des problèmes complexes d'ingénierie en appliquant les principes d'ingénierie, de sciences et de mathématiques.
- 1) Appliquer les méthodes de conception d'ingénierie pour produire des solutions qui répondent à des besoins spécifiés, tout en tenant compte de la santé publique, de la sécurité et du bien-être, ainsi que de facteurs globaux, culturels, sociaux, environnementaux et économiques.
  - 2) Communiquer efficacement avec des publics variés.
  - 3) Reconnaître les responsabilités éthiques et professionnelles dans des situations d'ingénierie et formuler des opinions critiques qui doivent prendre en compte l'impact des solutions d'ingénierie dans des contextes globaux, économiques, environnementaux et sociétaux.
  - 4) Fonctionner efficacement dans une équipe dont les membres assurent ensemble le leadership, créent un environnement collaboratif et inclusif, établissent des buts, planifient des tâches et atteignent des objectifs.
  - 5) Développer et mener des expériences appropriées, analyser et interpréter des données et utiliser un jugement d'ingénieur pour tirer des conclusions.
  - 6) Acquérir et appliquer de nouvelles connaissances au besoin, en utilisant des stratégies d'apprentissage appropriées.

### CONDITIONS D'ADMISSION

---

Les candidats sont sélectionnés suite à l'étude du dossier fourni par l'étudiant.

- Admission au premier semestre du Master (M1) pour les candidats titulaires d'une licence en physique, électricité, électronique, électrotechnique, électromécanique, ou d'un diplôme équivalent.
- Admission au troisième semestre du Master (M3) pour les ingénieurs diplômés en génie électrique, les titulaires d'une maîtrise ou d'un master en physique, électricité, électronique, électrotechnique, électromécanique.
- Admission au troisième semestre du Master (M3) pour les étudiants de troisième année de génie électrique de l'ESIB (cinquième année d'études supérieures).
- Les titulaires d'un diplôme reconnu équivalent.

La sélection des candidats est faite par un jury d'admission dans la limite des places disponibles.

### UE/CRÉDITS ATTRIBUÉS PAR ÉQUIVALENCE

---

Les ingénieurs diplômés en génie électrique, les titulaires d'une Maîtrise ou d'un Master en physique, électricité, électronique, électrotechnique, électromécanique, les étudiants en cinquième année GE à l'ESIB et les titulaires d'un diplôme équivalent reconnu, peuvent valider par équivalence un maximum de 60 crédits du programme :

sur proposition du directeur du Département des études doctorales, le jury d'admission fixera pour chaque étudiant admis directement en M3, les matières et modules validés en fonction de son cursus et de ses résultats préalables et définira son parcours au Master dans la spécialité concernée, incluant éventuellement des matières complémentaires pré-requises. La proposition de la validation de la formation antérieure est soumise à l'approbation de la commission des équivalences de l'USJ.

## EXIGENCES DU PROGRAMME

### UE obligatoires (120 crédits)

Convertisseurs autonomes 1 (6 Cr.). Capteurs et instrumentation (4 Cr.). Mini projet 1 (6 Cr.). Machines électriques 2 (6 Cr.). Systèmes à microprocesseurs (4 Cr.). Systèmes et commandes numériques (4 Cr.). Anglais (4 Cr.). Analyse des réseaux électriques (4 Cr.). Convertisseurs autonomes 2 (4 Cr.). Commande temporelle (4 Cr.). Entraînements à vitesse variable (6 Cr.). Mini projet 2 (8 Cr.). Architecture des systèmes numériques (4 Cr.). BE Commande avancée des machines (2 Cr.). BE électronique de puissance avancée (2 Cr.). Commande avancée des machines électriques (4 Cr.). Électronique de puissance avancée (4 Cr.). Modélisation et commande des convertisseurs statiques (4 Cr.). Réseaux électriques à sources distribuées (4 Cr.). Stockage de l'énergie (4 Cr.). BE techniques de commandes avancées (2 Cr.). Mémoire de recherche (30 Cr.).

## PLAN D'ÉTUDES PROPOSÉ

### Semestre 1

| Code      | Intitulé de l'UE  | Crédits   |
|-----------|---|-----------|
| 020CA1MM1 | Convertisseurs autonomes 1  | 6         |
| 020CE1MM1 | Capteurs et instrumentation   | 4         |
| 020GE1MM1 | Mini projet 1 : validé par équivalence pour les étudiants de l'ESIB | 6         |
| 020ME2MM1 | Machines électriques 2  | 6         |
| 020SCNMM1 | Systèmes et commandes numériques                                    | 4         |
| 020SMPMM1 | Systèmes à microprocesseurs   | 4         |
|           | <b>Total</b>  | <b>30</b> |

### Semestre 2

| Code      | Intitulé de l'UE  | Crédits   |
|-----------|---|-----------|
| 020ANGMM2 | Anglais   | 4         |
| 020ANRMM2 | Analyse des réseaux électriques                                     | 4         |
| 020CA2MM2 | Convertisseurs autonomes 2  | 4         |
| 020CTMMM2 | Commande temporelle   | 4         |
| 020EVVMM2 | Entraînements à vitesse variable                                    | 6         |
| 020GE2MM2 | Mini projet 2 : validé par équivalence pour les étudiants de l'ESIB | 8         |
|           | <b>Total</b>  | <b>30</b> |

### Semestre 3

| Code      | Intitulé de l'UE                                      | Crédits   |
|-----------|---|-----------|
| 020ASNMM3 | Architecture des systèmes numériques                  | 4         |
| 020BCMMM3 | BE Commande avancée des machines                      | 2         |
| 020BEPMM3 | BE éElectronique de puissance avancée                 | 2         |
| 020CAEMM3 | Commande avancée des machines électriques             | 4         |
| 020EPAMM3 | Électronique de puissance avancée                     | 4         |
| 020MCCMM3 | Modélisation et commande des convertisseurs statiques | 4         |
| 020RSDMM3 | Réseaux électriques à sources distribuées             | 4         |
| 020STEMM3 | Stockage de l'énergie                                 | 4         |
| 020BCAMM3 | BE techniques de commandes avancées                   | 2         |
|           | <b>Total</b>  | <b>30</b> |

### Semestre 4

| Code      | Intitulé de l'UE                | Crédits   |
|-----------|---------------------------------|-----------|
| 020MGEMM4 | Stage de recherche avec mémoire | 30        |
|           | <b>Total</b>                    | <b>30</b> |

## DESCRIPTIFS DES UE

### Semestre MR1

|  |                                    |              |
|--|------------------------------------|--------------|
| <b>020CA1MM1</b>   | <b>Convertisseurs autonomes 1</b>  | <b>6 Cr.</b> |
| <p>Généralités. Rappel sur les familles de convertisseurs. Place des convertisseurs autonomes dans les applications industrielles. Rappel sur les principaux semi-conducteurs de puissance utilisés dans les convertisseurs autonomes : structure, caractéristiques statiques et dynamiques, circuits de protection et d'aide à la commutation, circuit de commande. Variateurs à courant continu. Hacheurs série et parallèle. Application à la commande en vitesse d'un moteur à courant continu. Alimentations à découpage non-isolées. Hacheurs abaisseurs, élévateurs et inverseurs. Fonctionnement en conduction continue et discontinue. Alimentations isolées. Forward à un interrupteur. Forward asymétrique. Forward à sorties multiples. Push-pull série. Push-pull parallèle. Push-pull en pont complet. Fly-back à une ou plusieurs sorties, en continuité ou en discontinuité de flux. Onduleurs monophasés. Onduleur avec un transformateur à point milieu. Onduleur en demi-pont. Onduleur en pont complet. Onduleurs triphasés. Onduleurs multi-niveaux.</p>  |                                    |              |
| <b>020CE1MM1</b>   | <b>Capteurs et instrumentation</b> | <b>4 Cr.</b> |
| <p>Généralités : principes fondamentaux, corps d'épreuve, grandeurs d'influence, caractéristiques métrologiques (erreurs, sensibilité, rapidité). Conditionneurs de capteurs passifs : montage potentiométrique, pont de Wheatstone, oscillateurs. Conditionneur du signal : analyse spectrale, chaîne de mesure, adaptation, linéarisation, amplification, réduction de la tension de mode commun, détection de l'information des signaux modulés en amplitude ou en fréquence. Capteurs optiques : propriétés de la lumière, cellule photoconductrice, photodiode, phototransistor. Capteurs de température : thermométrie par résistance, thermométrie par diode et transistor, thermométrie par thermocouple. Capteurs tachymétriques : généralités, tachymètre à courant continu, tachymètres à courant alternatif, tachymètre à réductance variable, tachymètre optique. Capteurs de position et de déplacement : potentiomètre résistif, capteurs inductifs, microsyn, capteurs capacitifs, montages de mesure, capteurs digitaux, codeurs absolus, générateur incrémental optique. Capteurs de force, pesage et couple : capteurs piézoélectriques, capteurs à magnétostriction.</p> |                                    |              |
| <b>020GE1MM1</b>   | <b>Mini projet 1</b>               | <b>6 Cr.</b> |
| <p>Réaliser un mini projet dans l'une des disciplines du semestre MR1.</p>   |                                    |              |

|                  |                               |              |
|------------------|-------------------------------|--------------|
| <b>020ME2MM1</b> | <b>Machines électriques 2</b> | <b>6 Cr.</b> |
|------------------|-------------------------------|--------------|

Ce cours s'articule autour de quatre axes : I) Transformateurs : étude des transformateurs spéciaux - Transformateurs en régime déséquilibré - Régimes transitoires des transformateurs - Fonctionnement en parallèle des transformateurs - Applications sous MATLAB. II) Machines à courant continu : Mise en équation de la MCC en régime transitoire - Exploitation des équations en régime transitoire non saturé. III) Machines asynchrones : fonctionnement en génératrice et en frein - Machines asynchrones spéciales : monophasées, à double cage et à encoches profondes - Modélisation de la machine asynchrone en régime transitoire et applications. IV) Machines synchrones : rappels sur les champs tournants - Modélisation dynamique des machines synchrones : à pôles lisses, à pôles saillants, avec ou sans amortisseurs - Étude du régime transitoire en mode alternateur et applications.

|                 |                                    |              |
|-----------------|------------------------------------|--------------|
| <b>020MPMM1</b> | <b>Systèmes à microprocesseurs</b> | <b>4 Cr.</b> |
|-----------------|------------------------------------|--------------|

Architecture - Microprocesseurs à usage général - Processeurs de traitement numérique du signal DSP - Microcontrôleurs - Mémoires - Dispositifs d'entrées/sorties - Modes d'échanges d'informations - Microcontrôleurs - Processeurs de traitement numérique du signal - Programmation - Exemples de processeurs disponibles sur le marché.

|                  |   |              |
|------------------|---|--------------|
| <b>020SCNMM1</b> | <b>Systèmes et commandes numériques</b> | <b>4 Cr.</b> |
|------------------|---|--------------|

Modélisation : structure, organes et fonctionnement d'un système de commande discret – Transformées en Z directe, inverse et modifiée – Fonction de transfert discrète – Échantillonnage asynchrone et multiple. Analyse et commande des systèmes discrets : Stabilité (asymptotique et BIBO) – Critères de stabilité (Jury et Nyquist) – Stabilité par transformation homographique (Routh et Nyquist) – Réponse indicelle et fréquentielle d'un système échantillonné – Théorème de Shannon – Performances (poursuite et rejet des perturbations et des bruits) – Robustesse (marges de gain et de phase) – Discrétisation des lois de commande analogiques. Conception de la commande : par le lieu d'Evans, par transformation homographique, par approximation pseudo-continue, par déduction (Algorithme de Kalman).

### Semestre MR2

|                  |                |              |
|------------------|----------------|--------------|
| <b>020ANGMM2</b> | <b>Anglais</b> | <b>4 Cr.</b> |
|------------------|----------------|--------------|

Amener les étudiants à maîtriser l'anglais en vue de faciliter leur future insertion dans le milieu professionnel.

|                  |  |              |
|------------------|--|--------------|
| <b>020ANRMM2</b> | <b>Analyse des réseaux électriques</b> | <b>4 Cr.</b> |
|------------------|--|--------------|

Généralités sur les réseaux de distribution de l'énergie électrique. Historique. Rappel sur les concepts énergétiques. Bases de calcul et valeurs réduites. Modélisation d'un réseau électrique. Composants d'une ligne électrique. Calcul des résistances, inductances et capacités linéiques. Effets de la fréquence. Notions de Circular Mil, GMR et GMD. Caractéristiques des conducteurs d'aluminium renforcés d'acier (ACSR). Étude des lignes en régime permanent. Modèle nominal en  $\pi$  d'une ligne. Pertes de puissance. Rendement. Régulation de tension. Impédance caractéristique et puissance caractéristique d'une ligne. Écoulement de puissance. Compensation réactive. Étude des défauts de court-circuit. Composantes symétriques. Séquences directe, inverse et homopolaire. Application à l'étude de la stabilité. Choix des disjoncteurs. Surtension et coordination de l'isolement. Isolation externe et interne. Prise en compte de la pollution. Méthodes statistiques et semi-statistiques. Réseau de transport à courant continu. Avantages et faiblesses. Principaux composants. Fonctionnement. Commande et réglage. Étude des grands réseaux. Représentation matricielle. Matrice d'admittance nodale. Techniques de résolution numérique. Algorithmes de Gauss-Seidel et de Newton-Raphson. Simulations numériques des grands réseaux sous MATLAB.

|                  |                                   |              |
|------------------|-----------------------------------|--------------|
| <b>020CA2MM2</b> | <b>Convertisseurs autonomes 2</b> | <b>4 Cr.</b> |
|------------------|-----------------------------------|--------------|

Techniques de commande appliquées aux convertisseurs autonomes. Rappel sur les limitations de la commande pleine onde. Commande MLI sinus-triangle. Principes de la sur-modulation. Commande unipolaire et bipolaire d'un pont monophasé complet. Modulation phase par phase d'un onduleur triphasé. Modulation suboptimale. Modulation partielle. Modulation vectorielle d'un onduleur triphasé. Modulation pré-calculée. Commande d'un onduleur en pont monophasé par déphasage des commandes des deux demi-ponts. Modulation sigma-delta et modulation delta. Notes sur le filtrage des grandeurs électriques d'entrée et de sortie. Dimensionnement des filtres. Modélisation mathématique des convertisseurs autonomes. Techniques de modélisation des convertisseurs autonomes. Méthode des générateurs moyens. Méthode du modèle d'état moyen. Méthode de la série de Fourier. Linéarisation. Modèles statique et dynamique en « petits signaux ». Fonctions de transfert.

Réglage des convertisseurs autonomes. Réglage linéaire par boucles en cascade. Choix des paramètres des régulateurs. Détermination du pire cas pour la commande. Simulations numériques. Vérification des performances. Imperfections de fonctionnement. Saturation de commande.

|                  |                            |              |
|------------------|----------------------------|--------------|
| <b>02oCTMMM2</b> | <b>Commande temporelle</b> | <b>4 Cr.</b> |
|------------------|----------------------------|--------------|

Le cours de commande temporelle est articulé autour de deux grands axes : I) Analyse temporelle : Équations d'état – Linéarisation – Réponses et matrices de transfert – Réalisation sous forme de contrôlabilité, d'observabilité et de Jordan – Définitions et critères de la contrôlabilité et de l'observabilité – Condition de simplification d'un zéro par un pôle et réalisation minimale. II) Commande par retour d'état : placement des pôles avec minimisation de l'erreur et intégration – Observateur d'état – Commande quadratique et filtre de Kalman.

|                  |   |              |
|------------------|---|--------------|
| <b>02oEVVMM2</b> | <b>Entraînements à vitesse variable</b> | <b>6 Cr.</b> |
|------------------|---|--------------|

Nécessité de la vitesse variable. Machine à courant continu à vitesse variable : réversibilité totale, convertisseur quatre quadrants sans circulation de courant, boucle de courant, boucle de vitesse. Modélisation et types d'alimentations du moteur asynchrone : équations en valeurs réduites, modèle simplifié à fréquences élevées, commande en tension, commande en courant, convertisseurs associés au moteur asynchrone. Commandes scalaire, vectorielle et DTC de la machine asynchrone. Modélisation de la machine synchrone en vue de la commande. Alimentation par le réseau triphasé. Commande en couple de la machine synchrone : autopilotage et commande vectorielle. Commande en vitesse de la machine synchrone. Bureau d'études sur MATLAB/Simulink.

|                  |                      |              |
|------------------|----------------------|--------------|
| <b>02oGE2MM2</b> | <b>Mini projet 2</b> | <b>8 Cr.</b> |
|------------------|----------------------|--------------|

Réaliser un mini projet dans l'une des disciplines du semestre MR2.

### Semestre MR3

|                  |   |              |
|------------------|---|--------------|
| <b>02oASNMM3</b> | <b>Architecture des systèmes numériques</b> | <b>4 Cr.</b> |
|------------------|---|--------------|

Présentation des FPGA et du VHDL synthétisable. Machines d'état. Applications. Méthode Adéquation Algorithme Architecture.

|                  |   |              |
|------------------|---|--------------|
| <b>02oBCMMM3</b> | <b>BE Commande avancée des machines</b> | <b>2 Cr.</b> |
|------------------|---|--------------|

Bureau d'études de dimensionnement d'une chaîne de conversion d'énergie correspondant à l'entraînement à vitesse variable d'une charge mécanique donnée. Le travail consiste à choisir le moteur d'entraînement, le (s) convertisseur (s) associé(s) ainsi que la méthode de commande la mieux adaptée à la charge mécanique. Le dimensionnement complet de la chaîne est validé par des simulations permettant de vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble. Application de la commande prédictive à la machine synchrone à aimants permanents, comparaison des performances avec une commande classique à base de régulateurs PI.

|                  |   |              |
|------------------|---|--------------|
| <b>02oBEPMM3</b> | <b>BE Électronique de puissance avancée</b> | <b>2 Cr.</b> |
|------------------|---|--------------|

Bureau d'études de conception, commande, simulation et analyse de convertisseurs pour l'amélioration de la qualité d'énergie dans les réseaux électriques.

|                  |  |              |
|------------------|--|--------------|
| <b>02oCAEMM3</b> | <b>Commande avancée des machines électriques</b> | <b>4 Cr.</b> |
|------------------|--|--------------|

Contrôle vectoriel des actionneurs asynchrones. Commande directe du couple DTC. Fonctionnement sans capteurs. Mesure et observation des grandeurs non mesurables. Calculs de régulateurs et d'observateurs. Autopilotage et commande vectorielle des actionneurs synchrones. Implantation numérique : CAN, capteurs, retards, filtres, etc. Commande en vitesse et en position.

|                  |  |              |
|------------------|--|--------------|
| <b>02oEPAMM3</b> | <b>Électronique de puissance avancée</b> | <b>4 Cr.</b> |
|------------------|--|--------------|

Pollution harmonique des réseaux électriques. Compensation active. Modélisation et commande des convertisseurs. Circuits de correction du facteur de puissance. Cas d'un Boost, d'un SEPIC et d'un convertisseur de Sheppard-Taylor. Redresseurs triphasés non polluants. Redresseur quatre-quadrants. Redresseur de Vienne. Redresseurs à injection de courant. Filtres actifs et hybrides.

**020MCCMM3 Modélisation et commande des convertisseurs statiques****4 Cr.**

Modélisation instantanée et aux valeurs moyennes, modèles échantillonnés. Commande en PWM et en amplitude des convertisseurs statiques, cas des onduleurs triphasés de tension. Comparaisons de différentes lois de modulation. Lois de commande pour les redresseurs MLI monophasé et triphasés en absorption sinusoïdale (3 axes, 2 axes, DPC, etc.). Commande des filtres actifs parallèles (contrôle du réactif et des harmoniques). Lois de commande prédictives pour les convertisseurs : application aux convertisseurs DC-DC et AC-DC.

Application de BE – Commande d'un PFC dans le cadre d'une structure cascade à l'aide de MATLAB-SIMULINK.

**020RSDMM3 Réseaux électriques à sources distribuées****4 Cr.**

Génération distribuée : définition, avantages, réseaux intelligents, rôle de l'électronique de Puissance, stockage de l'énergie. Convertisseurs statiques dans les réseaux distribués : familles de convertisseurs, applications, semi-conducteurs de puissance. Connectivité des sources photovoltaïques au réseau. Connectivité des sources éoliennes au réseau. Techniques de commande et de régulation. Qualité d'énergie et filtrage. Compensateurs statiques ou FACTS. Méthodes numériques pour le calcul de l'écoulement des puissances. Stabilité transitoire.

**020STEMM3 Stockage de l'énergie****4 Cr.**

Problématiques du stockage d'énergie, l'énergie électrique comme vecteur. Électricité : transport aisé mais stockage problématique. Ordres de grandeur (puissances massique et volumique) - Contextes applicatifs (stationnaire et véhicules). Stockage stationnaire (cas de figures, intérêts, enjeux) - Technologies disponibles. sources primaires (piles). ccumulateurs (électrochimiques, électromagnétiques, mécaniques. Les performances, question de technologie mais aussi de gestion.

Étude de cas I : Adéquation production/consommation dans une habitation (îlotage). Fluctuations de production (éolien, solaire). Fluctuations de consommation. Inadéquation horaire production/consommation et stockage.

Étude de cas II : Optimisation d'un réseau de bord d'avion (alimentation des actionneurs d'un train d'atterrissage). Structure d'un réseau de bord d'avion. Quelques ordres de grandeur (puissances mises en jeu, tensions, courants, taille, etc.). Optimisation du poids embarqué (stockage local vs section des câbles). Structure de puissance autour d'un train d'atterrissage à actionneurs électriques. Contrôle du système.

Étude de cas III : Le pack de batteries d'un véhicule (BMS, équilibrage de charge, ...). Batteries pour véhicules électriques (avantages et inconvénients). Gauge d'énergie : une nécessité et un sérieux problème suivant la technologie. La batterie : un composant complexe à modéliser. Modélisation, caractérisation et identification en temps réel - Packs de batteries, dispersion de caractéristiques et équilibrage des cellules. Structure globale de la gestion d'un pack de batteries : le BMS - La vie d'une batterie et ses indicateurs. Vers la charge rapide : enjeux et difficultés.

**020BCAMM3 BE Techniques de commandes avancées****2 Cr.**

Commandes quadratiques. Commandes prédictives. Application de la commande prédictive sur un système du 2<sup>nd</sup> ordre.

**Semestre MR4****020MGEMM4 Mémoire de recherche****30 Cr.**

Il constitue une initiation aux techniques de la recherche. C'est la synthèse d'un travail de recherche de quatre mois dans un centre de recherche ou un laboratoire.