



المدرسة الوطنية للمهندسين بتونس

école nationale d'ingénieurs de Tunis

# Mastère Génie Mécanique

Université Tunis El Manar

Etablissement : ENIT : BP.37 –1002 Tunis le Belvédère - Tel :71 874 700 –Fax : 71 872 729, <http://www.enit.rnu.tn>

Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénieur, Tél :(+216) 71 874 700 (Postes 572 & 598) courriel : [ecole.doctorale@enit.rnu.tn](mailto:ecole.doctorale@enit.rnu.tn)

Coordinateur du Mastère : **Jamel BESSROUR**

Département Génie Mécanique

Unité de Recherche Mécanique Appliquée, Ingénierie et Industrialisation (MA2I)

ENIT : BP.37 –1002 Tunis le Belvédère

Tel : 71 874 700 (Poste 510)–Fax 71 872 729 –

[jamel.bessrou@enit.rnu.tn](mailto:jamel.bessrou@enit.rnu.tn)

## 1. Motivations et objectifs

La formation par la recherche scientifique et technique est actuellement dans une phase d'évolution très rapide. L'ouverture sur l'environnement socio-économique et industriel et la nécessité de suivre l'évolution rapide des technologies font de la recherche scientifique et technique dans le domaine du génie mécanique une nécessité et devrait lui conférer un rôle important dans les processus de transferts et de développements technologiques. En particulier, dans le monde actuel de libéralisation économique et d'ouverture totale, le développement des divers secteurs industriels doit s'appuyer sur des structures de recherche solides et capables de contribuer efficacement à la résolution des problématiques industrielles. Les industries mécaniques tunisiennes, en pleine croissance actuelle, ont besoin d'investir dans la recherche-développement pour atteindre le niveau de compétence standard international. En outre, les activités de recherche et développement qui créent des liens très utiles entre le monde universitaire et l'environnement industriel permettent également aux élèves de contribuer au développement des technologies avancées et de développer leur savoir et savoir-faire.

C'est dans cette perspective que veut se positionner le programme du mastère de génie mécanique de l'ENIT, avec pour objectifs une formation par la recherche en troisième cycle,

pluridisciplinaire et de haut niveau couvrant une plate-forme assez large des disciplines du génie mécanique.

Les cours du Mastère sont orientés vers :

- Une approche fondamentale en mécanique et matériaux, nécessaire pour la modélisation, la simulation numérique et la conception des systèmes mécaniques et pour le dimensionnement des structures,
- Un approfondissement des connaissances théoriques, pratiques et des phénomènes physiques mis en jeu dans les procédés classiques et automatisés de fabrication par enlèvement de matière,
- Un approfondissement en matériaux classiques et nouveaux par l'étude des comportements mécaniques, des problèmes d'endommagement et des interactions matériaux-procédés.

Cette formation multidisciplinaire de haut niveau autour du génie mécanique ouvre à l'étudiant un large spectre de débouchés vers l'université (préparation d'une thèse, enseignement supérieur, recherche) et vers l'industrie.

## 2. Conditions d'admission au mastère GM

Le Mastère est destiné aux ingénieurs diplômés du génie mécanique ou équivalent et aux titulaires d'une maîtrise en sciences de l'ingénieur dont la formation est jugée compatible par la commission du Mastère **sur examen de dossier**. Les élèves ingénieurs de l'ENIT inscrits en troisième année génie mécanique peuvent également s'inscrire au Mastère après examen de leurs dossiers par la commission en fonction de leurs résultats durant les années précédentes.

## 3. Organisation des études :

La formation du Mastère s'étale sur trois semestres, le premier étant consacré aux cours. Dans le cas de réussite aux examens, les deux autres sont destinés à une formation pédagogique, au mémoire d'initiation à la recherche et à une participation à des séminaires et conférences au sein d'une unité ou laboratoire de recherche.

Certains modules de cours sont organisés en semaines bloquées.

Tous les enseignements ont lieu à l'ENIT, campus universitaire El Manar. La présence aux séances d'enseignement est obligatoire.

#### 4. Plan d'étude

L'enseignement comprend un tronc commun de 222 heures en mécanique, comportements des matériaux, simulations numériques, mécanique des matériaux et vibro-acoustique et un groupe de modules au choix de 66 heures parmi :

- Groupe de modules MCP : modélisation, conception et procédés ;
- Groupe de modules MMS : modélisation, matériaux et structures.

#### Tronc commun (222 heures)

Groupe de modules	Intitulé du module	Volume horaire
Mécanique et comportements des matériaux	Modélisations avancées des comportements de matériaux	22,5 h
	Modélisation des matériaux hétérogènes	30 h
	Mécanique des contacts	15 h
Simulations numériques	Méthodes variationnelles et numériques	30 h
	Pratique des simulations numériques en thermomécanique	15 h
Mécanique des matériaux	Transformations structurales des matériaux	24 h
	Fatigue des matériaux et des structures	28,5 h
	Mécanique des surfaces	15 h
Vibrations et acoustique	Mécanique des vibrations non linéaires	21 h
	Acoustique industrielle	21 h

#### Groupe de modules au choix (66 heures)

Groupe de modules MCP : Modélisation, conception et procédés	
Procédés d'enlèvement de matière	30 h
Modélisation et optimisation des processus de fabrication	21 h
Conception et fabrication assistés par ordinateur (CFAO)	15 h

Groupe de modules MMS : Modélisation, matériaux et structures	
Optimisation des structures	24 h
Composites stratifiés	21 h
Corrosion et protection des métaux	21 h

Des stages d'initiation pédagogique sont organisés durant les deux derniers semestres parallèlement à la préparation du stage de recherche, pour ceux qui auront validé les enseignements du premier semestre. Ces stages sont organisés par l'école doctorale sciences et techniques de l'ingénieur de l'ENIT en modules de pédagogie universitaire.

### **5. La validation des enseignements**

Le système d'évaluation est organisé en session principale d'examens et session de rattrapages (uniquement pour les modules à examen). Des tests ou mini projets peuvent éventuellement figurer en contrôle continu. Le même coefficient (1) est attribué à tous les modules. La validation des enseignements du mastère est déclarée pour l'étudiant ayant obtenu, en session principale ou en session de rattrapage, une moyenne générale supérieure ou égale à dix (10).

### **6. Le mémoire du stage de recherche :**

Le mémoire de mastère est réalisé après réussite aux examens des modules théoriques et s'étale sur deux semestres. Il relève d'un travail scientifique d'initiation à la recherche et d'approfondissement d'une problématique donnée. Le stage de recherche est réalisé au sein d'un organisme de recherche ou dans un organisme industriel, en Tunisie ou à l'étranger, sous la supervision d'un enseignant habilité par la commission du mastère.

### **Laboratoires et unités de recherche d'accueil :**

- UR : Mécanique appliquée, ingénierie et industrialisation (ENIT),
- UR : Génie des matériaux (ENIT),
- UR : Energétique et environnement (ENIT),
- UR : Corrosion et protection des métalliques (ENIT),
- UR : Photovoltaïque et matériaux semi-conducteurs (ENIT),
- Labo : Systèmes et mécanique appliquée (EPT),
- Labo : Génie civil (ENIT),
- UR : Mécanique des solides, structures et développement technologique (ESSTT),
- Labo : Mécanique, matériaux et procédés (ESSTT),

- Groupe de recherche : Vibro-acoustique (IPEIEM),
- Groupe de recherche : Dynamique des structures (IPEIN),

## 7. Les programmes des modules :

### **Modélisations avancées des comportements de matériaux**

#### **Module commun avec le mastère MSS**

Thermodynamique des milieux continus et comportements standards généralisés, application à la modélisation de l'endommagement et de la plasticité avec écrouissage,

Matériaux avancés

Modélisation des changements de phase dans les solides-La barre d'Erikson-Minimas locaux de l'énergie-Branches d'équilibres métastables-Application aux alliages à mémoire de forme-Application aux ballons en caoutchouc-La théorie tridimensionnelle de Ball et James

Modèles raffinés-La théorie du gradient de Cahn et Hiliard-Le modèle de Truskinovsky et Zanzotto-Transition du discrète au continu-Chaine d'atomes-Le modèle de rupture de Truskinovsky-La transition au continu

#### **Méthodes numériques – Eléments finis**

Les espaces de Sobolev – Résolution dans le cas de l'élasticité linéaire : problèmes statiques et dynamiques – Formulation variationnelle en mécanique des solides – Maillage – Fonctions d'interpolation – Eléments finis – Méthode de semi discrétisation – Discrétisation en temps.

#### **Transformations structurales des matériaux**

Structure et géométrie cristallines des métaux – Principales structures cristallines des métaux – Imperfections dans les matériaux métalliques – Solutions solides – Diagramme d'équilibre des alliages – Transformations à l'état solide.

#### **Fatigue des matériaux et des structures**

Introduction aux problèmes de la rupture des métaux- Historique de la fatigue-Mécanismes d'endommagement par fatigue et principaux phénomènes de fatigue.

Facteurs influençant la durée de vie en fatigue : Paramètres mécaniques-Paramètres métallurgiques-Paramètres physiques

Caractérisation expérimentale de la résistance des matériaux à la fatigue- critères

empiriques : Courbe de Wöhler et ses modélisations -Fatigue oligocyclique : forme des cycles et lois de résistance-Résistance à la propagation des fissures

Rupture par fatigue : Morphologie des cassures

Durée de vie sous chargements variables

Insuffisance des critères classiques : critères de fatigue multiaxiale

Dimensionnement des structures à la fatigue : Applications industrielles

#### **Mécanique des surfaces**

Mécanique des surfaces : objectifs – Origines des contraintes superficielles – Relation microstructure / mécanique des matériaux – Etude de cas - Relaxation des contraintes résiduelles – Durabilité des pièces mécaniques – Traitements superficiels : mécaniques, thermiques et thermo-chimiques – Analyse des contraintes résiduelles : méthodes diffractométriques et méthodes mécaniques – Etude de cas : nitruration.

#### **Modélisation des matériaux hétérogènes**

##### **Module commun avec le mastère MSS**

Homogénéisation

Le processus d'homogénéisation – Approche ingénieur du comportement des matériaux homogènes-Quelques approches explicites-Etude théorique et modélisation numérique des problèmes d'homogénéisation périodique-Cas des matériaux stratifiés-Exemples de problèmes d'homogénéisation périodique

Approches micro-macro en mécanique non linéaire

Approche macro : Algorithmes de simulation numérique pour l'élasto-plasticité et l'élasto-visco-plasticité, l'élasticité en grandes déformations, la plasticité en grandes déformations, la plasticité cyclique, L'endommagement, approche non locales.

Approche micro/macro et homogénéisation-Modélisation et simulation numérique : matériaux renforcés par des inclusions-Résultat d'Eshelby et inclusion isolée, Schéma d'homogénéisation de Voigt, Reuss, auto-cohérent, Mori-Tanaka, etc, élasticité linéaire et élasto-plasticité, matériaux polycristallins élasto-plastiques.

**Mécanique des contacts**

Problématique du contact mécanique

Rappel de la théorie de Hertz-Limite de la théorie de Hertz-Nouvelles orientations des calculs de contact-Contact unilatéral-Formulation variationnelle du problème de contact- Minimisation énergétique-Discretisation par éléments finis- Méthodes de résolutions du problème de contact-Régularisation des lois de contacts- Contact avec frottement-Loi de TRESCA- Loi de COULOMB-Loi de COULOMB régularisée  
Utilisation d'un logiciel de calcul pour étudier un cas.

**Mécanique des vibrations non linéaires**

Rappels de notions des vibrations linéaires des systèmes discrets,

Vibrations non linéaires des systèmes discrets : méthode de linéarisation, méthode des perturbations, méthodes d'intégrations numériques-Les phénomènes chaotiques, les bifurcations, les mouvements périodiques et les mouvements pseudopériodiques-La transformée en ondelettes-La méthode de la force restaurée.

Vibrations des arbres des machines.

Méthode analytique exacte (Euler, Bernoulli, Timoshenko, Rayleigh, gauchissement)-Méthode de Rayleigh Ritz-Méthode des éléments finis-Méthode des matrices de transfert-Méthodes variationnelles : Hamilton, Minima de l'énergie, Hellinger Reisser, Galerkin.

Applications aux matériaux composites et sandwich

Les absorbeurs de vibrations- Absorbeurs actifs- Absorbeurs passifs- Exemples d'absorbeurs : pastilles piézoélectriques.

Les mesures vibratoires- Chaines de mesures- Analyseurs de spectres.

**Acoustique industrielle**

Problèmes des bruits industriels – Equations des ondes acoustiques dans un fluide en écoulement ou au repos : les équations de conservation, hypothèses de l'acoustique linéaire dans un écoulement uniforme ou au repos, équation des ondes acoustiques dans un fluide au repos, equation d'Helmholtz dans un écoulement uniforme, conditions aux limites : paroi d'un solide, conditions non réfléchissantes à l'infini – Formulation variationnelle par équations intégrales des problèmes de propagation et de rayonnement acoustique : représentation intégrale de la pression et de sa dérivée normale – Formulation variationnelle par équations intégrales des problèmes de propagations et de rayonnement des ondes acoustiques par des structures élastiques : équation locale, conditions de couplage élastoplastique, formulation variationnelle et discrétisation de la structure, applications.

**Pratique des simulations numériques en thermomécanique**

Equations de la thermomécanique,

Mise en équation du problème mécanique (rappel),

Mise en équation du problème thermique : Premier principe de la thermodynamique -Equation de la chaleur dans les solides indéformables - régime stationnaire linéaire - divers types de conditions aux limites - formulation variationnelle et éléments finis - analyses thermiques transitoires - méthodes de résolution : explicite, implicite, Crank-Nicholson, problèmes thermiques non linéaires,

Equation de la chaleur en thermoélasticité.

Calcul thermomécanique couplé : Cas des phénomènes adiabatiques - Couplage fort – Couplage faible

Simulations numériques par la MEF : La démarche de résolution d'un problème par éléments finis - Mise en œuvre et études de cas sur des logiciels (Castem2000, Abaqus, Ansys...)

**Procédés d'enlèvement de matière**

Les phénomènes relatifs à la coupe des matériaux – Les matériaux à outils – La géométrie de l'outil – Les mécanismes de formation du copeau – Les efforts de coupe en tournage, fraisage et perçage – l'usure de l'outil de coupe et modélisation – L'optimisation de la coupe : durée de vie à production maximale et à coût minimal – Les nouvelles technologies en usinage : usinage à grandes vitesses UGV, tournage et fraisage durs – Méthode des plans d'expériences appliquée à la recherche: mise en œuvre, les interactives, variance et orthogonalité, degrés de liberté, application et détermination d'un modèle mathématique.

Eléments d'approfondissement sur la coupe :

Interactions matériau-procédés d'enlèvement de matière par outil coupant – Analyse des développements les plus récents dans les techniques d'usinage – La pression de l'usinage – La lubrification – Surveillance de l'usinage – Bases théoriques de l'enlèvement de copeau par cisaillement.

**Modélisation et Optimisation des processus de fabrication.**

Tolérancement des pièces par analyse des dispersions en usinage : modélisation géométrique des moyens de production, dispersions dimensionnelles, dispersions systématiques, dispersions aléatoires, intervalle de tolérance, analyse des dispersions, modélisation des dispersions, réglage des machines .

Elaboration et optimisation des avant-projets de fabrication : données de base, inventaire non hiérarchisé des différents critères d'élaboration, critères principaux à considérer, démarche proposée, méthodologie d'élaboration

des avant-projets d'étude de fabrication.

### **Conception et fabrication assistées par ordinateur (CFAO)**

L'ingénierie coopérante et les logiciels intégrés en CFAO : organisation de la production dans les systèmes CIM, les préparations et l'usinabilité – Les fonctions générales des logiciels de FAO : principales fonctions, utilisation en 2D en tournage 2 axes, 3D en fraisage 2 et 3 axes, fraisage 5 axes – Théorie et usinage des surfaces complexes : courbes de Bézier, courbes B spline, courbes rationnelles, génération de surfaces, calcul de chemin d'outils – Les principes et les fonctions des MOCN : principes de l'usinage sur MO, diverses classes de MOCN, fonctions principales d'un DCN, asservissement et commande d'axes, cinématique des MO, l'interpolation, applications industrielles, exemples – Aspects vibratoires : modèle mécanique global, modèle associé à la coupe, motorisation de la commande.

### **Optimisation des structures**

Introduction : démarches classiques de la conception, conception automatique, classes de problèmes d'optimisation de structures – Approches d'optimisation des structures : approche classique, approche par critère d'optimalité et approche par programmation mathématique – Eléments de programmation mathématique : minimisation avec et sans contraintes : conditions d'optimalité et approche par programmation mathématique, problèmes discrets – Analyse de sensibilité : différences finis, méthodes analytiques en statique et en dynamique, méthode adjointe – Méthodologie d'optimisation des structures : concepts d'approximations, méthodes d'approximations successives – Thèmes spéciaux : optimisation de forme, optimisation de la topologie, optimisation sous contraintes de fiabilité.

### **Composites stratifiés**

Matériaux composites : définition, caractéristiques générales, classification – Les éléments constitutifs : résines, charges et additifs, fibres et tissus – Mise en œuvre, procédés et architecture ;  
Eléments sur la mécanique des matériaux : éléments mathématiques, description des contraintes, déformations.  
Comportement mécanique des matériaux composites : comportement élastique d'un matériau composite unidirectionnel, d'un composite orthotrope, matériau composite en dehors de ses axes principaux.  
Modélisation du comportement mécanique des stratifiés et des sandwichs : généralités sur la théorie des stratifiés, théorie classique des stratifiés, relations fondamentales et formulation énergétique de la théorie classique des stratifiés, prise en compte du cisaillement transverse, théorie des plaques sandwichs.  
Mécanisme de rupture et endommagement des matériaux composites : critères de rupture, endommagement.

### **Corrosion et protection des métaux**

#### **Phénomène de la corrosion**

Les conséquences de la corrosion :- Aspects économiques – Sécurité - Environnement...

Généralités sur la corrosion - Définition de la corrosion - Morphologie de la corrosion

La corrosion électrochimique : Le principe - Théorie de la corrosion électrochimique : hétérogénéité due au matériau, dissymétrie de l'électrolyte - Notions de potentiel - Classification électrochimique – Cinétique - Phénomène de passivation

La corrosion sous contrainte

La corrosion atmosphérique.

#### **Lutte contre la corrosion**

Choix de matériau

Utilisation des inhibiteurs : Définition - Mode d'action des inhibiteurs – Classification - Domaine d'utilisation des inhibiteurs

Les revêtements : Préparation de la surface - Revêtements métalliques : Revêtement cathodique - Revêtement anodique

Revêtements non métalliques : Peinture - Vernis

Les procédés d'application

La protection cathodique : Théorie de la protection cathodique - Protection par anodes sacrificielles - Protection par courant imposé - Suivi de la protection cathodique

La protection anodique : Principe de la protection anodique - Domaines d'application.