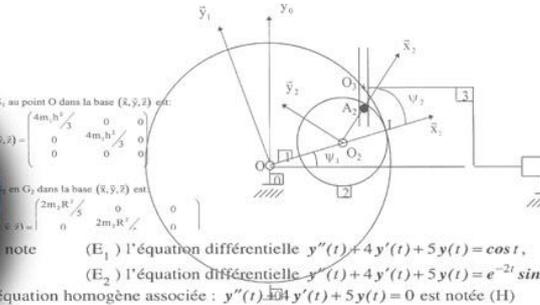


Programme de Formation

Année scolaire 2025 – 2026



$$[B(x, t)]^T = \frac{[E(x, t)]^T}{v^2} = \frac{\mu_0 \epsilon_0 [E(x, t)]^T}{v^2}$$

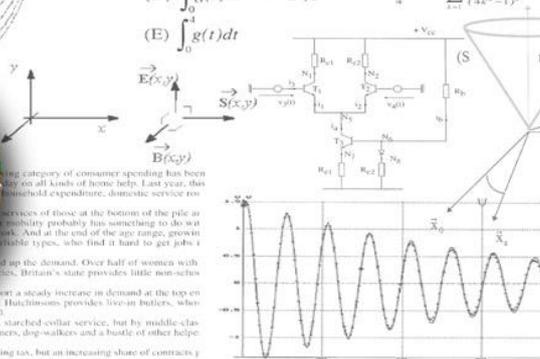
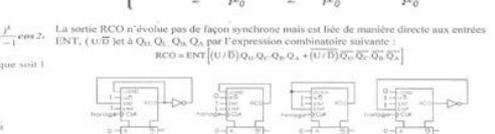
$$\begin{cases} u(x, t) = \frac{1}{2} \epsilon_0 [E(x, t)]^T + \frac{1}{2} \frac{\mu_0 \epsilon_0 [E(x, t)]^T}{\mu_0} \\ = \frac{1}{2} \epsilon_0 [E(x, t)]^T + \frac{1}{2} \epsilon_0 [E(x, t)]^T = \epsilon_0 [E(x, t)]^T \end{cases}$$

$$[E(x, t)]^T = v^2 [B(x, t)]^T = \frac{[B(x, t)]^T}{\mu_0 \epsilon_0}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} u(x, t) = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 [B(x, t)]^T}{\mu_0 \epsilon_0} + \frac{1}{2} \frac{[B(x, t)]^T}{\mu_0} \\ = \frac{1}{2} \frac{[B(x, t)]^T}{\mu_0} + \frac{1}{2} \frac{[B(x, t)]^T}{\mu_0} = \frac{[B(x, t)]^T}{\mu_0} \end{cases}$$



- (A) $\int_{-4}^4 g(t) dt$ est une intégrale divergente
- (B) $\int_{-4}^4 g(t) dt = 0$
- (C) $\int_0^2 g(t) dt = 4 \int_0^{\pi/3} \sin u du$
- (D) $\int_0^2 g(t) dt = 4 - 2\sqrt{3}$
- (E) $\int_0^4 g(t) dt$



On se propose de trouver quelques propriétés de la courbe C dont la représentation dans un repère du plan est :

$$\begin{cases} x(t) = \frac{1+t^2}{1-t^2} \\ y(t) = \frac{1+t^2}{1-t^2} \end{cases}, \text{ avec } t \in \mathbb{R}$$

On considère trois points du plan A, B, S non alignés. On suppose que A est d'abscisse -1, B d'abscisse +1, et l'on note $s = u + iv$ l'abscisse de S.

Ainsi $v \neq 0$. On note C le cercle circonscrit au triangle (A, B, S), Ω son centre et ω l'abscisse de Ω .

F est le point où la droite orthogonale à (AB) issue de S recoupe C , et H le symétrique de F par rapport à la droite (AB).



L'intégrale $\int_5^{+\infty} f(t) dt$ est convergente

$$\int_0^1 f(t) dt = \int_0^1 \frac{x^3}{x^4 - 16} dx$$

$$= \int_0^1 \frac{x^2}{x^4 - 16} dx = \int_0^1 \frac{x^2}{(x^2 - 4)(x^2 + 4)} dx$$

$$= \int_0^1 \frac{x^2}{x^4 - 16} dx = 1 + \frac{2}{x^2 - 4} - \frac{2}{x^2 + 4}$$

$$= \int_0^1 \frac{x^2}{x^4 - 16} dx = 1 + \frac{1}{2(x+2)} + \frac{1}{2(x-2)} - \frac{1}{x^2 + 4}$$

$$\int_0^1 f(t) dt = 2 - \ln 3 - 2 \operatorname{Arctan} \frac{1}{2}$$

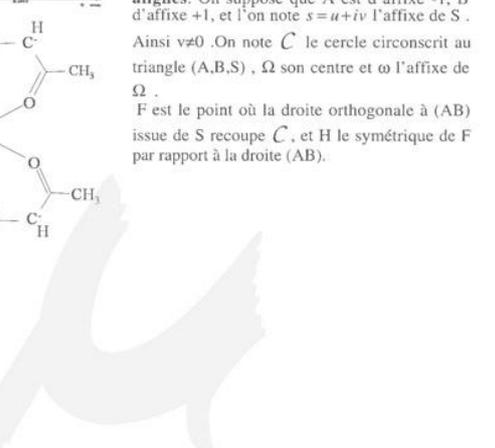


Table des matières

La scolarité à l'ENSMM.....	3
PROGRAMME DE PREMIERE ANNEE	4
• 1 ^{ère} année : Semestre BLEU	5
• 1 ^{ère} année : Semestre JAUNE.....	111
PROGRAMME DE DEUXIEME ANNEE.....	16
• 2 ^{ème} année : Tronc commun	17
• 2 ^{ème} année : Parcours Ingénierie des Systèmes	19
• 2 ^{ème} année : Parcours Ingénierie des Produits.....	23
PROGRAMME DE TROISIEME ANNEE	28
• 3 ^{ème} année : Tronc commun (UEOTC)	32
• 3 ^{ème} année : Projet Interdisciplinaire en Sciences et Techniques (UEOPIST) ..	32
• 3 ^{ème} année : Bio microsystèmes (UEOBMS).....	34
• 3 ^{ème} année : Conception et réalisation d'objets connectés (UEOCROC)	39
• 3 ^{ème} année : Ingénierie Micromécanique (UEOIMM)	42
• 3 ^{ème} année : Ingénierie des systèmes de production (UEOISP)	46
• 3 ^{ème} année : Mécanique avancée des structures (UEOMAS)	51
• 3 ^{ème} année : Méthodes d'industrialisation (UEOMIND).....	54
• 3 ^{ème} année : Matériaux et surfaces fonctionnels (UEOMSF).....	59
• 3 ^{ème} année : Systèmes mécatroniques et robotiques (UEOSMR).....	68

La scolarité à l'ENSMM

1^{ère} année : Semestre 1 et Semestre 2

- 2 semestres académiques **BLEU** (30ECTS) et **JAUNE** (30 ECTS)

La promotion est séparée en deux :

½ fait BLEU (S1) puis JAUNE (S2) ½ fait JAUNE (S1) puis BLEU (S2)

2^{ème} année : Semestre 3 et Semestre 4

- 1 semestre académique **VERT** composé de :
- 1 Tronc commun (5 ECTS)
 - 1 parcours au choix :
 - parcours Ingénierie des Produits (25 ECTS)
 - parcours Ingénierie des Systèmes (25 ECTS)
- 1 semestre STAGE : Stage d'immersion en entreprise

La promotion est séparée en deux :

½ fait VERT (S3) puis STAGE (S4) ½ fait STAGE (S3) puis VERT (S4)

3^{ème} année : Semestre 5 et Semestre 6

- 1 semestre académique **OPTION** (30 ECTS) composé de
- 2 modules TRONC COMMUN (8 ECTS)
 - 1 module PROJET (6 ECTS)
 - 4 modules SPECIFIQUES (16 ECTS) (8 options possibles)
 - BMS - Bio-Microsystèmes
 - CROC - Conception et réalisation d'objets connectés
 - IMM - Ingénierie MicroMécanique
 - ISP - Ingénierie des systèmes de production
 - MAS - Mécanique avancée des structures
 - MIND - Méthodes d'industrialisation
 - MSF - Matériaux et surfaces fonctionnels
 - SMR - Systèmes mécatroniques et robotiques
- 1 semestre PFE : Projet de Fin d'Etudes en entreprise

L'ensemble de la promotion fait OPTION (S5) puis PFE (S6)

PROGRAMME DE PREMIERE ANNEE

			Total	CM	TD	TP	AA	ECTS	
BLEU	UEB1	SHS1	26	0	26	0	0	2	
		LV1	60	0	60	0	0	3	
	UEB2	MATH1	46	10	36	0	0	3	
		TS1	30	16	14	0	0	2	
	UEB3	MMC1	44	10	22	12	0	3	
		MMC2	30	6	12	12	0	2	
	UEB4	FAB1	75	26	6	40	3	5	
		PROD1	30	12	18	0	0	2	
	UEB5	AUT1	60	10	26	24	0	4	
		INFO1	60	4	28	28	0	4	
TOTAL			461	94 19%	248 54%	116 25%	9 2%	30	
JAUNE	UEJ1	SHS2	26	0	26	0	0	2	
		LV2	60	0	60	0	0	3	
	UEJ2	CM1	90	0	82	8	0	6	
		SDM1	90	28	34	24	4	6	
	UEJ3	MATH2	46	10	24	12	0	3	
		DYN1	46	10	28	8	0	3	
	UEJ4	OPT1	44	18	14	12	0	3	
		ELEC1	60	16	20	24	0	4	
	TOTAL			462	82 18%	288 62%	88 18%	4 2%	30
				923	176 19%	536 58%	204 22%	7 1%	60

1^{ère} année : Semestre BLEU

461 heures d'enseignement, 30 ECTS, 5 unités d'enseignement

Unités d'enseignement	Responsable	Total (h)	ECTS
UEB1 : SHS1 + LV1	Jean du VERGER	86	5
UEB2 : MATH1 + TS1		76	5
UEB3 : MMC1 + MMC2	Violaine GUICHERET-RETEL	74	5
UEB4 : FAB1 + PROD1	Christophe DIELEMANS	105	7
UEB5 : AUT1 + INFO1	Yann LE GORREC	120	8

AUT1 : AUTOMATIQUE (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
Y. LE GORREC	60	10	26	24	0	0	4

Mode d'évaluation : Contrôle continu (1/4), TP (1/4), Examen final (1/2)

Détail du programme :

- Rappels d'automatique continue: signaux et systèmes, transformée de Laplace, fonctions de transfert (en particulier du 1er et du 2e ordre), réponse temporelle, analyse fréquentielle, stabilité, précision, principes de rétroaction et synthèse de lois de commande dans le domaine fréquentiel.
- Automatique échantillonnée : échantillonnage, convertisseurs numérique-analogique, analogique-numérique, bases de traitement du signal, choix de la période d'échantillonnage, transformée en z, bloqueurs d'ordre 0, fonction de transfert en z, analyse de stabilité, synthèse de correcteurs par des approches polynomiales (Réponse pile, Zdan, RST)

FAB1 : FABRICATION (75h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
C. DIELEMANS	75	26	6	40	3	0	5

Mode d'évaluation : TP (40%) + examen final (60%)

Détail du programme :

Ce module se construit autour de 3 axes :

- Langage de cotation : étude de la norme GPS (spécification géométrique des produits) dans ses aspects de spécifications : dimensionnelle, géométrique, de forme et d'états de surface.

- Procédés de fabrication : cette partie introduit les différentes familles de procédés (Ablation, Réplication, Addition et Jonction) et met en œuvre les principaux procédés (fraisage, tournage, injection plastique, fabrication rapide) afin d'en comprendre les spécificités technologiques et les limites.
- Métrologie et qualité : analyse et mise en pratique de différents aspects associés à la métrologie et à la qualité : calculs d'incertitudes, plan d'expériences, bases de la qualité et contrôle de pièces mécaniques (géométrie et états de surface).

PROD1 : GESTION DE PRODUCTION (30h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
R. GOURIVEAU	30	12	18	0	0	0	2

Mode d'évaluation : 1 examen final

Détail du programme :

L'objectif de ce module est de situer globalement l'activité de production au sein de l'entreprise, d'en connaître les missions et objectifs, de percevoir les interactions et dépendances avec les autres services, et de comprendre la nécessité de communication / synchronisation, principalement avec les services supports (Méthodes, Maintenance, Achats/Appros, Qualité, RH). Les étudiants sont initiés à quelques techniques, méthodes et outils (tant organisationnels que techniques et informatiques) nécessaires à une gestion efficace et pérenne de l'activité productrice, et cela, à différents horizons décisionnels (du long terme – stratégique, au court terme – opérationnel). L'importance d'une gestion cohérente des données, informations et connaissances de l'entreprise est également développée.

- Généralités sur la gestion de production (concepts, enjeux, flux...)
- Niveaux décisionnels et techniques de gestion (MRP / MRPII)
- Modèles de gestion des stocks et de prévisions
- Implantation d'atelier
- Eléments d'ordonnancement

INFO1 : INTRODUCTION A LA PROGRAMMATION ORIENTEE OBJET (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
J.M. NICOD	60	4	28	28	0	0	4

Mode d'évaluation :

L'évaluation comporte trois notes obtenues respectivement suite à :

- Un partiel à mi-parcours,
- Un examen terminal,
- Un projet

Détail du programme :

Prérequis : algorithmique, fonctions, procédures, récursivité, complexité (cf. programme des classes préparatoires)

Description :

La programmation orientée objet (POO) est utilisée dans plus de 75% des développements informatiques. Ce module propose une introduction à la POO en langage Java. La première moitié du module est consacrée à l'acquisition des compétences de base (objets, classes, tableaux, listes, fichiers). Chaque notion est abordée en TD puis appliquée en TP. La deuxième partie est consacrée à la réalisation d'un projet en binôme. Le projet est l'occasion d'aborder des notions de programmation plus avancées en fonction du sujet (comme les parcours de graphes, les piles/files, la récursivité, les arbres, ou d'autres structures de donnée et algorithmes) et de réaliser une interface graphique. Le projet a pour objectif de développer des compétences d'analyse, de conception, de codage et de tests d'un logiciel concret.

Compétences visées à l'issu du module :

- Compétences de bases : utiliser les objets, définir une classe, utiliser des structures de données séquentielles et écrire les algorithmes de traitement associés, structurer des données du type liste/élément, lire et écrire des données dans des fichiers textes, créer une interface graphique élémentaire avec Swing.
- Compétences de gestion de projet : analyser un problème, concevoir les algorithmes et les structures de données permettant sa résolution, coder proprement un logiciel, tester un logiciel, rendre compte de son travail à l'oral ou à l'écrit.

Programme :

- Notion de bases (4h cours, 14h TD, 4h TDAO, 14h TP)
 - o Introduction, enjeux et principes de la POO (4h cours)
 - o Objets et références (2h TD, 2h TP)
 - o Classes (4h TD, 4h TP)
 - o Tableaux et algorithmes de traitement associés (4h TD, 4h TP)
 - o Classe ArrayList et structuration liste/élément (4h TD, 4h TP)
 - o Lecture et écriture de données dans des fichiers textes (4h TDAO)
- Projet (6h TD, 4h TDAO, 14h TP)
 - o Présentation et analyse du projet, conception des premières classes (2h TD, 6h TD)
 - o Algorithmique en relation avec le projet (4h TD, 4h TP)
 - o Interface graphique (4h TDAO, 4h TP)

LV1 : LANGUES VIVANTES (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
S. BURE	60	0	60	0	0	0	3

Langue Vivante 1 : Anglais (30h)

Mode d'évaluation :

Les élèves sont évalués sur leur compétence orale et écrite. Ils devront effectuer 2 LINGUASKILL blancs, une présentation orale/entretien d'embauche ainsi qu'un travail écrit (*Essay*) dans le cadre de l'acquisition des compétences culturelles du monde anglophone. L'évaluation tiendra aussi compte de l'assiduité de l'élève ainsi que de son implication pendant le cours.

Détail du programme :

Le cours se propose d'initier les élèves à l'anglais pour ingénieurs et à l'anglais des affaires. En outre le cours d'anglais constitue une préparation au LINGUASKILL auquel est assujétie la délivrance du diplôme d'ingénieur. Il s'agira aussi de familiariser nos élèves avec le vocabulaire scientifique à travers la lecture d'articles provenant de revues scientifiques (*New Scientist, Nature...*) et de les initier à l'anglais pour ingénieurs (*mechanical engineering, computers in engineering, engineering and sustainability, horology, aeronautics, the automotive industry...*).

Toujours dans un souci de pré-professionnalisation, le cours prépare les élèves à la rédaction de CV, de lettres de motivation ainsi qu'à la conduite d'un entretien d'embauche en anglais. Il prépare également les élèves à présenter un produit technologique (*product demo*). Le cours a pour objectif l'acquisition des compétences culturelles du monde anglophone (à travers notamment l'étude de sujets d'actualités et/ou culturels). Ces connaissances contribueront à ce que nos élèves s'ouvrent à une diversité de cultures afin de consolider et développer les outils d'une compréhension inter-culturelle indispensable dans le cadre d'un environnement international. Enfin la préparation au LINGUASKILL permet à nos élèves de se familiariser avec les techniques et le vocabulaire propres à cette certification tout en révisant et consolidant leurs connaissances grammaticales de l'anglais. Afin d'améliorer l'expression orale des élèves le cours propose également une introduction aux techniques du *debating*.

Langue Vivante 2 : Anglais renforcé, allemand, espagnol et japonais (30h)

Mode d'évaluation :

Les cours d'allemand et d'espagnol constituent une préparation au Goethe Test Pro. **Les élèves sont soumis à plusieurs évaluations au cours du semestre** (le nombre et les modalités de ces évaluations varient selon les langues enseignées). Le cours d'anglais renforcé propose une préparation intensive au LINGUASKILL.

MATH1 : MATHEMATIQUES (46h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
G. NAMAHA	46	10	36	0	0	0	3

Mode d'évaluation : 2 examens avec une moyenne globale pondérée au prorata des heures de chaque sous module

Détail du programme :

- Analyse Statistique des Données (ASD) : Cours 6h, TD 18h
 - o Notions de statistiques descriptives : moyenne, écart-type, séries doubles, méthode des moindres carrés.
 - o Rappels de probabilités : lois usuelles (binomiale, Gauss, Poisson, Khi-deux) Détail du programme .
 - o Statistiques inférentielles : échantillonnage et estimations, tests d'hypothèses.
 - o Introduction à la méthode des plans d'expérience.
 - o Introduction à la fiabilité (test de Weibull).
- Calcul Matriciel et Vectoriel (CMV) : Cours 4h, TD 18h
 - o Calcul Matriciel : Opérations matricielles, déterminants, éléments propres, changement de base. Matrices particulières (symétriques, antisymétriques, définies positives, hermitiennes).

Exemples de matrices associées à une transformation géométrique (rotation, symétrie, projection). Polynômes de matrices, notions d'exponentielle de matrices.

- Calcul Vectoriel : Opérations élémentaires (produits scalaire, vectoriel, mixte, tensoriel). Systèmes de coordonnées (cartésiennes, cylindriques, sphériques). Opérateurs différentiels (gradient, rotationnel, divergence, Laplacien). Intégration des formes différentielles. Intégrales multiples, curvilignes, de surface et théorèmes intégraux (Gauss-Ostrogradski, Green, Stokes)

MMC1 : MECANIQUE DES MILIEUX CONTINUS 1 (CONTINUUM MECHANICS 1) (44h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
V. GUICHERET S. THIBAUD	44	10	22	12	0	0	3

Mode d'évaluation : 2 partiels + évaluation TD/TP

Détail du programme :

Élasticité tridimensionnelle : Concepts de contrainte, déformation, déplacement - Équations fondamentales : équilibre, compatibilité - Lois de comportement élastique (isotrope) - Critères de limite élastique – Conditions aux limites – Simulation numérique (Méthode des Éléments Finis) – Méthodes expérimentales : Stéréocorrélation d'images, extensométrie, ultrasons.

MMC2 : MECANIQUE DES MILIEUX CONTINUS 2 (CONTINUUM MECHANICS 2) (30h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
V. GUICHERET S.THIBAUD	30	6	12	12	0	0	2

Mode d'évaluation : 1 partiel + évaluation TD/TP

Détail du programme :

Statique et dynamique des poutres : Modèle analytique de structures rectilignes sollicitées en traction, torsion et flexion (Hypothèse de Bernoulli et Timoshenko) – Simulation numérique en statique et dynamique – Introduction au flambage

SHS1 : (30h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
N. BILLOT	26	0	26	0	0	0	2

Mode d'évaluation :

- 1 partiel de fin de semestre
- Projet : 1^{er} et 2^{ème} semestre : écrit et/ou oral

Détail du programme :

- Droit
 - o Qu'est-ce qu'une personne pour le droit ?
 - o Les principales formes juridiques des organisations.
- Gestion financière
 - o Savoir lire un bilan et un compte de résultat : les documents comptables et leur finalité.
 - o Performance et équilibre financier de l'entreprise au travers de l'analyse du bilan et du compte de résultat (bilan fonctionnel et S.I.G.)

TS1 : TRAITEMENT DU SIGNAL (30h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
S. MAGUERON	30	9	14	0	0	7	2

Mode d'évaluation :

- Première session : note de projet (8h TD) (50%) + note d'examen (50%)
Rattrapage à l'oral (points supplémentaires à la moyenne initiale)

Détail du programme :

-CM (4x2h+1h) : ce cours est une introduction au traitement du signal, incluant des aspects historiques et de nombreuses applications modernes issues de différentes disciplines.

Notions théoriques abordés : classes des signaux, approximation des signaux et quelques outils mathématiques, bases techniques de la transmission des signaux, introduction au traitement et au filtrage numérique, introduction au traitement d'image, notions de bruit, de codage et sécurité de l'information.

-Conférences : son et acoustique, traitement d'images aéroportées, électronique d'un convertisseur numérique-digital, traitement d'image en science des surfaces, analyse du signal en métrologie de surface, objectif de la déconvolution et applications en ingénierie.

-TD (3x2h): TD (2h) sur la transformation de Fourier sous matlab, TD (2h) Récupération d'un signal périodique noyé dans du bruit blanc, détection synchrone, TD (2h) Déconvolution linéaire en présence de bruit de mesure, application à la reconstruction d'une faible force.

-TD (projet 8h): analyse d'un problème de traitement du signal, mise en œuvre d'une solution informatisée et rapport d'analyse à remettre.

1^{ère} année : Semestre JAUNE

462 heures d'enseignement, 30 ECTS, 4 unités d'enseignement

Unités d'enseignement	Responsable	Total (h)	ECTS
UEJ1 : SHS2 + LV2	Jean du VERGER	86	5
UEJ2 : CM1 + SDM1	Eric MERAT	180	12
UEJ3 : MATH2 + DYN1	Sylvaine MALLET	92	6
UEJ4 : OPT1 + ELEC1		104	7

OPT1 : OPTIQUE (44h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
B. CAVALLIER	44	18	14	12	0	0	3

Mode d'évaluation : 2 partiels

Détail du programme :

- Instruments optiques
- Optique matricielle
- Polarisation
- Lasers
- Détection

SDM1 : MATERIAUX (90h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
J. GAVOILLE	90	28	34	24	4	0	6

Mode d'évaluation : 3 partiels (2/3 de la note finale) + compte-rendu de TP (1/3 de la note finale)

Détail du programme :

- Structure des matériaux cristallins
 - o Contenu horaire : 12h Cours + 12h TD + 8h TP
 - o Cours et TD : Cristallographie, Techniques de caractérisation structurale, Liaisons interatomiques, Elasticité, Défauts dans les cristaux, Plasticité, Diffusion.
 - o TP : 2 sujets à traiter parmi les 3 suivants : Recristallisation de l'aluminium, Diffraction des RX, Diffusion dans les alliages de cuivre
- Métallurgie physique
 - o Contenu horaire : 8h Cours + 10h TD + 8h TP + 2h en auto-apprentissage

- Cours et TD : Métallurgie des aciers et des alliages d'aluminium, Traitements thermiques, Diagrammes de phase, TTT et TRC.
- TP : 2 sujets à traiter parmi les 4 suivants : Trempe des aciers, Essai Jominy, Métallographie, Durcissement structural.
- Matériaux céramiques
 - Contenu horaire : 4h TD
- Matériaux polymères
 - Contenu horaire : 8h Cours + 8h TD + 8h TP + 2h en auto-apprentissage
 - Cours et TD : Matériaux polymères : microstructures, propriétés et comportements.
 - TP : 2 sujets à traiter parmi les 3 suivants : Identification et comportement mécanique des thermoplastiques, Température Vicat et viscoélasticité, Cristallisation *in situ* et indice de fluidité.

CM1 : CONCEPTION (90h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
E. MERAT	90	0	82	8	0	0	6

Mode d'évaluation :

Evaluation basée sur une grille de compétences :

- en continu pendant les séances de TD/TP
- par projets
- par un examen final.

Objectif : Ce module de 1^{ère} année a pour objectif de former aux méthodes d'analyse de systèmes mécaniques complexes puis d'initier aux méthodes de conception en s'appuyant sur des systèmes simples. L'enseignement est organisé sous forme de synthèses, d'application à des études de cas industriels et sous forme de projets

Détail du programme :

- Prise en main d'un outil de CAO : Modélisation géométrique 3D des composants, assemblage des composants, édition des documents techniques ;
- Analyse et modélisation de systèmes simples : Schéma de principe, cinématique et technologique, schéma Bloc (action-flux), hyperstatisme ;
- Analyse de systèmes réels : Démontage, analyse et remontage de systèmes en TP ;
- Analyse et modélisation de systèmes complexes ;
- Initiation à la cotation fonctionnelle : Elaboration du dessin de définition d'une pièce ;
- Bases et méthodes de conception d'un système : analyse du besoin, approche systémique, dimensionnement d'une transmission de puissance, définition de liaisons complètes et de guidages simples. Maquettes numériques du système.
- Initiation à la gestion au PLM

DYN1 : DYNAMIQUE DES MECANISMES (MULTIBODY DYNAMICS) (46h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
M. OUISSE S. MALLET H. LENOIR	46	10	28	8	0	0	3

Mode d'évaluation : 2 partiels + évaluation TD/TP

Détail du programme :

Cinématique et dynamique des mécanismes : Cinématique des solides - Équations de liaison des mécanismes - Géométrie des masses – Cinétique - Dynamique des solides - Simulations numériques en dynamique des mécanismes.

ELEC1 : ELECTRONIQUE (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
K. PHAN HUY Y. KERSALE	60	16	20	24	0	0	4

Mode d'évaluation : 1 Partiel ; 1 Examen Final ; 1 examen de TP (3 * 1/3 de la note finale)

Détail du programme :

Simulation des circuits électroniques (SPICE). Amplificateurs opérationnels. Génération de signaux. Composants semi-conducteurs. Applications de base des composants semi-conducteurs. Logiques combinatoire et séquentielle. Conversions analogique/numérique et numérique/analogique.

LV2 : LANGUES VIVANTES (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
J. DU VERGER	60	0	60	0	0	0	3

Langue Vivante 1 : Anglais (30h)

Mode d'évaluation :

Les élèves sont évalués sur leur compétence orale et écrite. Ils devront effectuer 2 BULATS blancs, une présentation orale/entretien d'embauche ainsi qu'un travail écrit (*Essay*) dans le cadre de l'acquisition des compétences culturelles du monde anglophone. L'évaluation tiendra aussi compte de l'assiduité de l'élève ainsi que de son implication pendant le cours.

Détail du programme :

Le cours se propose d'initier les élèves à l'anglais pour ingénieurs et à l'anglais des affaires. En outre le cours d'anglais constitue une préparation au BULATS auquel est assujettie la délivrance du diplôme d'ingénieur. Il s'agira aussi de familiariser nos élèves avec le vocabulaire scientifique à travers la lecture d'articles provenant de revues scientifiques (*New Scientist, Nature...*) et de les initier à l'anglais pour ingénieurs (*mechanical engineering, computers in engineering, engineering and sustainability, horology, aeronautics, the automotive industry...*).

Toujours dans un souci de pré-professionnalisation, le cours prépare les élèves à la rédaction de CV, de lettres de motivation ainsi qu'à la conduite d'un entretien d'embauche en anglais. Il prépare également les élèves à présenter un produit technologique (*product demo*). Le cours a pour objectif l'acquisition des compétences culturelles du monde anglophone (à travers notamment l'étude de sujets d'actualités et/ou culturels). Ces connaissances contribueront à ce que nos élèves s'ouvrent à une diversité de cultures afin de consolider et développer les outils d'une compréhension inter-culturelle indispensable dans le cadre d'un environnement international. Enfin la préparation au BULATS permet à nos élèves de se familiariser avec les techniques et le vocabulaire propres à cette certification tout en révisant et consolidant leurs connaissances grammaticales de l'anglais. Afin d'améliorer l'expression orale des élèves le cours propose également une introduction aux techniques du *debating*.

Langue Vivante 2 : Anglais renforcé, allemand, espagnol et japonais (30h)

Mode d'évaluation :

Les cours d'allemand et d'espagnol constituent une préparation au Goethe Test Pro. **Les élèves sont soumis à plusieurs évaluations au cours du semestre** (le nombre et les modalités de ces évaluations varient selon les langues enseignées). Le cours d'anglais renforcé propose une préparation intensive au Goethe Test Pro.

MATH2 : MATHEMATIQUES (46h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
R. BARRERE	46	10	24	12	0	0	3

Mode d'évaluation : Contrôles(s) écrit(s) (2/3) + rapport de travaux pratiques (1/3)

Détail du programme :

- Calcul des variations et optimisation (Cours: 4h, TD: 6h) : cas des fonctions de plusieurs variables, problèmes sans ou avec contraintes d'égalité ; cas des fonctionnelles, problèmes sans ou avec contraintes.
- Transformations et distributions (Cours : 6h, TD : 12h) : définitions et exemples de distributions ; opérations type translation, dérivation et convolution ; séries et transformation de Fourier, transformation de Laplace.
- Modélisation mathématique et calcul scientifique avec Mathematica (TD: 6h, TP: 12h) : initiation au logiciel de manipulations symboliques Mathematica en TD sur machine avec illustrations de cours ; les travaux pratiques, orientés modélisation et calcul avec le logiciel Mathematica, se déroulent en mode projets encadrés à la façon des TPE ou TIPE, en petits groupes (3 recommandé) sur des sujets individualisés, avec à l'issue un rapport à remettre ; liste des sujets accessible en ligne sur Moodle ou sur le site: <http://macmaths.ens2m.fr/students>

SHS2 : (26h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
AYASSE Bernard	26	0	26	0	0	0	2

Mode d'évaluation :

Evaluation du travail de groupe : écrit (dossier) et oral

Projet : 1^{er} semestre : écrit + oral

2^{ème} semestre : évaluation du travail réalisé à partir d'une grille multicritère

Détail du programme :

-Communication

- Bases générales en communication
- Les normes de l'écrit professionnel
- Méthodologie et outils d'aide à la définition de son projet professionnel
- Étude sectorielle
- CV, lettre de motivation et techniques de recherche de stage et d'emploi
- Améliorer la maîtrise de sa communication orale
- Le marketing de soi à travers LinkedIn

PROGRAMME DE DEUXIEME ANNEE

			Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
TRONC COMMUN	UEV1	SHS3	30	0	28	0	2	0	2
		LV3	60	0	60	0	0	0	3
	TOTAL		90	0 0%	88 98%	0 0%	2 2%	0 0%	5
INGENIERIE DES SYSTEMES	UES1	SDM2	16	12	0	4	0	0	1
		OPT3	16	8	4	4	0	0	1
		MATH4	46	14	32	0	0	0	3
		INFO2	30	8	0	22	0	0	2
	UES2	CM3	60	0	60	0	0	0	4
		AUT2	92	22	20	50	0	0	6
	UES3	FAB2	100	38	26	32	0	4	6
		μTECH1	20	8	4	8	0	0	2
	TOTAL		380	110 29%	142 38%	120 32%	0 0%	4 1%	25
	INGENIERIE DES PRODUITS	UEP1	SDM3	46	16	14	16	0	0
OPT2			16	8	4	4	0	0	1
MATH3			46	14	32	0	0	0	3
UEP2		CM2	60	0	60	0	0	0	4
		ELEC2	70	12	42	16	0	0	4
		μTECH2	20	8	4	8	0	0	2
UEP3		CDS	60	4	32	24	0	0	4
		DYN2	60	14	26	20	0	0	4
TOTAL		378	76 20 %	214 57 %	88 23 %	0 0%	0 0%	25	
			848	186 22%	448 53%	208 25%	2 0%	4 0%	60

2^{ème} année : Tronc commun

90 heures d'enseignement, 5 ECTS, 1 unité d'enseignement

Unité d'enseignement	Responsable	Total (h)	ECTS
UEV1 : SHS3 + LV3		90	5

SHS3 : ERGONOMIE ET PHYSIOLOGIE (30h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
P. GRAILHE	30	0	28	0	2	0	2

Mode d'évaluation : Projet + Examen (2h)

Détail du programme :

Fonctionnement du corps en mouvement (monde professionnel et de loisirs/sport)

Rappel des principes de fonctionnement du corps humain (cardio-respiratoire, neurologique), de l'anatomie (arthrologie, myologie) et de la physiologie de l'effort. Les fondamentaux de la biomécanique et de l'analyse du mouvement humain (plans, axes et mouvements, anthropométrie, ergonomie) sont abordés d'un point de vue théorique et renforcés par le travail sous forme de projets et d'auto-apprentissage. Sont également étudiés les principes fondamentaux de la mécanique appliqués à l'expression de la force, souplesse et résistance du système musculaire et ostéo-tendineux. Enfin, le cours relatif à la diététique-nutrition permettra d'optimiser le mouvement de l'homme (quotidien ou sportif). Pour finir, les effets du stress professionnel (physique et psychologique) et l'analyse/évaluation/prévention des risques professionnels seront des thèmes abordés pour la compréhension des interactions de l'homme (physiologie, anatomie, cognition) au travail/loisir/sport.

LV3 : LANGUES VIVANTES (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
J. DU VERGER	60	0	60	0	0	0	3

Langue Vivante 1 : Anglais (30h)

Mode d'évaluation :

Les élèves sont évalués sur leur compétence orale et écrite. L'évaluation tiendra aussi compte de l'assiduité de l'élève ainsi que de son implication pendant le cours (pair work, debating, etc.)

(« Assessment Test » (questions de cours) + Projet + note d'oral)

Détail du programme :

Le cours se propose de consolider et développer les outils linguistiques qui permettront aux élèves de poursuivre l'ouverture culturelle sur le monde anglophone et d'aborder l'international, à travers l'étude de sujets d'actualités et/ou culturels.

Il s'agira également de renforcer la compréhension écrite et orale ainsi que l'expression écrite et orale des élèves amorcée en première année, toujours dans le contexte d'une pédagogie de projet (présentation orale en fin de semestre).

Le cours constitue enfin un approfondissement de la langue et du vocabulaire technique de l'ingénieur par l'étude de différents textes scientifiques mais aussi en lien avec l'anglais des affaires dans le cadre de la préparation au BULATS.

Langue Vivante 2 : Anglais renforcé, allemand, espagnol et japonais (30h)

Mode d'évaluation et programme :

Les cours d'allemand et d'espagnol constituent une préparation au BULATS. Les élèves sont soumis à plusieurs évaluations au cours du semestre (le nombre et les modalités de ces évaluations varient selon les langues enseignées)

Le cours d'anglais renforcé propose quant à lui une préparation intensive au BULATS (grammaire, vocabulaire et compréhension orale). L'élève devra effectuer 2 BULATS blancs ; il sera aussi tenu compte de son assiduité ainsi que de son implication pendant le cours (note d'oral).

2^{ème} année : Parcours Ingénierie des Systèmes

375 heures d'enseignement, 25 ECTS, 3 unités d'enseignement

Unités d'enseignement	Responsable	Total (h)	ECTS
UES1 : SDM2 + OPT3 + MATH4 + INFO2		108	7
UES2 : CM3 + AUT2		150	10
UES3 : FAB2 + μ TECH1		120	8

AUT2: AUTOMATIQUE (90h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
Y. LE GORREC	92	22	20	50	0	0	6

Mode d'évaluation :

Détail du programme :

- Automatique avancée
 - o Contenu horaire : Cours 8h, TD 12h, TP 12h
 - o Description : représentation d'état, commande par retour d'état, observateurs de Luenberger
- Commande par microcontrôleur
 - o Contenu horaire : Cours 6h, TD 8h, TP 22h
 - o Description :
- Optimisation des systèmes
 - o Contenu horaire : Cours 8h, TP 16h
 - o Description : optimisation pour la modélisation et la commande des systèmes dynamiques et la robotique, optimisation non linéaire sans contrainte et sous contraintes, optimisation multiobjectif pour l'identification de modèles, de dimensionnement de structures, l'étalonnage et le réglage optimal de correcteurs

CM3 : ECO-CONCEPTION MECANIQUE (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
M. FONTAINE	60	0	60	0	0	0	4

Mode d'évaluation : Evaluation basée sur une grille de compétences :

- En continu pendant les séances de TD
- Par projet à partir de plusieurs livrables en cours de semestre

Objectif : Ce module de 2^{ème} année a pour objectif de former à la démarche d'écoconception d'un système mécanique : du besoin à l'avant-projet, en mettant en avant le respect de l'environnement et la robustesse du système conçu. L'enseignement s'appuie sur un projet d'apprentissage pour aborder toutes les compétences nécessaires à la mise en œuvre d'une telle démarche.

Détail du programme :

- Analyse du besoin et des contraintes techniques et environnementales
- Rédaction du cahier des charges fonctionnel
- Recherche de solutions par approche systémique
- Choix d'une solution après simulation et optimisation numérique (outil CAO et notion de squelette)
- Dimensionnement des liaisons
- Définition de pièces témoins sélectionnées par l'enseignant :
 - o Optimisation en fonction des contraintes mécaniques
 - o Optimisation en fonction de critères environnementaux
 - o Optimisation en fonction de son obtention en lien avec les modules Fabrication (FAB2)
 - o Cotation et mis et en plan
- Gestion de la maquette numérique via un outil de Product Life Management (PLM).

FAB2 : FABRICATION MECANIQUE ET METROLOGIE (92h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
C. DIELEMANS	100	38	26	32	0	4	6

Mode d'évaluation : voir détail du programme

Détail du programme :

- Méthodes de fabrication mécanique
 - o *Programme* : (22h C, 20h TD, 20h TP)
 - o Evaluation : partiel (70%) + TP ou projet (30%)
 - o Contenu : Méthodes de fabrication : conception de l'avant-projet du processus de fabrication d'un produit micromécanique. Cotation de fabrication et maîtrise statistique des procédés. Simulation d'usinage, modélisation et FAO. Introduction à la conception des outillages (moule d'injection et outils à suivre pour le découpage- pliage et emboutissage).
- Métrologie et qualité
 - o *Programme* : (16h C, 6h TD, 12h TP, conférence 4h)
 - o Evaluation : partiel (70%) + TP ou projet (30%)
 - o Contenu pour la métrologie : Calculs d'incertitudes et métrologie pour la micromécanique : Caractérisation des processus de métrologie sans contact et maîtrise des modes opératoires. Etudes des normes spécifiques et applications à la mesure d'états de surface et à la spécification géométriques des produits.
 - o Conférence : déploiement de la qualité en production pour un objectif de 0 ppm – Damien Chardaire – Sonceboz SA
 - o Plans d'expériences : plans d'expériences fractionnaires et méthode Tagushi.

INFO2 : DEVELOPPEMENT LOGICIEL AVEC SCRUM (30h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
G. LAURENT	30	8	0	22	0	0	2

Mode d'évaluation :

Détail du programme :

Ce module aborde la gestion de projets informatiques à l'aide la méthode SCRUM. Il est organisé autour d'un projet commun réalisé en équipe. Chaque étudiant doit choisir un rôle dans l'équipe projet. Il est entendu que les étudiants ne développent pas les mêmes compétences en fonction de leur rôle, d'où un mode d'évaluation spécifique.

Le projet a pour objectif de développer une application connectée type client-serveur et sera réalisé principalement en Java et SQL sur différents systèmes (PC, android). Les nouvelles notions abordées en POO (héritage, interface, polymorphisme) sont dans la continuité du module INFO1 de première année (prérequis). L'utilisation des bases de données est également au programme du module.

Constitution de l'équipe projet :

- scrum master
- product owner
- infographiste
- développeurs clients PC
- développeurs clients android
- développeurs clients Access ?

MATH4 : RESOLUTION DE SYTEMES ALGEBRIQUES (46h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
G. NAMAHA N. ALIBAUD	46	14	32	0	0	0	3

Mode d'évaluation : un partiel en Résolution des Systèmes + un contrôle sur Ordi en Approx des EDP + un partiel en EDP. La moyenne sera calculée au prorata des heures.

Détail du programme :

Résolution des systèmes algébriques et différentiels, linéaires et non linéaires : analytique et/ou numérique

- Analyse qualitative des EDP

Principales EDPs de la physique : chaleur, Laplace, transport, ondes ; quelques méthodes de résolution : Fourier, Laplace, Green, méthode des caractéristiques, analyse spectrale, analyse variationnelle.

- Analyse numérique et calcul scientifique

Principales méthodes d'approximation : différences finies, éléments finis, méthode spectrale, optimisation; introduction à l'analyse des schémas : consistance, précision, stabilité et convergence ; mise en œuvre avec Matlab.

OPT3 : OPTIQUE (16h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
B. CAVALLIER	16	8	4	4	0	0	1

Mode d'évaluation : 1 examen (2/3) + 1 TP (1/3)

Détail du programme :

Interaction lumière-matière ; applications des lasers : procédés de gravure, soudure, découpage, impression ; sécurité laser ; Vision ; photométrie ;

SDM2 : PROPRIETES PHYSIQUES DES MATERIAUX ET METHODOLOGIE DE CHOIX (16h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
M. DEVEL N. MARTIN	16	12	0	4	0	0	1

Mode d'évaluation : 1 partiel sur les deux parties du module

Détail du programme :

- Propriétés physiques des matériaux

Conduction électrique dans les métaux et les semi-conducteurs, effets thermoélectriques de base (Seebeck, Peltier, Thomson), description phénoménologique des lois de comportement simples ou couplées (capacité calorifique, élasticité, permittivité diélectrique, susceptibilité magnétique, dilatation thermique, effets piézoélectrique, etc.).

- Choix des matériaux

Méthode Ashby pour la sélection de matériaux : fonctions d'objectif et indices de performance. TP avec utilisation d'un logiciel spécialisé pour le choix de matériaux lors de la conception d'objets.

μTECH1 : MICROTECHNIQUES (20h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
S. GAUTHIER	20	8	4	8	0	0	2

Mode d'évaluation :

Evaluation : partiel (2/3) + compte rendu de TP et ou QCM (1/3)

Objectif : Introduction aux technologies de salle blanche

Détail du programme :

- Cours : (S. Margueron - 4 H)

Introduction à la photo-lithographie - Limites de résolution et principaux procédés de résines photosensibles - Méthodes de microfabrication collective, différentes photolithographies. Exemples de dispositifs. Notions sur l'usinage chimique des métaux, du silicium par voir humide, principes de la gravure plasma. Technique LIGA : photolithographie, dépôt galvanique, micromoulage, nano-impresion. Classes d'empoussiérage et règles d'utilisation d'une salle blanche.

- Cours : (J-Y Rauch - 4 H)

Méthodes de dépôts de couches minces métalliques et diélectriques - Évaporation, pulvérisation cathodique et applications. Présentation de la physique du vide, le libre parcours moyen des particules sous vide, -gaz et espèces vapeurs métalliques- . Présentation des équipements destinées à faire des dépôts PVD/CVD. Mode d'installation, servitude, contrôle des procédés, pureté des gaz et qualité des dépôts. Principe de la pulvérisation, simple, diode, magnétron, effet du bias sputtering sur la densité, les contraintes, effet du magnétron sur l'homogénéité. Principe de l'évaporation, homogénéité et densité, indice optique des couches obtenues. Comparaison des propriétés de l'évaporation et la pulvérisation au niveau de la lithographie, lift on (gravure)/lift off. Présentation de la machine de dépôt de l'ENSM, ses avantages, ses limites.

- TD (S. Gauthier - 4h) :

Réalisation des flow chart pour les TP et d'un masque personnel pour le procédé gravure directe plus visite salle blanche.

- TP salle blanche (S. Gauthier - 8h) :

Introduction à la photolithographie - Couches minces : enduction de résine par centrifugation - Photolithographie de contact simple face – Résines positives et inversibles - Résines épaisses - Dépôt et gravure de couches minces métalliques - Procédés de gravure directe et lift-off.

2^{ème} année : Parcours Ingénierie des Produits

375 heures d'enseignement, 25 ECTS, 3 unités d'enseignement

Unités d'enseignement	Responsable	Total (h)	ECTS
UEP1 : SDM3 + OPT2 + MATH3		106	7
UEP2 : CM2 + ELEC2 + μ TECH2		150	10
UEP3 : CDS + DYN2		120	8

CDS : CALCUL DE STRUCTURES (Structural Mechanics) (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
S. THIBAUD	60	4	32	24	0	0	4

Mode d'évaluation : 2 partiels + évaluation TD/TP

Détail du programme : Méthode des éléments finis linéaires adaptée au calcul de structures

Formulation intégrale et méthodes variationnelles en mécanique des milieux continus - Méthode d'approximation et discrétisation des formes intégrales - Méthode des Éléments Finis - Calculs élémentaires et élément de référence - Éléments finis Solides - Éléments finis de plaque - Éléments finis structuraux (poutres et barres) - Méthodes numériques de résolutions - Contraintes cinématiques et contact - Instabilité structurales (flambage) - Éléments de modélisation et techniques d'assemblage - Elasticité isotrope et anisotrope.

CM2 : CONCEPTION MECANIQUE (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
J.F. LANOY	60	0	60	0	0	0	4

Mode d'évaluation : Evaluation basée sur une grille de compétences :

- En continu pendant les séances de TD
- Par projet

Objectif : Ce module de 2^{ème} année a pour objectif de former à la démarche de conception : du besoin à l'avant-projet. L'enseignement s'appuie sur un projet d'apprentissage pour aborder toutes les compétences nécessaires à la mise en œuvre d'une telle démarche. L'acquisition de ces compétences sera évaluée en continu pendant les séances et à travers un projet personnel.

Détail du programme :

- Analyse du besoin et cahier des charges
- Recherche de solutions par approche systémique
- Choix d'une solution après simulation et optimisation numérique (outil CAO et notion de squelette)
- Dimensionnement des liaisons

- Définition des pièces :
 - o Optimisation en fonction des contraintes mécaniques en lien avec les modules Mécanique (MECA3) et Electronique (ELEC2)
 - o Optimisation en fonction de son obtention
 - o Cotation
- Gestion de la maquette numérique par PLM

DYN2 : DYNAMIQUE DES STRUCTURES (Structural Dynamics) (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
E. FOLTETE M. OUISSE	60	14	26	20	0	0	4

Mode d'évaluation : 3 partiels + évaluation TD/TP

Détail du programme :

Oscillateur mécanique élémentaire (fréquence propre, réponse libre, réponse forcée, FRF)
 Approche hamiltonienne (établissement d'une équation de mouvement)
 Hypothèses cinématiques pour les vibrations de poutres
 Vibrations longitudinales des poutres (ondes, modes, réponse libre)
 Vibrations de flexion des poutres (ondes, modes, réponse libre)
 Formalisme analytique général d'un problème de dynamique des structures
 Introduction à l'analyse numérique en dynamique des structures (méthode de Ritz, éléments finis)
 Formalisme algébrique en vibrations (modes, réponse libre, réponse forcée)

ELEC2 : ELECTRONIQUE (62h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
J. IMBAUD	70	12	42	16	0	0	5

Mode d'évaluation :

La moyenne du module est faite au prorata des heures d'enseignement de chaque partie

Détail du programme :

Conversion d'énergie (10h) : N. Ratier
Objectif : Composants pour la conversion d'énergie
Programme : (4h C, 6h TD)
 Cours : Hacheur, onduleur, redresseur
 TD : Applications hacheur, onduleur, redresseur
Mode d'évaluation : 1 Examen

Dimensionnement moteurs (18h) J. Imbaud

Objectif : Choix et dimensionnement d'un moteur faible puissance (< 1kW)
Programme : (4h C, 6h TD, 8h TP)
 Cours : Magnétisme, moteurs DC, asynchrone, synchrone

TD : Magnétisme, dimensionnement de moteurs AC et DC

TP : Moteur DC et Moteur Asynchrone triphasé

Mode d'évaluation : 1 Examen + note TP

Conditionnement du signal (14h) : S. Galliou, Y. Kersalé

Objectif : A travers une étude de cas, appréhender la question du conditionnement du signal en fonction du rapport signal/bruit d'origine

Programme : (14h TD)

7 séances de 2h de TDs dont 3 séances orientées vers la simulation

L'exemple traité à travers les 7 séances de TD est une chaîne d'amplification du petit signal produit par un capteur résistif, avec comparaison de l'amplification simple et de l'amplification synchrone. Les différentes fonctions de cette chaîne sont justifiées et traitées précisément.

Mode d'évaluation : 2h d'examen

Instrumentation (28 h) : F. Sthal

Objectif : Concevoir et mettre en œuvre un système de mesures ou contrôle informatisé

Programme : (4h C, 16h TD, 8h TP)

Cours : Base de l'instrumentation informatisée et circuits logiques programmables

TD : Programmation dédiée à l'instrumentation et aux systèmes embarqués

TP : Acquisition de données (utilisation d'une carte multifonction 6024E) et Contrôle d'instruments (pilotage d'appareils de table)

Mode d'évaluation : 1 Examen + 1 Examen TD + notes TD/TP sous moodle

MATH3 : RESOLUTION DES SYSTEMES ALGEBRIQUES (46h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
R. TITTARELLI	46	4	42	0	0	0	3

Mode d'évaluation : Résolution des Systèmes : un partiel, Approximation des EDP : présence 10%, projet 20% et examen 70%. La moyenne du module sera calculée au prorata des heures.

Détail du programme :

Résolution des systèmes algébriques et différentiels, linéaires et non linéaires : analytique et/ou numérique

Approximation des EDP : Il s'agit essentiellement de la technique des calculs par éléments finis pour la résolution numérique sur ordinateur de système d'équations aux dérivées partielles (EDP) : Définition d'un élément fini - Interpolation de Lagrange et d'Hermite - Intégration numérique - Formulation variationnelle – Application à des problèmes concrets d'ingénierie d'origine mécanique -Programmation et mise en œuvre informatique à l'aide de Matlab/Octave

OPT2 : OPTIQUE (16h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
D. TEYSSIEUX	16	8	4	4	0	0	1

Mode d'évaluation : 1 exam (2/3) + 1 TP (1/3)

Détail du programme :

Instrumentation lasers et métrologie : vibrométrie ; gyrométrie ; télémétrie ; speckle ; projection de franges ; sécurité lasers

SDM3 : PROPRIETES PHYSIQUES DES MATERIAUX DE METHODOLOGIE DE CHOIX (46h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
M. DEVEL N. MARTIN	46	16	14	16	0	0	3

Mode d'évaluation : 2 partiels + moyenne des TP (coef. 1/3 - 1/3 - 1/3)

Détail du programme :

- Propriétés physiques des matériaux

Initiation à la mécanique quantique, chaleur du réseau (modélisation d'Einstein et de Debye de la capacité calorifique, phonons, lois de Fourier pour la diffusion, rayonnement thermique, conductivité thermique), conduction électrique dans les métaux et les semi-conducteurs (modèle du gaz d'électrons libres, théorie des bandes, dopage, effet Hall), magnétisme, piézo- et thermoélectricité.

3 séances de TP de 4h parmi 4 sujets : conduction électrique, conductivité thermique de différents matériaux, diffusion de la chaleur dans un barreau d'acier, variations de la capacité calorifique de matériaux élémentaires avec la température.

- Choix des matériaux

Méthode Ashby pour la sélection de matériaux : fonctions d'objectif et indices de performance, facteur de forme géométrique. TP avec utilisation d'un logiciel spécialisé pour le choix de matériaux lors de la conception d'objets.

μTECH2 : MICROTECHNIQUES (20h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
S. GAUTHIER	20	8	4	8	0	0	2

Mode d'évaluation :

Evaluation : partiel (2/3) + compte rendu de TP et ou QCM (1/3)

Objectif : Introduction aux technologies de salle blanche

Détail du programme :

- Cours : (S. Margueron - 4 H)

Introduction à la photo-lithographie - Limites de résolution et principaux procédés de résines photosensibles - Méthodes de microfabrication collective, différentes photolithographies. Exemples de dispositifs. Notions sur l'usinage chimique des métaux, du silicium par voir humide, principes de la gravure plasma. Technique

LIGA : photolithographie, dépôt galvanique, micromoulage, nano-impression. Classes d'empoussiérage et règles d'utilisation d'une salle blanche.

- Cours : (J-Y Rauch - 4 H)

Méthodes de dépôts de couches minces métalliques et diélectriques - Évaporation, pulvérisation cathodique et applications. Présentation de la physique du vide, le libre parcours moyen des particules sous vide, -gaz et espèces vapeurs métalliques- . Présentation des équipements destinées à faire des dépôts PVD/CVD. Mode d'installation, servitude, contrôle des procédés, pureté des gaz et qualité des dépôts. Principe de la pulvérisation, simple, diode, magnetron, effet du bias sputtering sur la densité, les contraintes, effet du magnétron sur l'homogénéité. Principe de l'évaporation, homogénéité et densité, indice optique des couches obtenues. Comparaison des propriétés de l'évaporation et la pulvérisation au niveau de la lithographie, lift on (gravure)/lift off. Présentation de la machine de dépôt de l'ENSMM, ses avantages, ses limites.

- TD (S. Gauthier - 4h) :

Réalisation des flow chart pour les TP et d'un masque personnel pour le procédé gravure directe plus visite salle blanche.

- TP salle blanche (S. Gauthier - 8h) :

Introduction à la photolithographie - Couches minces : enduction de résine par centrifugation - Photolithographie de contact simple face – Résines positives et inversibles - Résines épaisses - Dépôt et gravure de couches minces métalliques - Procédés de gravure directe et lift-off.

PROGRAMME DE TROISIEME ANNEE

La troisième année est composée de 3 Unités d'Enseignements

- UEOTC (120h) : Science Humaines et Sociales
 - SHS4 : Economie / Gestion
 - LV4 : Anglais + Langue vivante (allemand, espagnol, japonais)

- UEOPIST (90h) : Projet interdisciplinaire en Science et Techniques (PIST)

- 1 Unité d'Enseignement spécifique* (240h)
 - UEOBMS : Bio-Microsystèmes
 - UEOCROC : Conception et réalisation d'objets connectés
 - UEOIMM : Ingénierie micromécanique
 - UEOISP : Ingénierie des systèmes de production
 - UEOMAS : Mécanique avancée des structures
 - UEOMIND : Méthodes d'industrialisation
 - UEOMSF : Matériaux et surfaces fonctionnels
 - UEOSMR : Systèmes mécatroniques et robotiques

* chaque élève suit une seule UE spécifique

	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	Projet	ECTS
UEOTC	120	2	118	0	0	0	0	8
UEOPIST	90	0	0	0	0	0	90	6
UEOBMS	240	170	6	48	0	16	0	16
UEOCROC	240	98	82	44	2	14	0	16
UEOIMM	240	14	118	108	0	0	0	16
UEOISP	240	120	50	70	0	2	0	16
UEOMAS	240	70	70	100	0	0	0	16
UEOMIND	240	62	80	64	4	30	0	16
UEOMSF	240	154	42	40	0	4	0	16
UEOSMR	240	110	78	48	0	4	0	16

3ème année : Tronc commun (UEOTC)

120 heures d'enseignement, 8 ECTS, 1 unité d'enseignement

Unité d'enseignement	Responsable	Total (h)	ECTS
UEOTC : SHS4 + LV4		120	8

SHS4 : Economie / Gestion/ Management/ Conduite projets/Compétences comportementales ... (60h)

L'objectif de ce module est de sensibiliser les élèves ingénieurs à de nouveaux domaines (droit, marketing...); leur donner quelques clés de compréhension de l'environnement de l'entreprise; leur fournir quelques outils de gestion, développer des compétences comportementales...

Option IMM

Responsables	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
N. BILLOT	30	0	30	0	0	0	4
G. SAUSER	12	0	12	0	0	0	
C. GALLON	24	14	10	0	0	0	

Détail du programme NB :

- Les relations fournisseurs
- Communication écrite : les écrits professionnels
- Calcul de coûts : une méthode de coûts complet (méthode des centres d'analyse)
- Responsabilité civile
- Droit du travail : les relations de travail ; le salarié dans l'entreprise ; les modifications du contrat de travail ; les modalités de rupture du contrat de travail.
- Plan de management de projet (à rendre)

Détail du programme : GS

- Marketing :
 - Sensibilisation à l'étude de marché.

Détail du programme : CG

- Développement personnel
- Gestion de situations difficiles
- Management et animation d'équipes
- Conduite de projets

Autres options :

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
BILLOT Naznine	30	0	30	0	0	0	4
AYASSE Bernard	30	16	14	0	0	0	

Détail du programme NB BMS

- **Les relations fournisseurs**
- **Communication écrite : les écrits professionnels**
- **Calcul de coûts : une méthode de coûts complet (méthode des centres d'analyse)**
- **Responsabilité civile**
- **Droit du travail : les relations de travail ; le salarié dans l'entreprise ; les modifications du contrat de travail ; les modalités de rupture du contrat de travail.**
- **Plan de management de projet (à rendre)**

Détail du programme NB ISP

- Les relations fournisseurs
- Communication écrite : les écrits professionnels
- Calcul de coûts : une méthode de coûts complet (méthode des centres d'analyse)
- Rentabilité d'un investissement
- Droit du travail : les relations de travail ; le salarié dans l'entreprise ; les modifications du contrat de travail ; les modalités de rupture du contrat de travail.
- Projet SHS : entreprise franc comtoise (hors séances de cours)
- Plan de management de projet (à rendre)

Détail du programme NB ISP

- Calcul de coûts : une méthode de coûts complet (méthode des centres d'analyse)
- Rentabilité d'un investissement
- Responsabilité juridique
- Droit du travail : les relations de travail ; le salarié dans l'entreprise ; les modifications du contrat de travail ; les modalités de rupture du contrat de travail.
- Projet SHS : entreprise franc comtoise (hors séances de cours)
- Plan de management de projet (à rendre)

Détail du programme NB MSF

- Calcul de coûts : une méthode de coûts complet (méthode des centres d'analyse)
- Rentabilité d'un investissement
- Responsabilité juridique
- Droit du travail : les relations de travail ; le salarié dans l'entreprise ; les modifications du contrat de travail ; les modalités de rupture du contrat de travail.

- Projet SHS : entreprise franc comtoise (hors séances de cours)
- Plan de management de projet (à rendre) ; 1-2 séances dédiées au plan de management de projet

Détail du programme NB SMR

- Calcul de coûts : une méthode de coûts complet (méthode des centres d'analyse)
- Rentabilité d'un investissement
- Droit du travail : les relations de travail ; le salarié dans l'entreprise ; les modifications du contrat de travail ; les modalités de rupture du contrat de travail.
- Projet SHS : entreprise start-up ou intégrateur (hors séances de cours) (à rendre)

Détail du programme NB CROC

- Calcul de coûts : une méthode de coûts complet (méthode des centres d'analyse)
- Rentabilité d'un investissement
- Droit du travail : les relations de travail ; le salarié dans l'entreprise ; les modifications du contrat de travail ; les modalités de rupture du contrat de travail.
- Projet SHS (hors séances de cours) : axé objet connecté ou sécurité des données, gestion des données, aspect légal ; confidentialité et sécurisation des données ; CNIL ; RGPD ; éthique et objets connectés ; innovation ; financement ; métiers et compétences
- Plan de management de projet (à rendre)

Détail du programme NB MAS

- Calcul de coûts : une méthode de coûts complet (méthode des centres d'analyse)
- Seuil de rentabilité
- Rentabilité d'un investissement
- Droit du travail : les relations de travail ; le salarié dans l'entreprise ; les modifications du contrat de travail ; les modalités de rupture du contrat de travail.
- Projet SHS : entreprise franc comtoise (hors séances de cours) (à rendre) ou mini forum

Management (30 heures) (BA)

Modes d'évaluation :

- 1 partiel en fin de semestre
- Projet (restitution orale)

En CM (16h) :

- **Introduction au management** : origines, figures clés, définition, formes actuelles problématiques actuelles, liens avec les métiers de l'ingénieur.
- **Décrire l'entreprise** : caractéristiques économiques, juridiques et sociales (formes juridiques, types d'entreprise, capital social, etc.)
- **L'environnement interne et externe de l'entreprise** : buts organisationnels, structures, organigramme, relations formelles et informelles, jeux de pouvoir, ...
- **Planifier et organiser le travail** : notions d'objectif et de programme, démarches top down et bottom up, styles de direction, centralisation et décentralisation, modalités de répartition du travail.

- **Mobiliser les hommes au travail** : motivation, implication, engagement, théories de la motivation, approfondissement sur les styles de direction, leadership, dynamique des groupes, conflits et modes de traitement.

En TD (14h) :

- **Projet** : décrire un environnement managérial et organisationnel en s'appuyant sur ses expériences de stage.
- **Contrôler et réguler le travail** : enjeux du contrôle, pilotage par les indicateurs, tableaux de bord, mise en œuvre du contrôle, ...
- **Bases en management de projet** : notion de projet, démarche projet, facteurs d'échec et facteurs de réussite.

LV4 : Langues vivantes (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
J. DU VERGER	60	0	60	0	0	0	4

Anglais

Le cours insistera sur l'utilisation de l'anglais en milieu professionnel. Les élèves seront amenés à découvrir les différentes étapes de la recherche d'un emploi/stage. Ils sont familiarisés à la rédaction des différents types de CV (*chronological CV* et *skills-based CV*) et de *cover letters*. On insistera tout particulièrement sur la communication en situation professionnelle (*telephoning...*) ainsi qu'à la communication écrite dans le cadre de l'entreprise (rédaction de mails, de mémos, de *progress reports...*). Le but étant de permettre à nos élèves de maîtriser les outils essentiels de l'anglais professionnel.

Les élèves seront également entraînés aux techniques de la présentation orale. Le but de cet exercice est de leur permettre de présenter leur stage de MU2 (description de l'entreprise, son organisation, le travail de stage, les objectifs, les résultats et conclusion personnelle sur leur futur métier d'ingénieur), le fonctionnement d'un produit technologique complexe...

Toujours dans l'optique de la professionnalisation de nos élèves-ingénieurs le cours propose une introduction à l'anglais technique dans l'atelier de production et sur la plateforme partenariale S.M.A.R.T. Il s'agit ici de donner aux élèves-ingénieurs les outils linguistiques qui leur permettront de faire une visite guidée de l'atelier ou de la plateforme partenariale à un groupe (d'industriels, de clients...) et/ou d'expliquer le fonctionnement d'une machine (*Multi-spindle automatic lathe, EDM Wire and Die Sink machine, Tool Presetter*) ou d'un tomographe, d'un bras robotisé afin d'en exposer l'utilité et les spécificités techniques.

Le cours permettra d'approfondir également la connaissance et la maîtrise de l'anglais pour ingénieurs. Il est notamment axé sur la communication scientifique écrite et orale dans la mesure où les élèves sont amenés à rédiger et présenter en anglais un *mini-project* qui porte sur leur projet de fin d'études. Le cours insistera, en outre, sur la communication de données techniques et scientifiques ainsi que sur le commentaire de graphiques ou de tableaux statistiques. Le but étant que les élèves aient une meilleure maîtrise de la communication orale comme écrite dans le cadre du monde du travail.

Bien évidemment le cours s'ingéniera à familiariser les élèves aux différents aspects du monde anglophone (société, histoire...) à travers l'actualité et l'analyse de différents événements culturels en utilisant des supports variés (presse écrite, internet, audio et vidéo).

Langue vivante 2

Allemand – Anglais renforcé – Espagnol – Japonais.

Certification en Allemand (Goethe Institut) ou en Espagnol (Institut Cervantes).

Anglais renforcé : Le cours de soutien a pour objectif de permettre aux élèves de bénéficier d'une remise à niveau et surtout d'une préparation renforcée du BULATS Cambridge ESOL (Linguaskill examen de l'université de Cambridge à partir de janvier 2020).

Evaluation en anglais renforcé : 1/3 contrôle continu (participation et assiduité) + 1/3 BULATS blancs + 1/3 examen des structures grammaticales et le lexique vus en cours.

3^{ème} année : Projet Interdisciplinaire en Sciences et Techniques (UEOPIST)

90 heures, 6 ECTS, 1 unité d'enseignement

Cette UE est constituée d'un projet de 90h.

Les sujets de projets peuvent être apportés par l'étudiant ou proposés par l'équipe pédagogique d'une des UE spécifiques (voir contenu des UE spécifiques pour des exemples de projet).

Le sujet et les modalités de déroulement du projet sont validés par le responsable de l'UE spécifique dans laquelle l'étudiant est affecté. Dans le cas d'une équipe projet, les responsables des UE spécifiques concernées fixent les modalités de déroulement du projet.

3^{ème} année : Bio microsystèmes (UEOBMS)

240 heures d'enseignement, 16 ECTS, 1 unité d'enseignement

Responsable : Pierre GRAILHE (pierre.grailhe@supmicrotech.fr)

	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
BMS1 : Biomécanique	68	50	0	12	0	6	4
BMS2 : Microsystèmes avancés et microsystèmes pour la santé	62	30	6	24	0	2	4
BMS3 : Optique, imagerie pour le biomédical et nano-biotechnologies	50	34	0	12	0	4	4
BMS4 : Industrialisation des dispositifs médicaux	60	56	0	0	0	4	4

Le secteur de la santé est un secteur en croissance permanente qui profite simultanément des phénomènes de vieillissement et d'augmentation de la population. Le marché mondial de la santé est estimé à 7000 milliards de dollars, ce qui correspond à environ 9% du PIB mondial (source Bloomberg et banque mondiale). La formation proposée répond à un enjeu sociétal fort qui se traduit par des besoins en ingénieurs de haut niveau pour concevoir et réaliser des dispositifs médicaux allant de la prothèse à l'outil de diagnostic et d'analyse médicale. La formation proposée permet aux ingénieurs de disposer des compétences techniques et scientifiques indispensables aux métiers des technologies de la santé.

Une des spécificités de la formation est d'allier des compétences fortes en Microsystèmes et en santé permettant de répondre à une vraie problématique d'avenir, à savoir la miniaturisation des outils de diagnostic dans le but d'accroître les performances des systèmes, tout en minimisant leur coût. Un autre aspect de la formation proposée concerne la biomécanique, et particulièrement la compréhension et la mesure des caractéristiques mécaniques du corps humain, dans le but par exemple de concevoir des prothèses orthopédiques ou/et des nouveaux systèmes d'assistance à base d'exosquelette. L'imagerie médicale et la biophotonique sont abordées dans le but de donner de solides bases aux étudiants dans des domaines en pointe dans le médical. Enfin, le domaine des bio-nanotechnologies, en pleine expansion, constitue une part importante de la formation, consolidant un bagage scientifique idéal pour un ingénieur en biomédical.

Les débouchés visés sont transverses, à l'interface des sciences pour l'ingénieur et de la santé. Ils recouvrent des domaines tels que les secteurs de la biomécanique, des prothèses orthopédiques, de l'instrumentation biomédicale, des techniques d'imagerie et des outils pour le diagnostic en biotechnologie, ainsi que la conception de microsystèmes multiphysiques.

Les projets de l'UEOPIST en option BMS

Les sujets proposés peuvent être de trois natures différentes : des sujets de projet classique (proposés par les enseignants), des sujets de projet issus de laboratoire ou des sujets de projets industriels.

Selon les besoins deux orientations différentes peuvent être proposées :

- **Fonctionnement classique** : plusieurs sujets de projet (par binôme ou trinôme), Exemples de sujets déjà proposés :
 - Fabrication d'une prothèse de genou par impression 3D.
 - Détection des mouvements de paupière par électroencéphalogramme.
 - Guide de perçage pour implantologie dentaire (Docteur HaniaNeostéo).
 - Système de mesure angulaire du genu flexum (Neostéo Nantes).
- **Un ou deux sujets très ambitieux** : structuration en équipe projet (chef de projet, réunion, brainstorming... etc).
Exemple de sujets déjà proposés :
 - Automatisation du contrôle de la qualité des plaquettes (EFS Besançon).
 - Dispositif d'assistance à la reconstruction de la mandibule (CHU Besançon).
 - Capsule endoscopique pour la détection de tumeur gastro-intestinale.

Matériel et moyens :

Deux salles de projet sont réservées à l'UE (11 postes informatique). Ces salles sont équipées du matériel de base qui est à disposition des étudiants (oscilloscopes, générateur de signaux, alimentation, matériel optique...etc).

Evaluation :

Un point hebdomadaire est demandé pour chaque groupe en fin de semaine par mail. Une soutenance est programmée à mi-semester (présentation d'environ 10min par groupe selon l'importance du sujet). A la fin du semestre une soutenance finale de 15 min avec question est réalisée et un rapport synthétique et concis (10 pages) doit être rendu. Toutes les soutenances sont effectuées devant la promotion qui participe en partie à l'évaluation finale.

Programme détaillé de l'unité d'enseignement spécifique

BMS1 : Biomécanique (68h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
P. GRAILHE	68	50	0	12	0	6	4

Mode d'évaluation :

Détail du programme :

Biomatériaux (Jamal Takadoum, 8h)

On présentera dans ce cours les principaux biomatériaux connus et on s'intéressera plus particulièrement aux alliages à base de titane, à l'acier 316L, au polyéthylène haute densité haut poids moléculaire, au PEEK, à l'alumine et à la zircone PSZ. De nombreux exemples d'utilisation seront présentés et commentés. On abordera également la problématique de l'ostéo-intégration, de la fonctionnalisation des surfaces des implants avant leur implantation dans le corps humain, ainsi que les questions de réglementation et de normes.

Physiologie et description du handicap (Pierre Grailhe, 8h)

Biomécanique de la paroi artérielle et de l'endothélium, adaptation dynamique de forme et de structure de la paroi artérielle, remodelage osseux, application des lois mécaniques sur le squelette et la formation osseuse, moteur para tétra, différents stades et types du handicap.

Biomécanique (Pierre Grailhe, 4h)

Modélisation : principes généraux. - Application pratique des éléments de mécanique théorique à l'analyse du mouvement humain - Rappels sur la théorie des systèmes de points matériels en interaction - Théorème de la quantité de mouvement et du moment cinétique pour un système poly-articulé - Application au corps humain : le modèle de Winter - Théorème de l'énergie cinétique et évaluation du travail de forces internes. Exemple de la marche - Problèmes posés par l'évaluation du rendement de la machine humaine - Modélisation du déplacement en fauteuil roulant.

Prothèses et dispositifs médicaux (Pierre Grailhe et Damien Teyssieux, 4h)

Définition des prothèses de membres et des prothèses articulaires, différents types et spécificités de prothèses de membres (emboîture, manchon, moignon, etc.), prothèses vasculaires et implants bio-vasculaires.

Electromyographie et exosquelette (Pierre Grailhe et Damien Teyssieux, 16h)

Principes électromyographiques, stimulation et mesure (capteur/actionneur), nouvelles prothèses (myoélectriques, implants cérébraux.....), exosquelette.

Conférences intervenants extérieurs (8h)

La prothèse de l'épaule (Dr Laurent Obert)
Insufflateur instrumenté (Dr Obdo Khoury)

Travaux pratiques (Pierre Grailhe, 12h)

TP1 : Analyse de la marche et contrôle de l'équilibre. Utilisation d'un tapis de marche DMA et plateforme de force.

TP2 : Analyse du mouvement humain (force et couple). Utilisation de goniomètres.

TP3 : Mesure des caractéristiques des mouvements par capteurs inertiels.

BMS2 : Microsystèmes avancés et microsystèmes pour la santé (62h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
S. GAUTHIER	62	30	6	24	0	2	4

Mode d'évaluation :

Détail du programme :

Microsystèmes pour la santé (Thérèse Leblois, 8h)

Il s'agit d'une revue des microsystèmes utilisés dans le domaine de la santé et de l'analyse biomédicale. Dans le cadre de la miniaturisation des capteurs, ce cours met en lumière l'instrumentation de haut niveau associée à l'humain et à son environnement.

Technologies avancées en salle blanche (Thérèse Leblois, 4h)

Ce cours permet d'apporter un complément de connaissances concernant les techniques d'usinage et de dépôt déjà abordées durant le semestre de deuxième année. Les méthodes d'usinage laser, par ultra-son et par plasma, seront abordées.

Conception et développement des MEMS (Stéphane Gauthier, 6h)

Méthodes de conception et de réalisation des masques à partir d'un flow chart. Réalisation pratique d'un masque sur logiciel de conception

Contrôle et test des microsystèmes (Pascal Vairac, 8h)

Ce cours précise les méthodes d'analyse des matériaux, les microscopes pour la caractérisation des propriétés physiques locales et la géométrie et les techniques d'excitation et de détection des micro-dispositifs en cours de fabrication et après fabrication.

Micromanipulation et son contrôle (Aude Bolopion, 10h)

Le cours porte sur les techniques d'actionnement et de contrôle pour le déplacement, le tri, l'assemblage et la caractérisation d'objets microscopiques biologiques et artificiels pour l'analyse biologique et la création d'outils médicaux ; Introduction à la micromanipulation, techniques de manipulation avec contact (les pinces, les pipettes, les poutres, les préhenseurs par glace ou à vide) et techniques de manipulation sans contact (champs électriques, champs magnétiques, pinces optiques, effets hydrodynamiques).

Travaux pratiques (Jean-Yves Rauch, Stéphane Gauthier et Damien Teyssieux, 24h)

TP salle blanche (12h) : Réalisation d'un répliqueur d'ADN.

TP2 (8h) : TP caractérisation des microsystèmes.

TP3 (4h) : TP caractérisation vibratoire des MEMS.

BMS3 : Optique, imagerie pour le biomédical et nano-biotechnologies (50h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
D. TEYSSIEUX	50	34	0	12	0	4	4

Mode d'évaluation :

Détail du programme :

Principes physiques et techniques d'imagerie médicale (Pascal Vairac, 14h)

Le cours passe en revue les interactions physiques utilisées en imagerie médicale : optique, acoustique, rayons X, résonance magnétique nucléaire, ... Les points fondamentaux abordés permettent de cibler les applications des différents principes. Les techniques d'imagerie médicales sont aujourd'hui arrivées à un stade de grande maturité, ce qui limite la diffusion des principes techniques abordés dans le cours. Les méthodes présentées sont : IRM (scanner), radiologie, imagerie acoustique, imagerie par sondes Doppler.

Traitement d'image pour le médical (Nicolas Ratier, 10h)

Il s'agit d'aborder dans ce cours les méthodes de traitement et d'analyse d'image utilisées dans le domaine du médical. Les méthodes de filtrage, d'analyse spectrale et de traitement des données sont traitées.

Biophotonique et optique de l'œil (Damien Teyssieux, 14h)

Cet enseignement aborde, dans une première partie, les notions de microscopie optique et de spectroscopie dans le cadre des matériaux biologiques. Les méthodes de microscopie par fluorescence, de microscopie confocale et de spectroscopie optique (spectroscopie d'absorption, effet Raman etc...) sont traitées. Dans une seconde partie, l'optique de l'œil est abordée tant d'un point de vue géométrique que photonique. Les méthodes de corrections des pathologies réfractives sont présentées, ainsi que les méthodes de mesure et de caractérisation de l'œil.

Microscopie à force atomique (AFM) et microscopie à effet tunnel (STM) (Damien Teyssieux, 6h)

Introduction au principe physique du microscope à force atomique. Utilisation en microscopie. Caractéristiques et potentiels du microscope à force atomique. Exemples d'utilisation.

Introduction théorique de l'effet tunnel. Utilisation de l'effet tunnel pour la microscopie. Caractéristiques et potentiels du microscope à effet tunnel. Exemples d'utilisation.

Bio fonctionnalisation de surface (Wilfrid Boireau, 8h)

Il s'agit de nanobiotechnologies pour les sciences du vivant (manipulation et visualisation de molécules uniques) ; le problème fondamental de la fonctionnalisation de surfaces sera aussi abordé. A petite échelle, les biomatériaux peuvent être nanostructurés, ce qui nécessite une modélisation qui sera introduite. Le problème du déplacement (vectorisation) des molécules biologiques sera aussi évoqué.

Nanobiotechnologies et bio-fonctionnalisation de surface (Frédéric Chérioux, 8h)

Auto-assemblages sur les surfaces : principes et applications aux capteurs. Procédés de salle blanche (nettoyage, résines positives et négatives). Quelques avancées dans le domaine des nanos, progrès en caractérisation, nouvelles méthodes d'organisation sur les surfaces et nouveaux paradigmes pour les capteurs.

Conférences intervenants extérieurs (4h)

Ophthalmologie réfractive et correction par laser

Travaux pratiques (Pascal Vairac et Damien Teyssieux, 12h)

TP1 : Fluorescence et spectroscopie Raman.

TP2 et TP3 : AFM ET STM.

BMS4 : Industrialisation des dispositifs médicaux (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
D. TEYSSIEUX	60	56	0	0	4	0	4

Mode d'évaluation :

Détail du programme :

Propriété intellectuelle (Jean-Paul Maujean, 8h)

Introduction à la sensibilisation au droit de l'immatériel et à la notion de e-réputation. Eléments du droit de la propriété littéraire et artistique et application de ces droits au domaine industriel. Les brevets et les marques ; La protection des dessins et modèles. Droit de la concurrence et propriété intellectuelle.

Industrialisation des dispositifs médicaux (52h)

Le domaine des dispositifs médicaux est le plus strict d'un point de vue normatif et nécessite une très bonne connaissance de la réglementation. L'objectif de ce module est de rendre les étudiants rapidement opérationnels sur des postes en conception, méthodes/industrialisation ou qualité/réglementaire. Les étudiants seront familiarisés avec les outils essentiels (gestion des risques, justification d'échantillonnage par des méthodes statistiques valides, utilisation de normes techniques). Les enseignements de ce module sont une valeur ajoutée forte pour les ingénieurs ENSMM juniors dans le domaine exigeant et réglementé des DMs.

Ils se dérouleront selon les étapes suivantes :

- L'industrialisation des dispositifs médicaux : Présentation du cadre qualité / réglementaire.
- Le transfert de conception : De la conception à la production.
- Procédés de fabrication applicables aux DMs.
- Contrôle en production des DMs.
- Applications, déploiements, qualifications et surveillance.

Les méthodes et outils seront transposables dans les autres domaines industriels.

3^{ème} année : Conception et réalisation d'objets connectés (UEOCROC)

240 heures d'enseignement, 16 ECTS, 1 unité d'enseignement

Responsable : Fabrice STHAL (fabrice.sthal@supmicrotech.fr)

	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
CROC 1 : Conception, design et ergonomie	60	18	34	8	0	0	4
CROC 2 : Composants des objets connectés	60	44	0	8	4	6	4
CROC 3 : Contrôle et réseaux	60	14	30	12	0	4	4
CROC 4 : Traitement de données	60	22	18	16	0	4	4

L'industrie 5.0 et l'internet des objets industriels transforment tous les secteurs d'activités (ex. biomédical, énergie, fabrication, maintenance, production, transports, santé...) en leur assurant une plus grande visibilité du marché, une meilleure connectivité et une considérable marge de progression. La durabilité, l'humain d'abord et la résilience sont les nouveaux piliers de cette industrie d'après pandémie. Qu'il s'agisse de la fabrication d'appareils intelligents ou encore de systèmes complets, la connectivité permet aux acteurs de mieux comprendre le déroulement des événements et aiguise les capacités de décision. La présence de terminaux de plus en plus intelligents, l'analyse des données, les solutions informatiques évolutives, la mobilité et la visualisation redéfinissent clairement l'avenir de la vie industrielle. Ce concept encourage la connexion des activités internationales aux systèmes de l'entreprise et s'étend même aux systèmes métiers pour une meilleure collaboration, une résolution plus rapide des problèmes et une plus grande innovation. Les équipements et appareils deviennent des outils intelligents capables de fournir une mine d'informations sur la production, notamment des rapports de diagnostics et de consommation d'énergie.

L'ingénieur moderne a donc besoin d'un très bon niveau de compétence pour harmoniser la technologie de l'information et la technologie opérationnelle dans le cadre de l'Industrie 5.0. Pour profiter de tous les avantages qu'elle peut offrir, on assiste à la fusion des rôles de la technologie de l'information et de la technologie opérationnelle qui jusque-là étaient longtemps restés séparés. Les ingénieurs doivent devenir compétents dans différents domaines, tels que la technologie de réseau, les composants des objets connectés, l'analyse de données et la sécurité industrielle.

L'objectif de cette option pluridisciplinaire est donc de fournir aux futurs ingénieurs les connaissances thématiques et méthodologiques, pour analyser, concevoir, modéliser, dimensionner et développer des solutions connectées en incluant les problématiques d'autonomie énergétique, de développement durable, de sécurité et d'intégration mécanique et microtechnique.

Le programme est décliné selon 4 modules thématiques : Conception, Design et Ergonomie, Composants des objets connectés, Contrôle et réseaux et Traitement de données. L'accent sera mis sur la pratique à travers un « **Objet Connecté personnel** » qui sera conçu et réalisé durant le semestre.

L'option est accessible avec un contrat de professionnalisation permettant à l'étudiant d'être salarié d'une entreprise pendant toute l'année universitaire, de réaliser son projet en entreprise et d'enchaîner avec un PFE dans le même contexte. Elle permet également la réalisation du master ISC-parcours MIR (Microsystèmes, Instrumentation Embarquée et Robotique) de l'Université de Franche-Comté avec un parcours adapté.

Débouchés : Ingénieurs R&D, production, maintenance, méthode ... tous secteurs d'activité.

Les projets de l'UEOPIST en option CROC

Dans les projets de l'option CROC, l'accent est mis sur la réalisation pratique et le fonctionnement opérationnel en fin de semestre. Généralement, les projets sont effectués par binôme mais il est possible de travailler en collaboration avec des élèves des autres options.

Les sujets en provenance directe des industriels sont privilégiés notamment pour la santé et le bien-être, l'écoconception, l'environnement, Des sujets plateforme partenariale ENSMM en relation avec les thématiques de l'option pourront également être proposés. Les sujets personnels ou associatifs sont les bienvenus. Quelques exemples de projets connectés : avion-drone, bâton de randonnée, contrôle oculaire, montre thérapeutique, poubelle trieuse, selle de cheval, serre bioclimatique, ...

Les notions de gestion de projet, enseignées par un intervenant extérieur spécialisé, seront mises en pratique concrètement sur chacun des projets. Des revues de projets ont lieu régulièrement durant le semestre.

Programme détaillé de l'unité d'enseignement spécifique

CROC1 : Conception, Design et Ergonomie

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
K. PHAN HUY	60	18	34	8	0	0	4

Objectif :

Maîtriser la conception d'un produit connecté

Mode d'évaluation :

Validation des compétences avec l'ObC personnel

Détail du programme :

- Architecture générale (2h CM)* : Introduction aux objets connectés, contexte, principe, RGPD.
- Design, Ergonomie et Normes (8h CM, 4h TD)* : De l'artistique au sens pratique, analyse et évaluation centrée utilisateurs, ergonomie cognitive, démarche interdisciplinaire, Normes.
- Conception Mécanique (8h CM, 16h TD, 8h TP)* : Méthode de conception pour innover, CAO Catia intégrant la représentation surfacique, rétroconception.
- Conception Electronique (14h TD)* : Electronique intégrée, analyse de documentation, simulation fonctionnelle et mise en pratique sur l'ObC personnel de l'option sous CAO

CROC2 : Composants des objets connectés

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
F. STHAL	60	44	0	8	4	6	4

Objectif :

Connaître les composants indispensables des objets connectés.

Mode d'évaluation :

1 Examen pour *a* et *c* + notes de CR de TP + validation des compétences avec l'ObC personnel

Détail du programme :

- a) Capteurs (12h CM, 2h AA, 2h Conf) :* Connaître les principaux types de capteurs et leur mise en œuvre.
- b) Actionneurs (12h CM) :* Moteurs, actionneurs pas à pas, MCC, brushless, piézoélectriques.
- c) Gestion et récupération d'énergie (12h CM, 4h Conf) :* Principes et ordres de grandeur, MEMS, circuits électroniques disponibles.
- d) Technologie des circuits (8h CM, 8 h TP) :* Présentation des différentes technologies des circuits imprimés, des boîtiers, assemblage et réalisation du circuit imprimé par four à refusion sur l'ObC personnel.

CROC3 : Contrôle et réseaux

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
F. STHAL	60	14	30	12	0	4	4

Objectif :

Savoir connecter et contrôler un objet connecté.

Mode d'évaluation :

Contenus Moodle et validation des compétences sur l'ObC personnel.

Détail du programme :

- a) Réseaux informatiques et sécurité (6h CM, 10 h TD) :* architectures, protocoles, principes de sécurisation.
- b) Microcontrôleurs (2 h CM 10h TD, 8 h TP, 4h Conf) :* Concept de base de la programmation microcontrôleur, Mis en œuvre d'un capteur et module Bluetooth de l'ObC personnel.
- c) Système d'exploitation embarqué (6h CM, 10h TD, 4h TP) :* Découverte des bases d'un système d'exploitation linux sous myRIO et Rasberry Pi.

CROC4 : Traitement de données

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
M. ABDEL HAFIZ	60	22	18	16	0	4	4

Objectif :

Appréhender le monde des données.

Mode d'évaluation :

Autoévaluation des compétences et test moodle en *a* + 1 Examen en *b*, *c* et *d*

Détail du programme :

- a) Application smartphone embarquée Android (6h CM, 12h TD, 4h TP) :* Concepts de base, accès à distance jSON, Exemple de communication bluetooth.

- b) *Traitement de données (6h CM, 6 h TD, 8h TP, 4h Conf)* : Concepts utilisés dans les objets connectés, notions de bases de données.
- c) *GNSS et communication (4h CM, 4h TP)* : Comprendre le fonctionnement des systèmes de positionnement par satellites et leurs utilisations.
- d) *Synchronisation et métrologie (6h CM)* : Importance des signaux temps-fréquence et de leurs stabilités sur les objets connectés.

3^{ème} année : Ingénierie Micromécanique (UEOIMM)

240 heures d'enseignement, 16 ECTS, 1 unité d'enseignement

Responsable : Sébastien THIBAUD (sebastien.thibaud@supmicrotech.fr)

	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
IMM1 : Conception Micromécanique	68	0	56	12	0	0	5
IMM2 : Micromécanique et Procédés	60	6	18	36	0	0	4
IMM3 : Conception de pièces flexibles	52	0	12	40	0	0	4
IMM4 : Eco-conception, motorisation, microsystèmes	60	8	32	20	0	0	3

La miniaturisation des systèmes nécessite d'intégrer un maximum de fonctions (mécanique, optique, électrique, ...) dans un espace très restreint. L'option vise à apporter des compétences à l'ingénieur en conception de produits micromécaniques et plus généralement microtechniques. La formation dispensée dans l'option micromécanique mène à introduire les éléments nécessaires à la conception, au dimensionnement et à la fabrication de ce type de systèmes. Des renforcements de compétences en technologie micromécanique sont proposés. Des éléments spécifiques à l'horlogerie sont également présentés ainsi que les techniques spécifiques de microfabrication utilisées. On introduit également des éléments de métrologie adaptés à cette échelle. La micromécanique est l'une des techniques historiques des technologies de fabrication additive (fonderie à cire perdue, coulée sous vide, impression 3D) et la formation de l'option Ingénierie MicroMécanique (IMM) apporte également des éléments de connaissances sur la conception de pièces par fabrication additive et ses spécificités.

De par les échelles considérées et de l'intégration de fonctions multiples, l'utilisation de pièces flexibles est classique mais complexe. Après avoir introduit des éléments de conception de ce type de composants, les outils de dimensionnement, de validation et d'optimisation basés sur la méthode des éléments finis sont présentés.

Enfin l'intégration d'actionneurs (moteurs pas à pas, courant continu, piézoélectrique) et de capteurs dans des systèmes microtechniques est définie. Des éléments de contrôles de ces actionneurs et capteurs sont introduits et appliqués afin de connaître les limites et difficultés d'intégration dans les systèmes micromécaniques. Des informations spécifiques aux techniques d'assemblage (manuel, robotisé) sont également discutées.

Débouchés : Ingénieur en conception et conception micromécanique (horlogerie, appareillages, automobile, biomédical, aéronautique, spatial, transports, militaire, instrumentation, ...).

Les projets de l'UEOPIST en option IMM

Les projets en option Ingénierie MicroMécanique s'organisent dans le cadre de l'entreprise virtuelle MicroCorp. Autour d'un projet structurant, les élèves-ingénieurs sont recrutés sur CV et lettre de motivation pour réaliser deux missions. La principale mission est reliée aux objectifs de la formation soit de la conception de produits. La seconde mission est définie par un rôle spécifique au sein du projet (chef de projet, prototypiste, gestion de la maquette numérique, dimensionnement, intégration actionneurs / capteurs).

Les projets proposés, en priorité par le monde industriel, seront limités en nombre (maximum 3 à 4 projets maximum par promotion) et devront reprendre les objectifs principaux de la formation IMM :

- Conception et dimensionnement de produits micromécaniques / microtechniques,
- Cotation et métrologie de certains composants conçus,
- Prototypage fonctionnel des produits,
- Prise en compte des procédés de fabrication bonne matière,
- Intégration d'actionneurs / capteurs.

Le projet est au cœur de la formation IMM et permet d'agglomérer les compétences acquises. Il est géré et jalonné par l'équipe projet et l'équipe encadrante considérée comme des ressources de MicroCorp.

Les projets seront présentés en public face au client (industriel, enseignant, étudiant) et en assemblée (école).

Le projet est évalué par compétences selon les fiches métiers principale et secondaire définissant le rôle de chaque participant.

Programme détaillé de l'unité d'enseignement spécifique

IMM1 : Conception Micromécanique (68h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
J.F. LANOY	68	0	56	12	0	0	5

Mode d'évaluation : Evaluation par compétences / Evaluation par projet

Détail du programme : L'objectif de ce module est d'apporter les connaissances et compétences nécessaires pour la conception de produits micromécaniques. Le module est décomposé selon les connaissances suivantes :

- Introduction aux effets liés à la miniaturisation (effets d'échelles, intérêts de la miniaturisation de systèmes, phénomènes prépondérants aux petites échelles),
- Introduction à l'utilisation d'un outil de gestion collaborative (PLM),
- Mise en œuvre d'un outil de CAO Surfacique,
- Technologies des engrenages (trains épicycloïdaux, conditions cinématiques et de montage, dimensionnement, dentures micro, notions de rendement d'un train épicycloïdal, paramétrage de dentures en CAO),
- Technologie des cames (tracé de cames, rendement et optimisation),
- Technologie des ressorts (Conception, dimensionnement, modélisation),
- Techniques d'assemblage en micro (clipsage, sertissage, vissage, collage, soudage),
- Introduction à la cotation 3D de produits.

L'évaluation des compétences se fera en relation avec la conception complète d'un système micromécanique mettant en œuvre l'ensemble des connaissances introduites dans le module.

IMM2 : Micromécanique et Procédés (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
R. JAMAULT	60	6	18	36	0	0	4

Mode d'évaluation : Evaluation par compétences et évaluations par partiels/TP

Détail du programme : Le module Conception & Procédés vise à relier les connaissances en procédés de µfabrication (technologies salle grise et salle blanche) nécessaires pour concevoir un produit microtechniques. Des éléments de conception de produits utilisant les technologies de fabrications additives (FDM, STL, Fusion en lit de poutre, projections de poudres, UV, ...) sont également proposés. Des compléments de compétences en métrologie des composants en faibles dimensions sont également présentés (microscopie par défocalisation, nano-micro-tomographie, MEB, ...). Ce module est fortement associé à une introduction aux spécificités de la mécanique horlogère

Le contenu du module est basé sur les éléments suivants :

- Initiation aux bases de l'horlogerie (historique de l'évolution des systèmes horlogers, compréhension du fonctionnement d'un mouvement mécanique simple),
- Dimensionnement d'éléments horlogers (complications horlogères, simulations et mécanismes horlogers),
- Utilisation d'une CAO Horlogère,
- Procédés de microfabrication mécanique (salle grise) et de salle blanche,
- Conception et Fabrication additive
- Métrologie à l'échelle micrométrique.
-

IMM3 : Conception de pièces flexibles (52h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
S. THIBAUD	52	0	12	40	0	0	4

Mode d'évaluation : Evaluation par compétences et évaluations par partiels/TP

Détail du programme : Le module Conception de pièces flexibles vise à donner des compétences en conception, dimensionnement et optimisation de pièces déformables. En micromécanique, l'utilisation régulière de composants flexibles, disposant de plusieurs phases de fonctionnement, nécessite de disposer et de maîtriser des outils de conception et de validation spécifiques. La mise en œuvre d'outils de simulations numériques est nécessaire. Dans ce module, après avoir apporté les éléments de conception de pièces flexibles, l'apprentissage d'un outil de simulations par la méthode des éléments finis dédiés au concepteur est proposée et appliquée à des objets microtechniques.

Enfin, l'utilisation d'outils d'optimisations topologique ou paramétrique est introduite et appliquée à des exemples représentatifs.

Le contenu du module est basé sur

- Conception de pièces flexibles (clicquets, ressorts, indexations flexibles, ...),
- Modélisation des structures flexibles,
- Calcul d'un empierrage de platine,
- Dimensionnement d'un encliquetage élastique,

- Dimensionnement de ressorts,
- Dimensionnement d'un joint d'accouplement en caoutchouc,
- Dimensionnement, optimisation (topologique / paramétrique) et validation d'une liaison par clipsage.

IMM4 : Eco-conception, motorisation et microsystèmes (50h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
S. THIBAUD	60	8	32	20	0	0	3

Mode d'évaluation : Evaluation par compétences et évaluations par partiels/TP

Détail du programme : Les objectifs du module motorisation et commande visent à donner les compétences nécessaires au concepteur pour intégrer des technologies de capteurs et d'actionneurs dans les systèmes microtechniques. Ainsi les particularités des principaux actionneurs (moteurs/actionneurs pas à pas, MCC, brushless, piézoélectriques) utilisés sont présentées. Leur mode d'alimentation et de régulation sont également présentés afin d'intégrer les contraintes d'encombrement et extérieures (alimentation, conditions d'utilisation) en conception. Afin de réaliser des systèmes commandés et contrôlés, une présentation sur les technologies de capteurs sont données.

Une introduction à l'utilisation de microcontrôleurs est également faites par technologies simples (Arduino) ou plus avancées et complètes (STM).

Enfin, étant donné l'échelle considérée, le domaine de la micromanipulation est présenté (motivations et intérêt de la manipulation robotisée, spécificités et conséquences, principales approches, exemple de réalisation de tâches complexes de micromanipulation et de micro-assemblage).

Le contenu du module est basé sur

- Microcontrôleur,
- Capteurs,
- Actionneurs,
- Commande d'actionneurs (motorisation, actionneurs piézoélectriques),
- Micromanipulation.

3^{ème} année : Ingénierie des systèmes de production (UEOISP)

240 heures d'enseignement, 16 ECTS, 1 unité d'enseignement

Responsable : Zeïna Al Mazry (zeïna.al.mazry@supmicrotech.fr)

	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
ISP1-Gestion de production et industrie du futur	60	30	10	20	0	0	4
ISP2-Evaluation de performance des systèmes industriels	60	18	18	24	0	0	4
ISP3-Outils de l'ingénieur production	60	32	18	10	0	0	4
ISP4-PHM et maintenance	60	34	6	20	0	0	4

1.1. Contexte et portée de la formation

Les entreprises évoluent dans un contexte concurrentiel en perpétuelle mutation et, relativement à l'outil de production et à son pilotage, les exigences en termes de flexibilité, de réactivité, d'adaptabilité, de disponibilité ne faiblissent pas. Plus encore, les industriels tendent à renforcer leur capacité à anticiper les performances de leurs systèmes afin de recourir à des actions dites « prédictives » le plus juste possible, dans un objectif de réduction des coûts et des risques. Cette mutation est catalysée par le potentiel de « l'industrie du numérique », et l'attente forte qu'elle suscite.

Les enjeux se renforcent (coûts, délais, etc.), les outils s'enrichissent (industrie 4.0, IoT, etc.), les pratiques se modifient, et le rôle socioéconomique de l'entreprise manufacturière est chaque jour plus marqué (responsabilité sociétale, impact environnemental...). Pour autant, ce n'est pas tant les problématiques de fond qui changent (maîtrises fonctionnelle, technique, organisationnelle, etc.), mais davantage la manière de les adresser (potentiel accru des nouvelles technologies). Le décideur de demain se doit d'être préparé à cet ensemble, et c'est là tout l'objet de cette option : **donner aux élèves ingénieur.e.s les capacités à appréhender un système de production dans son environnement, à l'analyser, à en évaluer les performances, et à assurer son pilotage, son exploitation et sa maintenance, tout en s'appuyant sur les outils numériques porteurs de valeurs nouvelles.**

1.2. Articulation des enseignements

Quatre volets d'enseignements sont proposés.

- **Pilotage industriel.** Le premier vise à situer les activités de production et de maintenance au sein de l'entreprise, à dégager les enjeux majeurs émergents depuis quelques années, et à

maîtriser les pratiques essentielles au pilotage et à l'amélioration continue du système industriel.

- **Performances industrielles.** Dans un second volet, les étudiant.e.s sont amené.e.s à étudier comment analyser un système industriel, en évaluer les performances, et à le piloter / modifier en conséquence.
- **Outils de l'ingénieur de production.** Une troisième partie des enseignements a pour objectif de fournir aux futurs ingénieur.e.s les outils mathématiques et informatiques indispensables à la maîtrise d'un système de production dans son ensemble.
- **Numérisation des pratiques.** Enfin, le quatrième volet porte sur la numérisation des pratiques ; au-delà de l'introduction aux systèmes informationnels industriels, les étudiant.e.s sont initié.e.s aux pratiques croissantes de data engineering, de data science, d'analyse prédictive, etc.

En synthèse, les enseignements portent sur différents aspects de l'ingénierie des systèmes de production (spécification, conception, organisation, amélioration de processus, évaluation de performances, exploitation/maintenance, systèmes informationnels, Industrie 4.0). L'objectif sous-jacent est de donner aux étudiant.e.s les éléments nécessaires à une analyse critique des problèmes auxquels ils/elles peuvent être confronté.e.s dans l'entreprise. Cette option offre ainsi des débouchés vers les métiers de la production (méthodes, production, maintenance, qualité, logistique).

Les projets de l'UEOPIST en option ISP

Les projets proposés ont comme objectif d'approfondir un ou plusieurs aspects introduits lors de la formation des élèves ingénieurs. Ils peuvent porter sur des problématiques d'ordre relativement général (telle que l'amélioration continue), ou être ciblés sur des sujets spécifiques (telle que la mise en œuvre d'algorithmes plus avancés que ceux pouvant être introduits en cours). Quoiqu'il en soit, les projets sont **tirés ou inspirés de situations réelles**, et permettent le renforcement des acquis par une approche du type « learning by doing ». A titre illustratif, voici quelques exemples de thématiques abordées :

- lean manufacturing et jeux pédagogiques ;
- ordonnancement, méthodes d'optimisation, simulation ;
- indicateurs et tableaux de bord ;
- acquisition de données et surveillance de performances ;
- data science, pronostic et maintenance prédictive...

Malgré le caractère finalisé des projets, les étudiants sont invités à faire preuve de rigueur en adoptant une démarche la plus scientifique possible. Ils doivent notamment être à même de justifier leurs développements en prenant soin :

- de proposer une analyse bibliographique du sujet ;
- d'argumenter l'approche de résolution retenue ;
- de décrire la ou les méthodes utilisées ;
- de discuter les résultats obtenus ;
- de s'interroger *a posteriori* sur la démarche d'ingénieur qu'ils ont été amenés à adopter.

Les projets font l'objet d'une **journée de restitution collective** durant laquelle chacun partage son expérience et profite de celle des autres étudiants.

ISP1 : Pilotage industriel

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
Z. AL MASRY	60	30	10	20	0	0	4

Mode d'évaluation

Moyenne de plusieurs partiels et/ou travail personnel/TP

Objectif

L'objectif de ce module est de donner aux étudiant.e.s les éléments nécessaires à une analyse critique et une gestion pérenne de l'activité industrielle (gestion de production, maintenance, amélioration continue, qualité, RSE...). Le module doit également permettre de mieux comprendre l'entreprise dans son environnement afin d'identifier et de cartographier les axes de travail / progrès à adresser.

- **Gestion de production** (26h)
 - Maîtrise des flux industriels : problématiques, enjeux, flux poussé/tiré, charge/capacité...
 - Ordonnancement dans les systèmes de production et ordonnancement de projets...
 -
- **Chaîne de valeur et lean manufacturing** (18h)
 - Valeur et gaspillages, grands principes (taille des lots, délais, moyens et contraintes...)...
 - TPS et Lean Manufacturing : fondements, approches, outils, leviers et freins au déploiement...
- **Maîtrise des risques et maintenance** (8h)
 - Analyse et management des risques : concepts, typologies, approches de mitigation...
 - Maintenance industrielle : définitions, enjeux, principes de gestion...
- **Management de la qualité et RSE** (4h)
 - Qualité et responsabilité sociétale des entreprises : contraintes et opportunités stratégiques
 - Définitions, cadre juridique, normes, labels, greenwashing...
- **Témoignages industriels** (4h)

ISP2 : Performances industrielles

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
Z. AL MASRY	60	18	18	24	0	0	4

Mode d'évaluation

Moyenne de plusieurs partiels et/ou travail personnel/TP

Objectif

L'objectif de ce module est de permettre aux étudiants d'acquérir un regard multiple sur les performances industrielles : modes nominaux, modes dégradés... Plusieurs points de vue y sont abordés (production, sûreté de fonctionnement...) et un panel d'outils d'analyse et d'évaluation des performances sont introduits (méthodes formelles quantitatives, approches par simulation...).

ISP2.1 KPI et tableaux de bord (Z. Al Masry, 12h)

- Indicateurs de performances, données sources, tableaux de bord
- Approches de modélisation, performances combinées, éléments d'analyse

ISP2.2 Sûreté de fonctionnement et indicateurs FMDS (Z. Al Masry, 14h)

- Concepts et mesures de sûreté de fonctionnement, lois de probabilités usuelles
- Outils de modélisation et d'analyse (AMDEC, Diagramme de Fiabilité...), concepts avancés

ISP2.3 Modélisation des systèmes de production (N. Zerhouni, 16h)

- Modélisation et analyse de systèmes par réseaux de Petri, propriétés (blocages, conflits, vivacité...)
- Réseaux de Petri non autonomes : temporisés, synchronisés, interprétés, coloriés, stochastiques...

ISP2.4 Approche par simulation (Z. Al Masry, 16h)

- Méthodologie d'élaboration d'un projet de simulation, avantages et limites de la simulation
- Mise en œuvre sur le logiciel Witness (problèmes industriels types)*

ISP2.5 Témoignage industriel (2h)

- Témoignages industriels (indicateurs de performance...)

ISP3 : Outils de l'ingénieur production

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
Z. AL MASRY	60	32	18	10	0	12	4

Mode d'évaluation

Moyenne de plusieurs partiels et/ou travail personnel/TP

Objectif

L'objectif de ce module est de proposer un panorama de méthodes statistiques et d'optimisation utiles à un.e ingénieur.e de production / maintenance. Les étudiant.e.s sont initié.e.s à ces techniques au travers d'études variées et concrètes, caractéristiques de problématiques industrielles (calculs d'itinéraires, problèmes de logistique, maximisation de gains ses gains futurs, détection de pannes...).

▪ **Outils mathématiques** (10h)

- Introduction et domaines d'application de la statistique, analyse en composantes principales...
- Modèles de régression, arbres de décision, ..., mise en œuvre sur le logiciel R

▪ **Théorie des graphes** (12h)

- Graphes et modélisation, algorithmes classiques
- Parcours, composantes connexes, coloration, flot max/coupe min, problèmes d'affectation...

▪ **Optimisation** (22h)

- Programmation linéaire, procédure de séparation et évaluation
- Métaheuristiques, Glouton

- **Théorie des files d'attente** (14h)
 - Généralités, études des principaux types (M/M/1, M/G/1, M/D/1)
 - Files d'attente finies ou infinies (M/M/1/K, M/M/C, M/M/∞).
- **Témoignages industriels** (2h)

ISP4 : Numérisation des pratiques

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
Z. AL MASRY	60	34	6	20	0	0	4

Mode d'évaluation

Moyenne de plusieurs partiels et/ou travail personnel/TP

Objectif

L'objectif de ce module est de permettre aux élèves ingénieur.e.s, d'une part, de saisir l'intérêt et la portée des outils informatiques d'ores et déjà considérés comme usuels dans l'industrie, et d'autre part, de s'ouvrir aux pratiques émergentes dans le cadre de l'industrie 4.0.

- **Système d'information industriel** (4h)
 - Cycle vertueux des données
 - Système d'information (SCADA, MES, GPAO, GMAO, ERP) : complémentarités et évolution
- **Data Engineering : données et big data** (14h)
 - Collecte des données industrielles, types, qualité
 - Gestion et préparation des données, big data et production, problématique de visualisation
- **Data Science : intelligence artificielle** (10h)
 - Concept, approches de l'intelligence artificielle, principe d'apprentissage
 - Outils usuels (réseaux de neurones, SVM, RF...)
- **Data Analytics : approches prédictives** (20h)
 - Approche prédictives basées sur les données (principes et exemples)
 - Introduction aux notions de Prognostics and Health Management (PHM)
- **Témoignages industriels** (12h)

3^{ème} année : Mécanique avancée des structures (UEOMAS)

240 heures d'enseignement, 16 ECTS, 1 unité d'enseignement

Responsable : Emmanuel FOLTÊTE (emmanuel.foltete@supmicrotech.fr)

	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	Projet	ECTS
MECAMAT	60	21	17	20		2		4
MECANL	60	18	26	16				4
DYNA	60	24		36				4
SIMU	60	10	26	24				4

L'option Mécanique avancée des structures vise à former des ingénieurs Bureau d'Études / Recherche & Développement dont les compétences sont centrées sur le calcul de structures. Les enseignements proposés couvrent l'ensemble des connaissances nécessaires à la maîtrise de simulations numériques par éléments-finis dans des contextes avancés : comportement mécanique des matériaux non conventionnels, modélisations non-linéaires, calculs statiques/vibratoires/en dynamique rapide, optimisation des structures mécaniques en présence d'incertitudes.

Ce profil est particulièrement bien adapté aux grands groupes des secteurs du transport et de l'énergie, mais également aux petites entreprises innovantes qui développent des produits de haute technicité.

Programme détaillé de l'unité d'enseignement spécifique

MODULE 1 : MECAMAT – Mécanique des matériaux (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
V. GUICHERET-RETEL	60	21	17	20		2	4

Mode d'évaluation :

L'évaluation du module consiste en trois examens sur table, chacun portant sur l'un des trois volets suivants :

- Matériaux composites
- Comportement matériau (cadre thermodynamique, multiaxialité et visco-élastoplasticité)
- Fatigue, Endommagement et Rupture

Détail du programme :

Le module vise à familiariser les étudiants à l'écriture mathématique des lois non linéaires et anisotropes reliant, à différentes échelles de temps et de longueur, le changement de forme du matériau aux efforts qui lui sont appliqués. Il aborde les techniques expérimentales permettant de caractériser les phénomènes ainsi que la modélisation analytique et numérique permettant la simulation des essais de caractérisation des matériaux et l'identification des paramètres par méthode inverse.

MODULE 2 : MECANL – Mécanique non linéaire (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
-------------	-------	----	----	----	----	------	------

S. THIBAUD	60	18	26	16	4
-------------------	----	----	----	----	---

Mode d'évaluation : évaluation par interrogations écrites / évaluation en TDAO

Détail du programme :

Les objectifs du module mécanique non linéaire sont liés à l'apprentissage et la maîtrise des outils de modélisation en mécanique non linéaire. En premier lieu les concepts de la mécanique des milieux continus étendus aux grandes transformations sont introduits (non linéarités géométriques, matérielles et de contact, description du mouvement, mesures de déformations, lois de conservation). La discrétisation des équations de la mécanique (conservation de la quantité de mouvement) est présentée dans le cadre de la méthode des éléments finis non-linéaires. Les algorithmes d'intégration temporelle (méthodes implicite et explicite) appliqués aux problèmes discrétisés sont ensuite développés et mis en œuvre dans des cas généraux (quasi-statique, dynamique rapide, dynamique transitoire). Les techniques de gestion du contact aux interfaces sont également présentées et détaillées (méthodes des multiplicateurs de Lagrange, de pénalisation et du Lagrangien augmenté).

Le comportement et le formalisme particulier des matériaux hyperélastiques sont également présentés. Des spécificités aux calculs en équilibre quasi-statique et à la dynamique rapide (crash, impact, mise en forme) sont ensuite données et systématiquement appliquées à des exemples pratiques.

MODULE 3 : DYNA – Dynamique des structures avancée (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
M. OUISE	60	24		36			4

Mode d'évaluation : 3 évaluations en ligne

Détail du programme :

Le module Dynamique des structures avancées apporte un large éventail de compétences associées à la prédiction numérique du comportement vibratoire des structures industrielles :

- Spécifications en dynamique des structures et méthodologies de simulation associées (formulations de base, modes réels / modes complexes, méthodes de calcul de réponse à des excitations déterministes dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel, méthodes de calcul de réponse à des excitations aléatoires, modélisation de l'amortissement visqueux, hystérétique, facteur de perte, modal), programmation des algorithmes de base.
- Mise en données de problèmes éléments finis en dynamique des structures (spécificités liées au maillage, aux assemblages, à l'amortissement, choix des stratégies et algorithmes de résolution).
- Application aéronautique : conception d'un essai de vibrations au sol pour la prévention du flottement aéroélastique
- Application dimensionnement : essai de qualification sur une structure type industrielle (gestion de gabarits d'essais chocs, aléatoires, harmoniques), application d'un critère de dimensionnement sur la base d'un cahier des charges
- Amortissement passif par matériaux viscoélastiques
- Application : détermination d'une courbe maîtresse d'un matériau viscoélastique et dimensionnement d'un plot élastique
- Réduction de modèles en dynamique des structures (Ritz, Craig Bampton, Mc Neal, Itération sur les résidus)
- Application : mise en œuvre d'une synthèse modale par composant sur une structure complexe, construction de super éléments
- Prise en main d'un outil de vérification et validation de modèles, mise en place d'une préparation d'essais vibratoires
- Essais et Identification modale en dynamique des structures
- Application : essais et identification sur une structure de type industriel

- Méthodologies de corrélation calculs-essais et validation de modèle en dynamique des structures
- Application : recalage de modèle d'une structure complexe
- Machines tournantes : termes d'inertie en élastodynamique, vibrations de torsion/flexion pour les arbres en rotation, diagramme de Campbell, comportement des paliers

MODULE 4 : SIMU – Modélisation et simulation avancées (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
H. LENOIR	60	10	26	24			4

Mode d'évaluation : épreuves écrites et pratiques

Détail du programme :

Le module Modélisation et simulation avancées vise à apporter les compétences nécessaires à la résolution de problématiques industrielles courantes telles que :

- le maillage avancé de géométries complexes
- les techniques de modélisation d'assemblages vissés
- la simulation de mécanismes avec pièces rigides et flexibles
- la résolution d'un problème d'optimisation paramétrique ou topologique
- la prise en compte des incertitudes, les analyses de sensibilité et de fiabilité

3^{ème} année : Méthodes d'industrialisation (UEOMIND)

240 heures d'enseignement, 16 ECTS, 1 unité d'enseignement

Responsable : Christophe Dielemans (christophe.dielemans@supmicrotech.fr)

Alexandre Gilbin (alexandre.gilbin@supmicrotech.fr)

	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
MIND1 - MICRO : Usinage et métrologie de précision	60	22	8	24	2	4	4
MIND2 – ECO : Produits et procédés durables	56	21	31	4	0	2	4
MIND3 – Indus 4.0 : Chaîne numérique et outillage	66	18	10	36	0	0	4
MIND4 – Qualité : Amélioration continue et management de la qualité	58	10	10	4	0	34	4

L'option Méthodes d'INDustrialisation (MIND) vise à renforcer les connaissances et compétences des ingénieurs ENSMM pour exercer plus efficacement au sein d'un service lié à la production mécanique industrielle, notamment dans un contexte compétitif alliant des contraintes de précision, de qualité et d'innovation. Le concept d'Industrie 4.0 est au cœur des préoccupations et les notions nécessaires à la maîtrise des procédés de fabrication et de contrôle seront abordées (capacités des moyens, enchaînement des procédés, normes et procédures qualité, chaîne numérique, instrumentation des machines, exploitation des données, modélisation des opérations, définition de critères de surveillance et d'optimisation, méthodes d'amélioration continue, etc.). La R&D en fabrication sera abordée via le micro-usinage et la métrologie sans contact et la conception sera abordée ici via la mise au point d'outillages industriels et la prise en compte des contraintes de fabrication, y compris en considérant la fabrication additive et les nouvelles possibilités qu'elle offre. Les méthodologies théoriques et expérimentales permettant d'étudier et d'optimiser les opérations de fabrication seront vues et appliquées pour l'usinage et la mise en forme par déformation plastique. Enfin, les outils théoriques, expérimentaux et méthodologiques permettant d'atteindre un niveau élevé de qualité et de le maintenir seront présentés et mis en œuvre principalement avec des intervenants issus de l'industrie.

Les travaux pratiques bénéficieront de moyens étendus et modernes disponibles localement (Atelier et salle de métrologie ENSMM, atelier S-MART, plateforme R&D MIFHysTO, atelier du CFAI).

Cette option peut être articulée avec deux formats d'études inédits à l'ENSMM :

- Un contrat de professionnalisation en partenariat avec l'UIMM permettant à l'étudiant d'être salarié d'une entreprise pendant toute l'année universitaire, de réaliser son projet en entreprise et d'enchaîner avec un PFE dans le même contexte.
- Le nouveau Master Génie Mécanique co-habilité avec l'UFC et l'UTBM, dans le parcours M2 Procédés & Matériaux abordant spécifiquement la R&D qui est un axe régional fort tant au niveau académique qu'industriel (μ -usinage mais aussi fabrication additive, mise en forme des matériaux composites, revêtements par voies sèche et humide).

Secteurs d'activités concernés : Tous les secteurs industriels, mais seront spécifiquement illustrés les domaines du luxe, du biomédical et de l'outillage via des applications microtechniques.

Profils d'ingénieurs ciblés : Ingénieur « Méthodes », « BM », « Industrialisation », « Production », « R&D Process », « Qualité », « Prototypes », « Qualification et Essais ».

Les projets de l'UEOPIST en option MIND

Les projets réalisés dans l'option correspondent à des problématiques industrielles de fabrication, de contrôle, de prototypage et de qualité. Ils pourront être de différents types :

- Etudes d'industrialisation de produits
- Conception et fabrication de produits, systèmes et outillages
- Réalisation de prototypes par enchaînement de procédés
- Développement d'une démarche qualité
- Définition de procédures de métrologie spécifiques
- Plans d'expérience et optimisation d'opérations de fabrication
- Instrumentation et surveillance de moyens de production

Des projets seront proposés par les enseignants et leurs partenaires académiques et industriels mais les étudiants peuvent proposer un projet en lien avec ces thématiques à faire valider avant la mi-septembre. Le travail s'effectue typiquement en binôme mais un projet mené à 1 seul élève ou à 3 est envisageable si le sujet le permet et/ou le nécessite. Le suivi du travail se fait via un outil d'ingénierie collaborative en ligne permettant d'échanger des informations, des documents et de mettre en place un planning de travail avec jalons. L'évaluation prend en considération l'organisation du travail de projet et, concernant les créneaux dédiés, ils seront répartis en demi-journées tout au long du semestre avec deux semaines spécifiques réservées (1 semaine attenante aux vacances de la Toussaint et une attenante aux vacances de Noël). Un jalon spécifique avec rendu de travail intermédiaire sera associé à chacune de ces périodes réservées.

Les élèves en contrat de professionnalisation définiront et réaliseront leur projet avec leur employeur industriel, majoritairement au sein de l'entreprise. De nombreux projets en dehors de ce format bénéficieront également de contacts et de co-encadrement industriel en fonction des partenariats avec les enseignants ou la plateforme partenariale de l'école.

Tous les élèves de l'option pourront solliciter le corps d'enseignement et de recherche associé à l'option ou au-delà et bénéficieront ainsi d'un large panel de compétences permettant d'aborder toute la chaîne d'ingénierie nécessaire aux projets liés à l'industrialisation : Conception – Préparation – Fabrication – Contrôle – Instrumentation – Traitement du signal – Caractérisation – Optimisation.

Programme détaillé de l'unité d'enseignement spécifique

MIND1 – MICRO : Usinage et métrologie de précision

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
A. GILBIN	60	22	8	24	4	2	4

Mode d'évaluation : Grille de compétences + Contrôle continu (CR de TP, QCM sur cours et conférences)

Détail du programme :

Ce module vient compléter les enseignements de production mécanique dispensés en première et seconde année de la formation initiale ENSMM. Il est destiné à permettre aux élèves ingénieurs de mieux appréhender le monde de la précision en usinage, qu'il s'agisse de justesse et de fidélité dimensionnelles, géométriques

ou d'état de surface. Usiner et contrôler des séries de pièces « au micron » est un objectif industriel pour de nombreux domaines industriels tels que le luxe, le biomédical, l'aéronautique et le spatial, la connectique, l'instrumentation et les capteurs notamment. L'objectif sera ainsi de découvrir les défis de l'usinage de précision, les moyens spécifiques d'usinage et de métrologie existants, ainsi que les méthodes d'utilisation et de réglage adaptés aux précisions microniques et aux petites échelles. Cette thématique correspond à une compétence de R&D forte localement et ces enseignements bénéficieront des moyens et techniques modernes de la plateforme MIFHySTO implantée dans l'ENSMM et spécialisée dans l'enchaînement, l'hybridation et l'étude de procédés de microfabrication mécanique. Les procédés et techniques suivantes seront abordés :

- La microfabrication et l'enchaînement de procédés pour les microtechniques
- L'usinage de précision conventionnel (outil coupant ou abrasif) et non conventionnel (laser, électroérosion)
- Le micro-usinage et les effets d'échelles associés
- Les procédés spécifiques (micro-fraisage, décolletage, μ -EDM, gravage et texturation laser)
- Les méthodes de mesure sans contact (microscopie confocale, microscopie électronique, projection de profil numérique, tomographie)
- L'évaluation d'états de surface sur micro-pièces (critères linéiques et surfaciques)

Une étude de cas pour un produit microtechnique ainsi que l'intervention de partenaires industriels permettront d'illustrer et d'agréger les différentes notions et techniques étudiées.

MIND2 - ECO : Produits et procédés durables

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
P. MALECOT	56	21	31	4	0	0	4

Mode d'évaluation : Grille de compétences + Contrôle continu (CR de TP, Examens sur table)

Détail du programme :

L'objectif est ici d'appréhender les méthodes d'analyse, de surveillance, de modélisation et d'optimisation qu'il est possible de mettre en œuvre en lien avec la fabrication mécanique dans le contexte de l'industrie 4.0. Cette approche fondamentale et moderne de l'étude des procédés de fabrication permettra notamment aux élèves ingénieurs de mettre en œuvre les techniques suivantes :

- Chaîne numérique en fabrication (CAO – FAO – Post-processing – Fabrication)
- Instrumentation et surveillance des machines-outils
- Méthode du Couple Outil-Matière (COM) et mise en œuvre de plans d'expérience
- Modélisation de la coupe et optimisation des conditions de coupe sous contraintes
- Caractérisation des matériaux pour et par la fabrication (rhéologie classique et procédés de déformation plastique, modélisation thermomécanique)

MIND3 – Indus 4.0 : Chaîne numérique et outillage

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
R. JAMAULT	64	18	10	36	0	2	4

Mode d'évaluation : Grille de compétences + Contrôle continu (CR de TP, CR de mini-projets)

Détail du programme :

L'objectif du module est de renforcer les compétences des étudiants en conception mécanique en considérant de manière approfondie les contraintes de fabrication et la conception de moyens de production. Les sujets abordés peuvent être regroupés en 2 catégories :

- *Les outils méthodologiques* : Les étudiants seront formés théoriquement et pratiquement à l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), à la méthode TRIZ (approche heuristique de résolution des problèmes inventifs) et au choix avancé des matériaux à l'aide de l'outil logiciel CES.
- *La conception d'outillage* : Les outillages étudiés seront les outils coupants macro et micro, les posages, les moules et matrices, les poinçons de découpage et les outils à suivre. Ces applications incontournables en production industrielles seront abordées via le besoin industriel associé en production, les limites technologiques, les contraintes de fabrication à prendre en compte, mais aussi la conception et la simulation à l'aide de logiciels métiers et enfin des démonstrations de leur mise en œuvre.

MIND4 – Qualité : Amélioration continue & Management de la qualité

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
C. DIELEMANS	58	10	10	4	0	34	4

Mode d'évaluation : Grille de compétences + Contrôle continu (CR de TP, QCM sur cours et conférences)

Détail du programme :

Le module se veut être une passerelle entre l'ENSMM et l'entreprise. Les enseignements proposés sont complémentaires de ceux de la première année et majoritairement présentés par des professionnels issus de l'industrie. Les enseignements abordés sont les suivants :

- *La cotation 3D* : La cotation fonctionnelle est un problème essentiellement tridimensionnel. Le GPS, vu en première année, montre que la définition du produit ne se limite plus à un problème plan. Ce cours présente une méthode de cotation fonctionnelle 3D qui permet de spécifier le produit, de façon rigoureuse et en partant de la condition d'aptitude à l'emploi.
- *Le tolérancement statistique* : L'objectif du tolérancement est d'identifier des limites de variabilité de production permettant d'assurer la qualité fonctionnelle d'un produit. Deux approches sont possibles: le tolérancement au pire des cas et le tolérancement statistique. On montrera ici l'intérêt potentiel du tolérancement statistique pour augmenter les tolérances sur chaque pièce.
- *Les méthodes d'amélioration continue* : Les grandes méthodes actuelles mises en œuvre dans l'industrie pour améliorer en continu le fonctionnement de l'entreprise sont présentées ici. Les aspects liés à la logistique et à la fiabilisation des circuits d'approvisionnement seront également abordés. Approches développées : a) Lean manufacturing, b) Six sigmas, c) Total productive maintenance (TPM).
- *Les réalités industrielles de la qualité* : les élèves ingénieurs vont ici découvrir les impacts internes et externes de la qualité tant du point de vue financier que du point de vue organisationnel. Des spécialistes du monde industriel prendront en charge ce thème par des conférences. Aspects abordés : a) Le coût de la non qualité, b) Le coût d'obtention de la qualité, c) Les relations client / fournisseur.
- *Management par et pour la qualité* : Ce thème aborde les aspects managériaux de la qualité. Pour la mise en place d'une politique de qualité totale efficiente, il faut manager les hommes, leurs

compétences et les organisations de l'entreprise. Ce sont ces aspects qui sont présentés ici sous forme de conférences : a) Management des hommes et de leurs compétences - Gestion des compétences, b) Management des organisations - Mode processus des entreprises, c) Normes ISO TS 16949 (référentiel qualité automobile) et 9001 V2008.

3^{ème} année : Matériaux et surfaces fonctionnels (UEOMSF)

240 heures d'enseignement, 16 ECTS, 1 unité d'enseignement

Responsable : Philippe STEMPFLE (philippe.stempfle@supmicrotech.fr)

	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
MSF1 : Matériaux avancés	60	48	8	4	0	0	4
MSF2 : Analyse des surfaces et interfaces	60	42	10	8	0	4	4
MSF3 : Endommagements des matériaux et surfaces	60	30	14	16	0	0	4
MSF4 : Corrosion, protection des surfaces et Eco-conception	60	28	16	16	0	0	4

L'option *Matériaux et Surfaces Fonctionnels* a pour objectif de compléter les connaissances en mécanique et physique des matériaux, acquises durant le parcours produit, par une approche pluridisciplinaire multi-échelle combinant mécanique et physico-chimie des matériaux et surfaces.

Les enseignements concernent :

- la mécanique non linéaire des matériaux et surfaces (plasticité) ;
- la physico-chimie des surfaces et interfaces (adhésion, dépôts,...), la thermique du contact ;
- l'endommagement des matériaux et surfaces (fatigue, fissuration, usure, corrosion) ;
- le choix des matériaux, dans un contexte de développement durable, par une approche multicritères et d'analyse du cycle de vie ;
- l'étude des techniques de caractérisation avancées des matériaux et surfaces ;
- l'étude de matériaux avancés (céramiques techniques, composites, matériaux en couches minces et nanomatériaux) ;
- l'étude des phénomènes d'adhérence, de durcissements volumiques et superficiels ;
- Le choix des traitements, protection et fonctionnalisation des surfaces ;
- L'approfondissement des techniques de microfabrication salle blanche pour les microtechniques (capteurs, MEMS...).

L'option allie approche fondamentale et applications afin d'ouvrir la voie vers une multitude de secteurs industriels. Les compétences acquises dans le cadre de cet enseignement permettront aux ingénieurs d'être capables de choisir et de mettre en œuvre des matériaux performants destinés à des applications spécifiques. Ils pourront également faire face aux problèmes liés à la dégradation des matériaux et leurs mécanismes (usure, vieillissement, corrosion, fissuration, endommagement). Ils sauront analyser les dysfonctionnements des systèmes d'un point de vue mécanique et apporter des solutions en termes de choix des matériaux, traitement et fonctionnalisation des surfaces. Les débouchés sont vastes : ils vont du transport, à l'industrie mécanique en passant par l'ingénierie biomédicale ou encore les micro et nanotechnologies.

Les quatre modules spécifiques visent à consolider les connaissances des futurs ingénieurs dans les domaines de la science des matériaux et des surfaces.

Les projets de l'UEOPIST en option MSF

Les projets en option *Matériaux et Surfaces Fonctionnels* sont souvent proposés par les enseignants-chercheurs de l'institut FEMTO-ST, mais des sujets amenés par les élèves, en provenance d'associations ou d'industriels, directement ou par la plateforme partenariale ENSMM, pourront également être considérés sous réserve de l'accord de la personne responsable de l'UE. Ces sujets devront évidemment être en relation avec les thématiques de l'option.

Exemple de sujets validés :

- Étude de capteurs chimiques souples
- Conduction mixte dans les semi-conducteurs
- Étude de matériaux nano-structurés en couches minces
- Lubrification par des molécules auto-assemblées pour application en emboutissage
- Dépôts de nickel brillants et durs
- Étude de la perméation de réservoirs de stockage d'hydrogène haute pression de type IV fabriqués par enroulement filamentaire.
- Comportement mécanique de polymères à mémoire de forme
- Identification de propriétés mécaniques en micro-indentation instrumentée

La liste de projets sera présentée vers la fin septembre. Les élèves devront alors soit prendre contact avec la personne responsable de l'UE pour lui présenter les sujets qu'ils/elles veulent amener, soit prendre contact avec les encadrants potentiels de la liste de projets présentés, puis faire un choix, sachant qu'il ne peut y avoir qu'au maximum deux personnes sur un même sujet.

Évaluation de l'UE :

- Un article scientifique de 4 pages maximum en anglais est remis à l'encadrant et à la personne responsable de l'UE selon un modèle d'article qui sera fourni. Cette remise des articles a lieu quelques jours (date à définir avec le responsable des projets) avant la présentation « flash » des projets.
- Une note (coef. 2) tenant compte du travail effectué est donnée par l'encadrant en fonction de la qualité du livrable attendu ;
- A la fin des projets, tous les binômes présentent leur projet en 3 minutes maximum devant un jury d'enseignants et les élèves sous la forme d'un poster au format A3 (un fichier type pour le poster sera fourni). 10 minutes de questions suivront cette présentation « flash ». Une note pour la présentation (coef. 1) et une note pour l'article (coef. 1) seront données par les enseignants.

La note finale est la moyenne de la note encadrant (coef. 2), de la note de l'article (coef. 1) et de la note de présentation (coef. 1).

Programme détaillé de l'unité d'enseignement spécifique

MSF1 : Matériaux avancés (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
N. MARTIN	60	48	8	4	0	0	4

Mode d'évaluation : (2 partiels de 2h) x 0.7 + 1 TP x 0.3

Détail du programme :

Objectif du cours : Faire découvrir la fabrication et les propriétés physiques et physico-chimiques de matériaux innovants à base de composites, de céramiques, de nano-matériaux et de couches minces. Illustrer de manière non-exhaustive certaines caractéristiques dans différents domaines de l'industrie et de la recherche. Un accent particulier sera porté sur l'utilisation pour des applications capteurs.

Le contenu de ce module se décompose en 2 parties :

1. Matériaux Composites (12h CM + 2h TD) et Céramiques avancés (10h CM + 2h TD)

Composites

Après un bref rappel concernant la classification des matériaux, on présente dans la partie introductive de ce cours les généralités sur les matériaux composites, notamment, la terminologie, l'historique, les avantages et inconvénients et enfin les domaines d'applications. Les matériaux composites à renforts de type carbone, verre, ou aramide et à base de matrice organique sont ensuite étudiés. Les méthodes d'élaboration des renforts, leur architecture, leurs propriétés mécaniques sont présentées. Les différentes méthodes de fabrication des pièces composites sont également abordées.

En parallèle de ces considérations technologiques et expérimentales, on présente des méthodes simples de calcul de détermination des paramètres élastiques ; de l'échelle microscopique à l'échelle mésoscopique (loi des mélanges) jusqu'à l'échelle macroscopique de la structure (théorie des stratifiés). Les lois de comportement élastique dans et hors axes d'anisotropie sont explicitées. Les critères de rupture et les notions d'endommagement de ces matériaux anisotropes sont abordés.

Céramique :

Présentation des céramiques avancées de l'élaboration à l'application en passant par la caractérisation et les propriétés. Le cours se décompose en cinq grandes parties :

- (i) Rappel sur les matériaux céramiques en distinguant les céramiques techniques des céramiques traditionnelles ;
- (ii) Panorama des différentes applications possibles des céramiques avancées (dans l'électronique, le médical, l'énergie, etc.) en s'appuyant sur les propriétés chimiques, thermiques et mécaniques des matériaux ;
- (iii) Différentes étapes de la mise en œuvre (de la poudre à la pièce) en présentant les aspects physico-chimiques (dispersion, frittage, etc.) ;
- (iv) Propriétés thermomécaniques, notions de mécanique des matériaux (rupture, critère de Weibull, fatigue, fluage, chocs thermiques, etc.) ;
- (v) Exemples approfondis : Fabrication additive céramique (procédés, avantages /inconvénients/ limitations, influence sur les propriétés mécaniques, etc.) et composites à matrice céramique (philosophie de conception, fabrication, comportement thermomécanique, etc.). Un matériau

servira de fil conducteur entre les différentes parties (ex : Alumine). Les exemples seront issus de la littérature « classique » et travaux de recherche récents (thèses et articles).

Partiel 1 : Matériaux Composites et Céramiques avancés

2. Couches minces anisotropes et/ou à gradient de propriétés (10h CM + 2h TD), Surfaces et interfaces pour les capteurs (10h CM + 2h TD), Micro-capteurs chimiques (4h CM + 4h TP) et Nanomatériaux (2h CM)

Films minces

Les objectifs de ce cours sont multiples : fournir à l'étudiant les connaissances en technologie du vide et des plasmas, nécessaires à l'étude des méthodes de dépôt par voie sèche, décrire de manière concise les principes de base des différentes techniques PVD et CVD, illustrer de manière non-exhaustive, certaines caractéristiques et propriétés propres aux revêtements obtenus en phase vapeur, montrer les applications potentielles des matériaux en couches minces.

Surfaces et interfaces pour les capteurs (10h CM + 2h TD) et Micro-capteurs chimiques (4h CM + 4h TP)

Les objectifs de ce cours sont de présenter les aspects fondamentaux et technologiques de différents matériaux utilisés pour la conception de micro-capteurs chimiques innovants pour la détection de molécules dans différentes matrices (gaz, liquides).

Différents types de transducteurs (mécaniques, électriques, électrochimiques) seront décrits sous l'angle de leur fabrication et de leur mise au point pour des applications spécifiques. En particulier, l'accent sera mis sur les différentes méthodes d'élaboration et également sur les performances de détection (sélectivité, sensibilité, répétabilité ...). Les matériaux piézoélectriques seront également abordés. Ces derniers trouvent de nombreuses applications dans le domaine des capteurs. Le cours présentera le formalisme de la piézoélectricité, les technologies de fabrication et des applications dans le domaine de la détection des gaz et liquides par capteurs à ondes de volume et de surface. Matériaux utilisés pour les micro-capteurs chimiques. Capteurs innovants pour la détection de molécules (gaz, liquides). Un TP permettra de réaliser et de tester un micro-capteur chimique.

Nanomatériaux (2h CM)

Qu'ils soient à base de nanopoudres, de nanograins, de nanofils ou de nanocouches, les nanomatériaux constituent une nouvelle classe de matériaux aux propriétés remarquables. En effet, les propriétés d'un matériau changent considérablement lorsqu'on passe de l'état massif à l'état nanométrique. Dans le cadre de ce cours, nous préciserons la définition d'un nanomatériau, d'un nano-objet et d'un matériau nano-structuré en volume ou en surface. Nous passerons en revue les différentes méthodes d'élaboration des nanomatériaux ainsi que leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Les propriétés spécifiques des nanomatériaux seront présentées et illustrées par des exemples en lien avec les secteurs applicatifs de l'automobile, de la cosmétique, de la santé ou encore de l'énergie. Des données sur les enjeux économiques et sur les risques toxicologiques en lien avec la manipulation des nanomatériaux seront également présentées.

Partiel 2 : Films minces + Surfaces et interfaces pour les capteurs + Micro-capteurs chimiques

MSF2 : Analyse des surfaces et interfaces (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
S. MARGUERON	60	42	10	8	0	4	4

Mode d'évaluation : (2 partiels de 2h) x 0.7 + 1 TP x 0.3

Détail du programme :

Objectif du cours : Décrire de manière concise les principales techniques de caractérisation physiques, physico-chimiques et mécaniques des matériaux et des surfaces. Comprendre comment appliquer ces techniques aux problématiques de l'ingénieur. Présenter les différentes techniques et protocoles de micro-fabrication en salle blanche. Illustrer certaines applications au travers de conférences.

Le contenu de ce module se décompose en 2 parties :

1. Techniques d'analyses structurales et chimiques des matériaux 1 (10h CM + 4h TD + 2h Conf) et Techniques Salle Blanche – Matériaux pour cellules photovoltaïques (4h CM + 4h TDAO + 8hTP)

Techniques d'analyses structurales et chimiques des matériaux 1 :

- (i) Interactions sonde-matière
- (ii) Techniques ioniques et électroniques
- (iii) Spectroscopie de Masse (SIMS, ToF SIMS)
- (iv) Spectroscopie électronique (EELS, AUGER)
- (v) Ellipsométrie
- (vi) Exercices d'application

Conférence (2h) : Caractérisation structurale des matériaux

Techniques Salle Blanche – Matériaux pour cellules photovoltaïques (4h CM + 4h TDAO + 8hTP)

- (i) Théorie photovoltaïque et procédés de salle blanche
- (ii) Analyse de données complexes

2 TPs salle blanche : Fabrication de cellules photovoltaïques

Partiel 1 (2h) : Techniques d'analyses structurales et chimiques des matériaux 1 + Techniques Salle Blanche

2. Techniques d'analyses structurales et chimiques des matériaux 2 (14h CM + 2h TD) et Microscopie en champ proche et sondes nanométriques (10h CM + 2h Conf)

Techniques d'analyses structurales et chimiques des matériaux 2

- (i) Bases physiques et classement des méthodes d'analyse de surfaces
- (ii) Microscopies électroniques à balayage (MEB) et en transmission (TEM)
- (iii) Fluorescence X et Spectrométries de rayon X (EDS) et (WDS)
- (iv) Spectroscopie d'Absorption (XAS- EXAFS-SEXAFS)
- (v) Spectrométrie à décharge luminescente (SDL)
- (vi) Spectroscopie infrarouge (IRRAS)
- (vii) Spectroscopie RAMAN
- (viii) Spectroscopies d'émission XPS-ESCA et Auger
- (ix) Études de cas et applications industrielles

Microscopies en champ proche et sondes nanométriques

- (i) Les différents modes de Microscopie à force atomique (AFM)
- (ii) Microscopie à sonde thermique (SThM et μ TA)
- (iii) Sonde Kelvin et Microscopie KPFM
- (iv) Nanoindentation
- (v) Micro-balance à quartz- QCM et QCM-D

Conférence : Microscopie à effet Tunnel (STM) (2h Conf)

Partiel 2 (2h) : Techniques d'analyses structurales et chimiques des matériaux 2 + Microscopies en champ proche et sondes nanométriques

MSF3 : Endommagements des matériaux et surfaces (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
P. STEMPFLE	60	30	14	16	0	0	4

Mode d'évaluation : (2 partiels de 2h) x 0.7 + (moyenne notes de TP) x 0.3

Détail du programme :

Objectif du cours : Connaître les lois de comportement élasto-plastiques des matériaux dans le cadre de la thermodynamique (viscosité, plasticité et endommagement) pour des chargements uni- et multi-axiaux monotones ou cycliques. Découvrir la science des surfaces depuis l'échelle sub-micrométrique à atomique, les modèles de la mécanique du contact et la dégradation des surfaces et interfaces. Approfondir la physico-chimie des surfaces, la tribochimie et les lois de frottement et d'usure. Découvrir les différents régimes de lubrification et leurs implications sur l'usure des surfaces. Dans ce cours sont également abordées les notions de troisième corps et de circuit tribologique afin de mieux décrire l'évolution de l'interface entre les surfaces frottantes et son rôle dans le comportement tribologique du système considéré.

Le contenu de ce module se décompose en 2 parties :

1. Plasticité et endommagement des matériaux (8h CM + 8h TDAO) et Contacts, frottement et endommagement des surfaces (8h CM + 2h TD)

Plasticité et endommagement des matériaux :

- (i) Identification et classification rhéologique
- (ii) Formulation tridimensionnelle en plasticité et viscoplasticité
- (iii) Quelques lois classiques d'écrouissage

- (iv) Effets cycliques : écrouissage isotrope/cinématique, durcissement cyclique
- (v) Variable d'endommagement et contrainte effective
- (vi) Formulation tridimensionnelle (endommagement isotrope)
- (vii) Couplages : endommagement fragile, endommagement ductile
- (viii) Effets cycliques : endommagement par fatigue et critères multiaxiaux d'amorçage d'une fissure

Contacts, frottement et endommagement des surfaces

- (i) Mécanique du contact et lois de frottement
- (ii) Mécanismes et lois d'usure
- (iii) Tribométrie : mesure expérimentale du frottement et de l'usure
- (iv) Matériaux pour la tribologie et applications industrielles
- (v) Énergie de surface : origine et composantes
- (vi) Modèles de contact adhésif

Partiel 1 (2h) : Plasticité et endommagement des matériaux + Contacts, frottement, endommagement des surfaces

2. Interfaces, usure et tribochimie (6h CM) et Lubrification et lubrifiants (8h CM + 4h TD + 16h TP)

Interfaces, usure et tribochimie

- (i) Concept de troisième corps et circuit tribologique
- (ii) Tribochimie : transformations sous contraintes et réactions tribochimiques

Lubrification et lubrifiants

- (i) Lubrifiants, viscosité et rhéologie
- (ii) Régimes de lubrification : sec, limite, mixte, hydrodynamique
- (iii) Lubrification hydrodynamique et élasto-hydrodynamique
- (iv) Lubrification hydrostatique et aérostatique
- (v) Études de cas et applications industrielles

4 TP : Tribologie, Rugosité, Énergie de surface, lubrification hydrodynamique (16h)

Partiel 2 (2h) : Interfaces, usure et tribochimie + Lubrification et lubrifiants

MSF4 : Corrosion, protection des surfaces et Eco-conception (60h)

Responsable	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
J. DEJEU	60	28	16	16	0	0	4

Mode d'évaluation : (2 partiels de 2h) x 0.7 + (moyenne notes de TP) x 0.3

Détail du programme :

Objectif du cours : Ce module permet d'acquérir de larges connaissances dans le domaine de la corrosion et du traitement de surface des matériaux : caractériser le type de corrosion, tester les matériaux et choisir les techniques de protection en termes de traitement de surfaces et de choix des matériaux.

Il fournit également les connaissances nécessaires pour développer des méthodes d'éco-conception et de choix des matériaux dans le contexte du développement durable et de l'analyse sur le cycle de vie. Il permet de connaître les différentes filières de recyclages des matériaux et de maîtriser l'analyse multicritères et multi-objectifs de type *Matériaux – Design – Procédés – Développement durable*

Le contenu de ce module se décompose en 3 parties :

1. Corrosion, préparation et protection des surfaces (16h CM – 8h TD),:

Cette partie concerne les phénomènes de corrosion des matériaux et des structures (corrosion humide, corrosion sèche). L'accent est particulièrement mis sur le choix des matériaux et les applications industriels (enjeux économiques, exemples d'applications, données sur la sécurité et la fiabilité des systèmes). Les parties suivantes sont consacrées à la préparation et la protection des surfaces contre la corrosion, notamment à l'aide de techniques de traitements de surfaces. Ces techniques peuvent également être mises en œuvre pour fonctionnaliser les surfaces en vue d'autres d'applications (surfaces intelligentes, surface hydrophile, surface hydrophobe, surface collante,...). Des exemples seront donnés et commentés.

- (i) Corrosion (aspects thermodynamique et cinétique des réactions d'oxydation aux surfaces et interfaces...)
- (ii) Élaboration de revêtements anti-corrosion
- (iii) Pollution / préparation des surfaces
- (iv) Surfaces fonctionnelles

Partiel 1 : Corrosion, préparation et protection des surfaces

2. Éco-conception et développement durable (6h CM)

- (i) Les différents outils de l'éco-conception
- (ii) Études de cas pratiques
- (iii) Valorisation et filières de recyclage des déchets

3. Choix des matériaux et environnement (6h CM 8h TD/TDAO 4h TP)

- (i) Sollicitations mécaniques et indices de performances
- (ii) Facteurs de forme macroscopique et microscopique
- (iii) Co-sélection Matériaux/Géométrie
- (iv) Lien matériaux procédés – Modèle de coût
- (v) Choix matériaux-procédés
- (vi) Choix des matériaux hybrides (composites, sandwich...)
- (vii) Problèmes multi-contraintes et problèmes multi-objectifs
- (viii) Analyse de cycle de vie

- (ix) Applications industrielles : réservoir d'hydrogène pour application automobile

Partiel 2 : Éco-conception et développement durable + Choix des matériaux et environnement

3 TPs Corrosion et Traitements de surfaces + 1 TPAO Matériaux et environnement

3^{ème} année : Systèmes mécatroniques et robotiques (UEOSMR)

240 heures d'enseignement, 16 ECTS, 1 unité d'enseignement

Responsable : Guillaume LAURENT (guillaume.laurent@supmicrotech.fr)

	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
SMR1 : Modélisation	78	44	34	0	0	0	5
SMR2 : Commande	42	24	18	0	0	0	3
SMR3 : Robotique	60	24	12	24	0	0	4
SMR4 : Vision par ordinateur	56	18	14	24	0	0	4
Conférences industrielles	4	0	0	0	0	4	0

La mécatronique est une technique industrielle consistant à utiliser en synergie la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique pour la conception et la réalisation de produits performants et innovants. La mécatronique est présente dans tous les domaines : dans les produits grand public, dans le médical, dans la défense, dans l'industrie, dans les transports et même dans l'agriculture ! Le robot est l'exemple type de l'apport de la mécatronique pour l'industrie de production : en vingt ans, ses performances ont été multipliées par quatre alors que sa consommation énergétique et son coût ont été divisés par quatre. Un autre domaine phare de la mécatronique est l'automobile. Tout en effet est mécatronique dans la voiture d'aujourd'hui : la motorisation, le freinage, la transmission, l'échappement, le confort, la sécurité et désormais la conduite...

La mécatronique est un secteur très pourvoyeur d'emplois et qui doit répondre aux besoins croissants des produits et industriels en matière d'augmentation des performances, de la sécurité et de la compétitivité. Le marché de la robotique industrielle est notamment en croissance continue de l'ordre de 12% par an au niveau mondial, tandis que s'ouvrent de nouveaux marchés dans les services, l'agriculture et la défense.

L'option « Systèmes Mécatroniques et robotiques » a pour objectif de former des ingénieurs polyvalents ayant une vision pluridisciplinaire large et le goût du challenge pour développer des systèmes et des produits innovants. L'option renforce la formation ENSMM dans quatre disciplines : la modélisation, la commande, la robotique et la vision par ordinateur.

L'équipe pédagogique est constituée d'enseignants-chercheurs reconnus en automatique et en robotique, membres de l'Institut FEMTO-ST (laboratoire associé à l'ENSMM, à l'UBFC et au CNRS). Des visites et conférences sont organisées chaque année pour renforcer la culture scientifique et industrielle des étudiants. Dans ce cadre, l'entreprise Sonceboz fera trois interventions sur la mécatronique pour l'automobile. Au niveau pratique, l'option s'appuie sur le pôle S.MART (anciennement AIP-PRIMECA) qui possède l'un des plus grands parcs de robotique industrielle.

Les projets de l'UEOPIST en option SMR

L'objectif du projet est de développer et de mettre en œuvre les méthodes et outils étudiés dans l'option sur des systèmes physiques ou logicielles. Il s'agit de concevoir un système mécatronique, de développer les méthodes de traitement d'informations issues de capteurs et d'intégrer les lois de commande pour permettre la commande en boucle fermée de systèmes réels mécatroniques ou micromécatroniques.

Les projets sont réalisés par équipes de 4 à 5 étudiants avec des rôles différents (chef de projet, ingénieur mécanicien pour la conception mécanique, ingénieur électronicien pour le traitement du signal, ingénieur automaticien pour la commande, ingénieur roboticien pour la cinématique et la vision).

Les sujets sont proposés par des industriels, par le département de micromécatronique du laboratoire FEMTO-ST ou par les étudiants. Ils peuvent également être partagés avec une option.

Les projets portent, entre autres, sur les domaines suivants :

- *Systèmes industriels (actionneurs, capteurs, robots)*
- *Robots mobiles, robots biomédicaux, microrobots*
- *Microsystèmes (matériaux actifs, actionneurs piézoélectriques, capteurs de force, etc.)*
- *Vision, traitement d'image, contrôle qualité*

Programme détaillé de l'unité d'enseignement spécifique

SMR1 : Modélisation (78h)

Intervenants : Gonzalo CABODEVILA, Emmanuel PIAT, Yongxin WU, Emmanuel RAMASSO

	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
Modélisation des systèmes mécatroniques	20	12	8	0	0	0	5
Identification des systèmes	22	10	12	0	0	0	
Filtrage et observation	36	22	14	0	0	0	

Ce module propose des méthodes pour modéliser un système mécatronique, identifier les paramètres du modèle et observer l'état du système à l'aide de données capteurs.

Modélisation des systèmes mécatroniques par Bond Graph : les systèmes mécatroniques sont par définition des systèmes au sein desquels plusieurs phénomènes physiques (mécanique, électrique, magnétique, etc.) sont mis en jeu. L'obtention d'un modèle analytique (pour la simulation, l'analyse ou la commande) par l'écriture des différentes lois physiques peut s'avérer fastidieux et délicat. Le bond graph (ou graphe de liaisons) est un outil de modélisation et d'analyse fondé sur le principe de la conservation de la puissance et qui permet de contourner ces difficultés. Les TD seront réalisés avec le logiciel 20-SIM.

Identification des systèmes : la problématique abordée concerne la détermination d'un modèle de représentation d'un processus à partir de la connaissance des signaux d'entrée/sortie. Le comportement dynamique prédit par le modèle doit être le plus voisin possible de celui du processus considéré, au sens d'un critère. Ce cours aborde les méthodes dites non paramétriques et les approches dites paramétriques pour les systèmes linéaires. Les méthodes seront mises en pratique en TD avec Matlab-Simulink et Python.

Filtrage numérique et observation d'état : ce cours aborde la problématique de la reconstruction d'un signal d'intérêt lorsque ce dernier a été altéré par du bruit de mesure ou lorsqu'il n'est pas directement mesurable à l'aide d'un capteur. Trois cas de figure seront abordés : (i) le signal d'intérêt est une entrée inconnue d'un

système dynamique, (ii) le signal d'intérêt est la sortie d'un système qui a été altérée par du bruit de mesure (iii) le signal d'intérêt est l'état inconnu d'un système. Cette problématique sera abordée pour des systèmes linéaires et non-linéaires. Les méthodes seront mises en œuvre en TD avec Matlab-Simulink.

Détail du programme :

- *Modélisation des systèmes mécatroniques par Bond Graph* : présentation, modélisation par l'approche énergétique, procédures de construction de modèles, notion de causalité, transformation en schéma bloc (fonction de transfert et représentation d'état), approche hamiltonienne à ports.
- *Identification des systèmes* : identification non paramétrique (méthodes élémentaires, réponses fréquentielles, réponses indicielles, systèmes oscillants, systèmes apériodiques, méthode de Strejc, exemples), rappels sur les méthodes d'optimisation d'une fonction multivariable, identification paramétrique (structure des modèles ARX et ARMAX, méthodes de détermination des paramètres).
- *Filtrage numérique et observation d'état* : approches fréquentielles (représentation fréquentielle et filtrage numérique du signal), approches temporelles (observateur d'état, observateur d'état étendu, observateur d'entrées inconnues).

Savoirs et compétences à acquérir :

- Modéliser un système multi-physique par l'approche énergétique.
- Simuler un système mécatronique avec le logiciel 20-SIM.
- Synthétiser un modèle suffisant pour mettre en œuvre la commande d'un système (linéaire, non linéaire).
- Représenter fréquemment, filtrer et estimer des signaux (entrée, sortie ou état) à l'aide de méthodes numériques développées sous Matlab-Simulink et/ou Python.

Mode d'évaluation :

- *Modélisation des systèmes mécatronique par Bond Graph* : 1 examen à mi-parcours et 1 mini-projet.
- *Identification des systèmes* : 1 examen terminal.
- *Filtrage numérique et observation d'état* : 1 examen à mi-parcours et 1 mini-projet.

SMR2 : Commande (42h)

Intervenants : Yann LE GORREC, Yongxin WU

	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
Commande multivariable	22	12	10	0	0	0	3
Commande robuste	20	12	8	0	0	0	

On s'intéresse dans ce module à la commande des systèmes dynamiques multivariables (c'est-à-dire possédant plusieurs actionneurs et plusieurs capteurs). Ces méthodes permettent de tenir compte des éventuels couplages au sein du système ainsi que des perturbations ou des incertitudes du modèle auxquels les systèmes mécatroniques sont souvent soumis. Une première partie de ce module porte sur les approches de type retour d'état plus observateur, avec synthèse par placement de structure propre ou par commande optimale. Ces approches sont validées par un mini-projet portant sur la synthèse de lois de commande pour un procédé chimique exothermique fortement non linéaire. La seconde partie du module porte sur l'élaboration de lois de commande robustes par retour dynamique de sortie. Le mini-projet associé à cette partie du module porte sur la synthèse de lois de commande robuste pour l'actionnement rapide et précis d'un micro-actionneur électromécanique. Les TD et les mini-projets seront réalisés avec Matlab-Simulink.

Détail du programme :

- *Commande multivariable par retour d'état plus observateur* : rappels de calcul matriciel, introduction aux systèmes multivariables, placement de structures propres par retour d'état, placement de

structures propres par retour dynamique de sortie, synthèse d'observateurs, commande Linéaire Quadratique (LQ), commande Linéaire Quadratique Gaussienne (LQG).

- *Commande robuste* : rappels de la commande LQ et sa robustesse, commande dynamique LQG et la récupération de robustesse par méthode LTR, définitions des robustesses au sens de la norme H2 et de la norme H infinie, introduction des systèmes avec incertitudes non structurées et structurées, modélisation incertaine, théorème du petit gain, synthèse de la commande robuste, synthèse par la méthode de H infinie.

Savoirs et compétences à acquérir :

- Modéliser et analyser les systèmes multivariables.
- Synthétiser la commande pour les systèmes multivariables.
- Connaître les notions de la robustesse.
- Modéliser les systèmes avec les incertitudes.
- Connaître la base des méthodes de la commande robuste.

Mode d'évaluation :

- *Commande multivariable par retour d'état plus observateur* : 1 mini-projet.
- *Commande robuste* : 1 mini-projet.

SMR3 : Robotique (58h)

Intervenants : Guillaume LAURENT, Nadine PIAT, Kanty RABENOROSOA

	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
Robotique industrielle	44	10	10	24	0	0	4
Robotique médicale	8	6	2	0	0	0	
Robotique de service	8	8	0	0	0	0	

Un robot est un système mécatronique programmable disposant de moyens de perception, d'interprétation et d'action qui lui permettent de réaliser des tâches imitant ou reproduisant des actions humaines. Ce module aborde la robotique industrielle, c'est-à-dire les robots manipulateurs destinés à des tâches de production comme la soudure, la peinture, l'assemblage, la manutention, l'emballage-conditionnement, etc. Le module propose également une ouverture aux nouvelles applications de la robotique dans le domaine médical et dans le domaine plus large des services et de la robotique mobile. Les travaux pratiques sont réalisés sur les robots industriels du pôle S.MART.

Détail du programme :

- *Robotique industrielle* : définition et typologie des robots industriels, marché de la robotique industrielle, actionneurs/capteurs/transmission d'un robot, modélisation d'un robot (géométrique, cinématique et dynamique), commande des axes, génération de trajectoire, programmation d'un robot, conception d'une cellule robotisée, cobotique.
- *Robotique médicale* : typologie des robots médicaux, gestes médico-chirurgicaux assistés par ordinateur (GMCAO), applications, commande des robots médicaux.
- *Robotique de service* : définition de la robotique de service, nouveaux marchés de la robotique de service, robotique mobile, locomotion, perception, modélisation, navigation, planification.

Savoirs et compétences à acquérir :

- Connaître le fonctionnement des robots industriels, médicaux et mobiles.
- Programmer un robot industriel.
- Concevoir une cellule robotisée industrielle ou une structure robotique répondant à un besoin médical.
- Concevoir un nouveau robot industriel, médical ou mobile (cinématique, modélisation et commande).

Mode d'évaluation :

- *Robotique industrielle* : 1 examen terminal, 4 comptes rendus de TP.
- *Robotique médicale* : 1 compte rendu de TDAO.
- *Robotique de service* : 1 étude d'article.

SMR4 : Vision par ordinateur (56h)

Intervenants : Nicolas ANDREFF, Sounkalo DEMBELE, Emmanuel RAMASSO

	Total	CM	TD	TP	AA	Conf	ECTS
Vision 2D	28	10	6	12	0	0	4
Vision 3D	28	10	6	12	0	0	

La vision par ordinateur a pour objectif d'extraire une information de haut niveau à partir d'images ou de flux vidéos. Ce processus inclut l'acquisition des images, leur traitement et leur analyse en vue de la construction d'informations de moindres dimensions comme l'attitude d'un objet ou la reconnaissance d'un visage. Ce module propose une initiation à la vision par ordinateur avec des perspectives industrielles. Les applications dans le domaine industriel sont en effet en plein essor. On peut citer le contrôle qualité, la métrologie dimensionnelle, la reconstruction 3D, la détection et le suivi d'objets ou d'opérateurs, etc. Les travaux pratiques sont réalisés dans la salle vision du pôle S.MART avec Python et Matlab.

Détail du programme :

- *Vision 2D* : formation des images numériques (imagerie conventionnelle monochrome et couleur, microscopie optique, microscopie électronique à balayage), traitement d'images (morphologie, réhaussement, débruitage, ...), segmentation et analyse d'images.
- *Vision 3D* : modélisation de la projection perspective, géométrie à 1 vue (estimation de pose), géométrie à 2 vues (triangulation, contrainte épipolaire, mise en correspondance, homographie entre plans, mosaïques d'images), géométrie à 3 vues (contrainte trifocale), géométrie à n vues (étalonnage de caméra, reconstruction 3D par le mouvement).

Savoirs et compétences à acquérir :

- Analyser des problèmes de vision par ordinateur pour déterminer l'imagerie adaptée et les traitements associés.
- Analyser des solutions de vision par ordinateur pour en déterminer les performances.
- Développer des applications de vision par ordinateur.
- Connaître les bases de la géométrie projective des points et droites.
- Étalonner des caméras.
- Réaliser des estimations d'attitude.
- Maîtriser la stéréoscopie, la géométrie épipolaire, la triangulation.
- Appréhender la reconstruction tridimensionnelle.

Mode d'évaluation :

- *Vision 2D* : 1 examen terminal, 1 mini-projet.
- *Vision 3D* : 1 examen terminal, comptes rendus de TP.