



**Présentation du master Mécanique,
parcours Mécanique des Matériaux et des Procédés,
à l'École des Mines de Saint-Étienne,
2016 - 2017**

Plaquette réalisée en juin 2016 par J. Bruchon, responsable du master MMP pour l'École des Mines de Saint-Étienne.

Le master **Mécanique**, est commun aux établissements Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, École Centrale de Lyon, École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Étienne et **École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne**. Il se décline en différents parcours :

- Modélisation et applications mécanique (MAM)
- Mécanique des fluides et énergétique (MFE)
- Biomécanique (BM)
- Dynamique des structures et des systèmes (D2S)
- Tribologie et ingénierie des surfaces (TIS)
- **Mécanique des matériaux et des procédés (MMP)**

Présentation générale du Master Mécanique

Ce master a pour objectif de former des étudiants aux métiers du secteur recherche et développement, et de l'ingénieur, aptes à travailler au plus haut niveau dans les domaines technologiques de pointe de la mécanique au sens large, capables de mener des projets innovants. Outre les grandes compétences disciplinaires, chacun des parcours possède ses spécificités :

- Modélisation et applications mécanique (MAM) : débouche sur un éventail d'activités et de services très large, où la compétitivité repose sur des développements technologiques permanents tels que l'utilisation de codes industriels pour l'optimisation des procédés industriels ou la conception de produits respectueux de l'environnement. Elle concerne les industries aéronautique, spatiale, automobile, des transports, des pneumatiques, la production et transformation de l'énergie, les moteurs et la propulsion ainsi que de nombreuses autres industries Mécanique mécaniques.
- Mécanique des fluides et énergétique (MFE) : vise à former les étudiants à intégrer le milieu professionnel dans le secteur recherche et développement du domaine de la mécanique des fluides ou de la production et transformation d'énergie en intégrant les concepts récents liés aux objectifs environnementaux. Les secteurs intéressés par cette spécialité sont nombreux : aéronautique, espace, aéraulique, nucléaire, environnement, production d'énergie, génie des procédés, génie biologique et médical, ...
- Biomécanique (BM) : a pour débouché des emplois de cadres supérieurs en R&D dans les domaines de la mécanique et de la biomécanique, en particulier le secteur de la recherche académique, le secteur hospitalier, les entreprises du domaine de l'ingénierie et des technologies de la santé, notamment celui de l'orthopédie et de la prise en charge du handicap mais également dans la protection des usagers des transports ou encore l'ergonomie et le confort des véhicules.

- Dynamique des structures et des systèmes usagers (D2S) : vise à former de futurs chercheurs et ingénieurs de haut niveau capables de mener des projets innovants et de promouvoir des méthodes avancées dans le domaine de la conception mécanique et de la mécanique des structures. Les domaines d'insertion professionnelle recouvrent l'industrie mécanique, les transports, le spatial et l'énergie. Les outils et les méthodes utilisées dans ces domaines sont en constante évolution suite aux évolutions technologiques et aux demandes du monde socio-économique axées sur la sécurité, le confort et la compétitivité.
- Tribologie et ingénierie des surfaces (TIS) : vise à former les étudiants aux défis scientifiques et industriels de demain dans le domaine de la tribologie et de l'ingénierie des surfaces. Les nombreux débouchés de ce parcours concernent l'ensemble des secteurs industriels, que ce soit l'aéronautique, l'énergie, la santé ou encore l'agroalimentaire. Ce parcours bénéficie de l'appui des laboratoires et entreprises du réseau Manutech, notamment le laboratoire d'excellence Manutech-SISE. Il permet aussi d'accueillir des étudiants non francophones.
- **Mécanique des matériaux et des procédés (MMP)** : a pour objectif de former des cadres scientifiques capables de développer des qualités de réflexions transdisciplinaires, indispensables pour aborder les problèmes posés dans les domaines de la mécanique des matériaux et du génie des procédés, et de développer l'aptitude à mener et exploiter des travaux expérimentaux et/ou théoriques (modélisation des phénomènes). Cette formation doit permettre aux étudiants de poursuivre en thèse de doctorat ou de trouver des emplois d'ingénieurs R&D dans de grands groupes industriels ou des PME dynamiques.

Organisation de la formation

Au minimum, 12 ECTS sont communs en M2 entre tous les parcours, dont certains relèvent de plusieurs établissements : le parcours MAM ne dépend que de Lyon 1, le parcours MFE dépend de Lyon 1 et de l'ECL, le parcours BM dépend de Lyon 1, l'ECL et l'EMSE, le parcours D2S dépend de Lyon 1 et l'ECL, le parcours TIS dépend de l'EMSE, l'ENISE et l'ECL et le **parcours MMP dépend de l'ENISE, Lyon 1 et l'EMSE.**

Les compétences scientifiques communes sont la maîtrise des concepts fondamentaux en mécanique des solides et des structures, en mécanique des fluides et en énergétique. L'ensemble des parcours apporte des compétences en modélisation et en résolution numérique des problèmes de mécanique. Les compétences linguistiques ont une place importante, de même que les compétences pré-professionnelles. **L'École des Mines de Saint-Étienne (EMSE) propose à cet effet un module d'intégration, commun aux masters de l'EMSE, en particulier aux parcours TIS et MMP du master IMP.**

De manière générale, les compétences communes à l'ensemble de la mention mécanique sont :

- Connaissance et compréhension d'un champ scientifique et technique de spécialité.
- Maîtrise des méthodes et des outils de l'ingénieur : identification et résolution de problèmes, collecte et interprétation de données, utilisation des outils informatiques, analyse et conception de systèmes complexes, expérimentation.
- Prise en compte des enjeux industriels, économiques et professionnels : compétitivité et productivité, innovation propriété intellectuelle et industrielle, respect des procédures qualité, sécurité.
- Aptitude à travailler en contexte international : maîtrise d'une langue étrangère.

Volume horaire de la formation en M2 :

- Pour le parcours MAM, il est de 502 heures, avec un stage de 24 semaines minimum.
- Pour le parcours MFE, il est de l'ordre de 250 heures, avec un stage de 4 mois minimum.
- Pour le parcours BM, il est de l'ordre de 250 heures, avec un stage de 4 mois minimum.
- Pour le parcours D2S, il est de l'ordre de 250 heures, avec un stage de 4 mois minimum.
- Pour le parcours TIS, il est de l'ordre de 250 heures, avec un stage de 4 mois minimum.
- **Pour le parcours MMP, il est de l'ordre de 250 heures, avec un stage de 4 mois minimum.**

Contenu de l'enseignement dispensé à l'EMSE dans le parcours MMP

Un total de 60 ECTS doit être validé durant l'année de M2, se répartissant comme indiqué sur la Figure 1 : $6 + 6 = 12$ ECTS d'UE (Unité d'enseignement) de tronc commun, $6 + 6 = 12$ ECTS d'UE de parcours, et 6 ECTS d'UE d'ouverture. À cela, s'ajoutent 3 ECTS en Sciences Humaines et Sociales (SHS) dispensées à l'ENISE, 3 ECTS d'anglais regroupées avec 3 ECTS de projet de laboratoire. Un stage de 4 mois minimum complétera les 21 ECTS. De plus, pour favoriser l'intégration des étudiants étrangers, l'EMSE propose un module *International* commun à tous les Masters de l'École

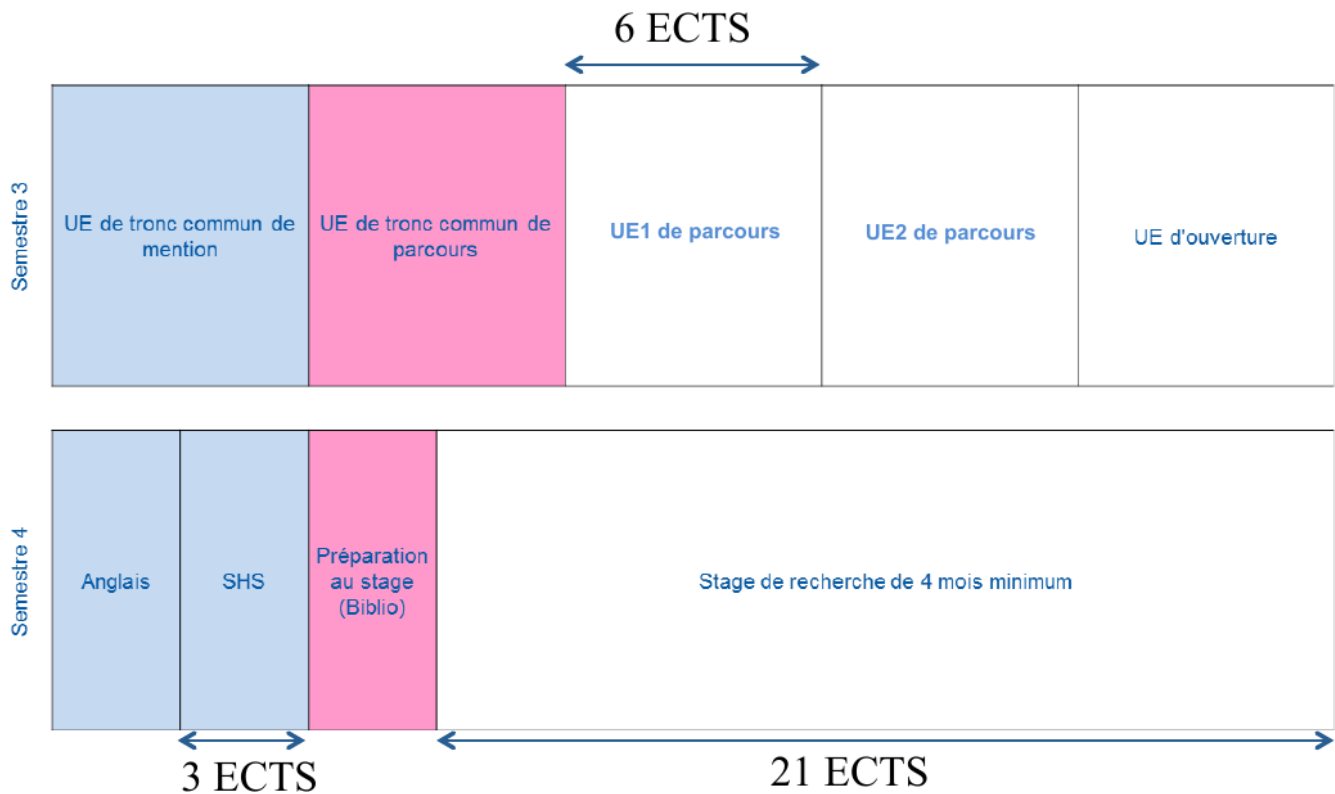


Figure 1: Structure générale du M2

Les cours proposés à l'EMSE sont les suivants. Ce sont pour la plupart des cours intégrés à la formation d'ingénieur dite «Ingénieur Civil des Mines » (ICM). Les cours mentionnés en *rouge* sont des cours de mécanique, faisant partie d'un ensemble de 160 heures de cours appelé *Majeure Mécanique*. Il est fortement recommandé de suivre l'intégralité de cette majeure. Le détail de ces cours est donné dans section I. ci-dessous. L'UE mentionnée en *bleu* correspond aux cours de méthodes numériques et mécanique numérique. Ils font partie d'un ensemble de 80 heures de cours appelé *Toolbox Modélisations et Simulations Numériques Avancées (MSNA)* détaillé dans la section II. ci-dessous. Là aussi, le suivi de l'intégralité de la toolbox MSNA est recommandée. Enfin, les UE d'ouverture, indiquées en *vert*, font parties des UE de parcours du parcours TIS, et s'inscrivent dans un ensemble plus vaste de 2 x 80 heures de cours de la formation ICM, appelé *Défi Éco-conception*. Ces UE sont détaillées dans la section III. de ce document.

UE de tronc commun (12 ECTS)

- Méthodes numériques en mécanique (6 ECTS)
- Mécanique des Matériaux (6 ECTS, UP1 MM)

UE spécifiques au parcours MMP (12 ECTS)

- Matériaux non métalliques (6 ECTS)
 - Mise en œuvre des composites et propriétés induites (6 ECTS, UP3 MM)

- Comportement en service (6 ETC)
 - Mécanique de la rupture (3 ECTS, UP4 MM*)
 - Dynamique des matériaux et des structures (3 ECTS, UP4 MM*)
 - Plaques et coques (6 ECTS, UP2 MM)

UE d'ouverture (6 ECTS)

- Corrosion et réactivité des surfaces (6 ECTS)
- Fondamentaux en ingénierie des surfaces (3 ECTS)
- Fonctionnalisation des surfaces (3 ECTS)

Sciences Humaines et projet de laboratoire (9 ECTS)

- Sciences Humaines et Sociales (3 ECTS)
- Anglais (3 ECTS)
- Projet de laboratoire (3 ECTS)

Stage de recherche (21 ECTS)

(*) Ces deux cours ne peuvent être pris séparément.

I. Mécanique (Majeure mécanique, 4 x 40 heures - responsable du module : Sylvain Drapier)

Description et objectifs du module *Mécanique*

A travers les compétences et connaissances acquises dans cet ensemble de cours, l'élève sera en mesure de **comprendre** et **maîtriser** la **représentation** de la **réalité** de **systèmes mécaniques** (système = particules en interactions, structure aéronautique, réservoir géologique, ...) , et donc les **hypothèses** introduites dans les modèles de prévision et d'identification du comportement. La notion de **modélisation**, et donc d'**abstraction** en lien avec des problèmes physiques complexes, est primordiale dans les approches traitées par un ingénieur ou un chercheur.

La mécanique se retrouve, au sens large, dans **tous les métiers** touchant à l'**ingénierie** dans les **transports, l'énergie, la santé, ...** En **combinant** les enseignements acquis à travers l'ensemble de cours *Majeure mécanique*, avec d'autres enseignement permettant de mettre en œuvre des **outils d'ingénierie et/ou technologie**, les étudiants seront à même de **prendre en charge** des projets autour de - mais pas limité à - la démarche intégrée de **conception / fabrication / contrôle**.

L'étudiant découvrira, via ces enseignements, les diverses facettes de la mécanique utilisées en ingénierie et en recherche; ils se déclinent en 4 Unités Pédagogiques (UPs) de 40h (ci-dessous), dont l'objectif est de **mettre en situation d'appréhender, en quasi-autonomie, des modèles capables de représenter des phénomènes mécaniques courants** afin de dimensionner des systèmes simples.

Que ce soit en **mécanique des matériaux** (UP1) ou en **mécanique des structures** (UP2), les **modèles de comportement** doivent être posés, dans le bon cadre et à la bonne échelle. C'est cette notion d'échelle qui sera largement abordée en **homogénéisation**, afin d'obtenir des comportements équivalents (UP3). Enfin, la durabilité des systèmes mécaniques sains ou endommagés est liée à leur capacité à supporter des sollicitations statiques et dynamiques (UP4).

- Outils de base pour la compréhension de la mécanique - **UP1 Mécanique des matériaux**.
- Approximations des comportements - cinématiques approchées et résolutions associées - **UP2 Mécanique des structures**.
- Notions d'échelles d'observations et de transition d'échelle en mécanique – **UP3 Comportements équivalents**.
- Comportements limitants - **UP4 Comportements limites et dimensionnants**.

1. **UP1 - Mécanique des matériaux** – 39h, 6 ECTS. Responsable de l'UP : Julien Bruchon

Ce cours fait partie des cours de l'enseignement obligatoire du parcours MMP.

Cette UP comporte 36 heures de cours, et 3 heures d'examen, assurées par trois enseignants, J. Bruchon, C. Desrayaud et H. Klöcker. Les étudiants renforceront et approfondiront leurs connaissances générales en Mécanique des Milieux Continus (MMC) et acquerront les notions nécessaires à la compréhension du comportement mécanique des matériaux. De plus, les connaissances acquises dans cette UP serviront de socle aux différents enseignements Mécanique. Les 36 heures de cours se répartissent comme suit :

- a) **Formalisme de la MMC en grandes déformations**, C. Desrayaud (10,5h)
- b) **Comportement mécanique des matériaux**, H. Klöcker (15h)
- c) **Thermodynamique des milieux continus**, J. Bruchon (10,5h)

Le premier cours fait le lien avec les notions de MMC déjà acquises, et introduit les concepts (notions de configurations, d'objectivité) et les outils (mesures de contraintes et de déformations) nécessaires au traitement des grandes déformations. Le deuxième cours approfondit la notion de comportement mécanique d'un matériau : les notions de plasticité et d'érouissage sont introduites, permettant de décrire le comportement d'une grande variété de matériaux. Enfin, le troisième cours reprend ces notions mais dans le cadre formel de la thermodynamique des milieux continus, ce qui permet de dériver "automatiquement" les différents couplages thermodynamiquement admissibles entre les différentes grandeurs mécaniques et physiques introduites.

Ces cours sont complétés par un examen de 3 heures (2 x 1,5h).

2. **UP2 – Mécanique des Structures** – 39h, 6 ECTS. Responsable de l'UP : Sylvain Drapier

Cette UP constitue le cours *Plaques et Coques*, proposé à l'EMSE dans l'UE **Comportement en service**. La mécanique des structures couvre un vaste champ de la mécanique des solides (poutres, plaques,

coques, ...) où le système étudié est tel que des **simplifications** peuvent être **adoptées**, et qui sont telles que la **résolution devient possible**.

L'étudiant sera mis progressivement en situation de résoudre des problèmes complexes, où les choix des hypothèses de modélisation seront de plus en plus cruciaux : choix des **cinématiques** des structures étudiées, choix des représentations du **comportement**, choix des méthodes de **résolution** adaptées, choix du degré d'**idéalisat**ion (modélisation) du système réel, ...

L'élève sera capable, en fin de cette UP, d'analyser un système mécanique, et de proposer une résolution **analytique** ou de choisir un type de résolution **numérique** adapté, et notamment de comprendre la théorie qui sous-tend les éléments finis en mécanique du solide.

Les enseignements seront proposés sous forme de **cours** et **TD**, avec les horaires, indicatifs, ci-dessous :

- i. Notions de base sur la mécanique des structures (6h),
- ii. Comportements dynamiques (3h) et instables (3h),
- iii. Mécanique des plaques (6h),
- iv. Méthodes de résolution approchées (3h),
- v. 15h de TD intercalées, et 3h de TP sur la caractérisation du comportement mécanique de structures composites.

3. **UP3 – Comportements équivalents** – 39h, 6ECTS. Responsable de l'UP : Claire Morin

Cette UP correspond au cours **Mise en œuvre des composites et propriétés induites**, proposé à l'EMSE dans l'UE **Matériaux non-métalliques** du parcours MMP.

La mécanique des milieux continus donne des outils pour modéliser le comportement des milieux denses à une échelle qualifiée de macroscopique, telle que la notion de microstructure du matériaux constitutif est absente et simplement représentée par des propriétés équivalentes plus ou moins sophistiquées (cf UP Mécanique des Matériaux). Au contraire, à l'échelle de leur microstructure, les matériaux sont hétérogènes, et le comportement observé à l'échelle macroscopique résulte de mécanismes physiques élémentaires actifs à l'échelle de la microstructure.

Lors de ce cours, l'étudiant sera amené progressivement à comprendre les notions d'**échelles** et de **séparation d'échelles**, et son influence sur le comportement observé. Il sera ainsi capable de définir un **Volume Élémentaire Représentatif** et de faire le lien avec la notion introduite en mécanique des milieux continus. De plus, il connaîtra les principales **méthodes de changement d'échelles**, permettant de déduire le **comportement effectif** d'un matériau hétérogène à partir de la connaissance de sa microstructure, mais aussi d'estimer les contraintes locales à l'intérieur d'une microstructure. Enfin, une application des diverses notions aux **matériaux composites hautes performances**, très utilisés dans de nombreuses industries (notamment aéronautique) sera proposée en fin de cours.

Les enseignements seront proposés sous forme de **cours** et **TD**, ainsi que de **deux TP numériques**. Un **TP** expérimental est aussi prévu. Les volumes horaires sont, de manière indicative, les suivants :

a) **Homogénéisation en mécanique (28h, C. Morin)**

- i. Calcul tensoriel et anisotropie élastique
- ii. Notions d'échelles et approche micromécanique du comportement
- iii. Théorie des modules effectifs et Bornes de Voigt et Reuss
- iv. Homogénéisation des milieux aléatoires
 - Problèmes d'Eshelby
 - Composite à renforts particulières : modèle sans interaction
 - Composite à renforts particulières : estimation de Mori-Tanaka
 - Bornes de Hashin et Shtrikman
 - Modèles micromécaniques pour les matériaux polycristallins
- v. Homogénéisation périodique

b) **Composites (12h, S. Drapier)**

- i. Généralités sur les composites hautes performances
- ii. Comportement d'un pli unidirectionnel dans et en dehors de ses axes d'orthotropie
- iii. Résistance à l'échelle des plis
- iv. Poutres à sections composites
- v. Plaques stratifiées

4. - **UP4 Comportements limites et dimensionnants** – 39h, 6ECTS. Responsable de l'UP : Helmut Klöcker

Cette unité pédagogique comporte deux cours s'inscrivant dans l'UE **Comportement en service** du parcours MMP. Le premier cours aborde le dimensionnement de structures sous sollicitations dynamiques (sismiques). Le deuxième cours est dédié à la mécanique de la rupture.

Dynamique des matériaux et des structures - 3 ECTS, G. Kermouche

Tout au long de cet enseignement, l'étudiant sera amené à réfléchir sur l'impact des phénomènes dynamiques sur le dimensionnement des structures. Le fil rouge de cet enseignement est le cas concret de la réponse sismique des structures du génie civil. L'étudiant mettra en pratique les réglementations comme un ingénieur de bureau d'étude tout en faisant le lien avec les aspects théoriques. Il sera aussi amené à utiliser des logiciels éléments-finis pour simuler la réponse dynamique de structures modèles

a) Dynamique des systèmes indéformables

- i. Principe fondamental de la dynamique
- ii. Théorèmes énergétiques

- b) Oscillateur élémentaire
 - i. Réponse dynamique et résonance
 - ii. Sollicitations quelconques
 - iii. Application au problème sismique
- c) Vibration des structures discrètes
 - i. Notions de modes propres
 - ii. Méthodes de résolution
 - iii. Application au problème sismique
- d) Vibration des structures continues
 - i. Équilibre dynamique des milieux continus
 - ii. Vibration des poutres
 - iii. Méthodes de résolution par éléments-finis

Mécanique de la rupture - 3 ECTS, H. Klöcker

La mécanique de la rupture est un outil de base pour l'ingénieur et le chercheur en mécanique et matériaux. Après un exposé des concepts fondamentaux et des principaux mécanismes de rupture, suivra un exposé détaillé de la mécanique de rupture linéaire. La mécanique de la rupture non linéaire sera abordée par le concept de l'intégrale. La fatigue de matériau sera introduite de manière heuristique. Le cours est basé sur un enseignement théorique, des travaux dirigés et des travaux pratiques.

- a) Introduction
- b) Mécanique de rupture élastique linéaire
 - i. Concentration de contraintes
 - ii. Le critère de Griffith
 - iii. Le taux de restitution d'énergie
 - iv. Instabilité et courbes R
 - v. Analyse des contraintes : le facteur d'intensité de contraintes
 - vi. Relation entre G et K
 - vii. Plasticité en fond d'entaille
- c) Mécanique de la rupture élasto-plastique
 - i. Ouverture en fond d'entaille (CTOD)
 - ii. L'intégrale J

- d) Quelques notions de fatigue
 - i. Chargement cyclique : courbes de Wöhler
 - ii. Lois empirique de propagation de fissures.

II. **Méthodes numériques en mécanique** (36 heures, 6 ECTS - Responsable du module : Nicolas Moulin)

Les cours constituant l'UE **Méthodes numériques en mécanique** sont dispensés dans un ensemble de 80 heures de cours, appelé *Toolbox Modélisations et Simulations Numériques Avancés* de la formation ICM. Cette Toolbox formant une unité cohérente, il est fortement recommandé de la suivre en totalité. 6 ECTS sur les 12 possibles sont nécessaires à la validation de ce module. En cas d'excès d'ECTS validés, la moyenne obtenue à l'UE sera évaluée en ne retenant que les meilleures notes.

Description et objectifs de l'UE

Dans la pratique de son métier, l'ingénieur ou le chercheur se trouvent confrontés à des problèmes faisant intervenir des **phénomènes physiques complexes** (comportement d'un matériau intégrant plusieurs échelles de description, tenue d'une structure sous sollicitations, ...) Dans ce contexte, le recours à la **modélisation**, i.e. la traduction de ces phénomènes en langage mathématique, est un élément crucial de compréhension et de prédiction. Cependant, la complexité croissante des modèles mathématiques développés conduit fréquemment à en **approcher la solution par des méthodes d'approximation numériques** (typiquement la méthode des Éléments Finis (EF)).

La construction d'un modèle mathématique, puis l'élaboration d'une stratégie numérique, apparaît donc comme le point central de la démarche scientifique d'un ingénieur. À l'issue de ce module *Mécanique Numérique*, les étudiants posséderont les notions nécessaires à

- la mise en œuvre d'une démarche de modélisation, i.e. le passage de la description physique d'un phénomène à sa modélisation mathématique ;
- l'élaboration d'une stratégie numérique permettant d'approcher la solution du modèle mathématique ;
- l'analyse et l'interprétation d'un point de vue numérique (consistance, stabilité, convergence, ...) des résultats de simulation.

Le module est constitué d'un ensemble de 4 Ups organisé comme suit.

1. **UP1 - Les EDP : introduction physique, analyse mathématique et discrétisation numérique**, 18heures, 3 ECTS – Responsable de l'UP : Julien Bruchon

Au cours de cette UP d'introduction, les élèves apprendront à analyser et modéliser un problème physique afin d'établir les équations aux dérivées partielles (EDP) qui le décrivent. D'un point de vue mathématique, ces équations se répartissent en trois catégories (elliptiques, paraboliques et hyperboliques) dont les représentants physiques les plus connus sont l'équation de diffusion

stationnaire, l'équation de diffusion instationnaire, et l'équation des ondes. Une étude mathématique même succincte permet de caractériser le comportement de la solution de ces EDPs et de le relier au comportement physique que l'on veut modéliser. De plus ceci permet d'anticiper les propriétés que le schéma de discrétisation doit satisfaire pour approcher numériquement au mieux cette solution.

Deux enseignants interviennent dans ce cours avec la répartition suivante :

a) **De la modélisation physique à l'analyse mathématique** (9h, Julien Bruchon)

L'objectif de cette partie est d'introduire, par des exemples physiques décrits de manière approfondie, les trois genres d'équations aux dérivées partielles du second ordre, à savoir les équations elliptiques, paraboliques et hyperboliques. L'accent sera d'abord mis sur l'aspect lois de conservation, pour arriver à des équations de convection diffusion instationnaires, avec pour exemple les problèmes de diffusion (particules ou chaleur), l'équation de Fokker - Planck, ou encore l'équation d'équilibre d'une membrane en caoutchouc. La description de la propagation du son permettra d'introduire l'équation des ondes et donc l'hyperbolicité. Le lien avec les équations hyperboliques d'ordre 1 sera fait. Suite à chaque exemple, une analyse mathématique simplifiée permettra de préciser sous quelles conditions le problème est bien posé et de dégager les principales propriétés de la solution (régularité, apparition de discontinuité, etc.). Enfin, une synthèse mathématique plus formelle permet d'introduire la notion de courbes caractéristiques, de classer les équations, et de les exprimer sous leurs formes standards.

b) **Introduction aux méthodes de discrétisation des EDP** (E. Touboul, 6h)

Ce cours présente les principes généraux de discrétisation d'une EDP :

- Théorème de Cauchy - Lipschitz, méthode d'approximation, consistance du schéma, convergence du schéma, stabilité du schéma.
- Choix de la méthode de discrétisation
- Algèbre linéaire (valeurs propres, conditionnement d'une matrice, pivots de Gauss, méthodes itératives).

2. **UP2 – Méthodes de résolution par éléments finis**, 21 heures, 3 ECTS – Responsable de l'UP : Nicolas Moulin

Par une alternance entre cours théoriques et TP de programmation sous MatLab, l'étudiant acquerra et maîtrisera les notions nécessaires à la résolution par éléments finis des principales équations de la physique. Grâce à un cadre mathématique bien posé (UP1), l'étudiant sera capable de comprendre et mettre en œuvre les différentes étapes de cette résolution, allant de la formulation variationnelle du problème, jusqu'à la résolution du système algébrique, en passant par l'étape de discrétisation par éléments finis proprement dite.

Un soin particulier sera porté à l'analyse de la solution en terme de convergence, stabilité, précision, par l'étude des maillages, des propriétés des fonctions d'interpolations, de l'intégration numérique, du conditionnement des matrices...

3. **UP3 – Problèmes non linéaires en mécanique du solide**, 15 heures, 2 ECTS – Responsable de l'UP : Nicolas Moulin

Dans la pratique, se limiter à des comportements linéaires ne permet pas toujours de représenter correctement la réponse mécanique d'un matériau impliquant des non-linéarités d'origines géométriques et matérielles. L'enseignement dispensé dans cette UP abordera donc le formalisme nécessaire à l'introduction de ces non-linéarités omniprésentes en mécanique des solides et des structures, depuis l'écriture de formulations spécifiques (i.e. formulations mixtes), de lois de comportement (élastoplasticité) et de conditions aux limites spécifiques (contact) jusqu'aux algorithmes spécifiques de résolution (Newton-Raphson, pilotage en longueur d'arc...).

4. **UP4 – Phénomènes de transfert**, 24 heures, 4 ECTS – Responsable de l'UP : Éric Touboul

Dans de nombreux phénomènes naturels ou procédés industriels, des grandeurs comme la masse, l'énergie, la quantité de mouvement, se transportent suivant deux mécanismes conjoints : la diffusion et la convection (ou advection). Les exemples sont nombreux : thermique, transport de particules, propagation de polluant, écoulements,

L'aspect convectif (transport par un champ de vitesse) se traduit par un terme de nature hyperbolique dans les équations de bilan. Alors que la diffusion ne pose pas de problème majeur, la convection induit des instabilités et des discontinuités dans les solutions ; cela conduit à des difficultés d'ordre théorique et numérique, et à des techniques spécifiques pour la résolution.

Dans cette UP, les étudiants apprendront à identifier ces phénomènes, à les modéliser mathématiquement sous la forme d'équations aux dérivées partielles, et à résoudre ces équations en utilisant principalement la méthode des éléments finis. Ils sauront mettre en œuvre ces méthodes sur des cas simples en traitant spécifiquement les problèmes d'instabilité et de discontinuité des solutions, ainsi que de suivi de fronts de discontinuité (interfaces fluide-fluide par exemple).

Un TP « fil rouge » permettra aux élèves d'implémenter ces méthodes (Matlab) et de les tester, et par conséquent, de mieux les appréhender et les comprendre. De plus, deux séances de TP sur un code de résolution par éléments finis, permettront d'aborder la problématique de description d'une interface mobile séparant deux domaines physiques comme deux fluides.

III. **UE d'ouverture (Défi Éco-conception**, 6 ECTS - responsable du module : Guillaume Kermouche)

Les cours d'ouverture du parcours MMP proposés à l'EMSE sont les suivants :

1. **Corrosion et réactivité des surfaces**, ou **conception en environnements sévères**. Responsable des cours : Krzysztof Wolski, 39 heures, 6 ECTS.

Conception en environnements sévères implique la maîtrise de l'ensemble des phénomènes qui limitent la durée de vie des matériaux et de structures exposés à l'action des contraintes mécaniques, de la température et de l'environnement physico-chimique.

Au travers de cette UE l'étudiant prendra conscience de l'aspect pluridisciplinaire de la science des matériaux et des coûts associés au vieillissement des matériaux et des structures en environnements sévères.

Cette UE se structure comme suit :

- Introduction - le défi du recyclage des alliages métalliques (3h – K. Wolski)
- Durabilité dans les milieux aqueux à basse température (C. Bosch et J. Geringer)
 - Rappels sur les interactions alliages – solutions aqueuses (6h)
 - Exemples d'applications dans les domaines : oil&gas et transport en général (6h)
 - Conférence par un intervenant extérieur (3h)
- Durabilité dans les milieux gazeux à haute température (V. Peres, K. Wolski)
 - Rappels sur les interactions alliages – gaz chaud (6h)
 - Exemples d'applications dans les domaines : nucléaire et énergie en général (6h)
 - Étude d'un cas fissuration accélérée à 100

2. Tribologie et caractérisation des surfaces (3 ECTS) - Fonctionnalisation des surfaces (3 ECTS).

Responsable des cours : G. Kermouche, 39h.

Les deux cours sont réunis sous l'appellation « conception (fonctionnalisation) des surfaces », et visent à sensibiliser les étudiants aux enjeux de la fonctionnalisation (conception) des surfaces et aux moyens associés pour créer de la valeur dans le cadre de l'allègement et de la durabilité des structures. Cette UE est en lien direct avec les investissements d'avenir MANUTECH situés sur le territoire stéphano-lyonnais, structurant la recherche national dans le domaine de l'ingénierie des surfaces. Le contenu de cette UE est le suivant :

- Fondamentaux d'ingénierie des surfaces (15h)
 - Frottement, usure et lubrification (G. Kermouche)
 - Caractériser les surfaces (G. Kermouche)
 - Durabilité des surfaces (J. Geringer)
- Surfaces architecturées (12h)
 - Dépôts par voie humide (M. Rieu)
 - Dépôts par voie physique (HEF)
 - Texturation (HEF)
- Traiter les surfaces (9h)
 - Traitements thermo-chimiques (V. Peres)
 - Traitements mécaniques (G. Kermouche)