

## Remise à niveau

<https://pimm.artsetmetiers.fr/remise-niveau>

### Objectifs

Le cours de remise à niveau vise tout d'abord à rappeler (voire introduire) les concepts généraux de cinématique et les différentes mesures de contraintes qui interviennent pour formuler l'équilibre d'un milieu continu déformable. On se place d'emblée en grandes transformations, le cadre plus restrictif des petites déformations s'en déduisant par linéarisation. En particulier, l'objectivité (i.e. indépendance par rapport au référentiel) des grandeurs physiques introduites est discutée. Les compléments d'algèbre, d'analyse vectorielle et tensorielle utiles à la compréhension des concepts mécaniques sont proposés aux endroits opportuns. La notation (moderne) intrinsèque est utilisée, complétée si nécessaire de la notation indicielle voire explicite. La dernière partie se restreint à l'élasticité linéaire avec une évocation de l'élasticité non linéaire. Quelques exemples d'applications sont finalement développés. Ce cours doit permettre à l'étudiant du mastère MAGIS d'aborder

### Mécanique des milieux continus

<https://pimm.artsetmetiers.fr/mecanique-des-milieux-continus>

Le cours est facultatif mais fortement conseillé

Le cours est dispensé en anglais 

### Equipe pédagogique

Coord. **Véronique Aubin** ([veronique.aubin@centralesupelec.fr](mailto:veronique.aubin@centralesupelec.fr), CentraleSupélec)

**L'unité d'enseignement est facultative.**

**Les cours sont dispensés en anglais.**

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

Non obligatoire: 0 ECTS / 5 séances de 3 heures

Cours magistral : 6 séances de 1h30

Travaux dirigés : 4 séances de 1h30

### Thèmes abordés

#### Chapitre 1. Calcul tensoriel

- Introduction sur les vecteurs et tenseurs cartésiens
- Opérations algébriques sur les tenseurs d'ordre deux: contraction, produit scalaire, transposition, trace, déterminant et inverse, décomposition
- Tenseurs particuliers : tenseur orthogonal, tenseurs symétrique et antisymétrique, tenseurs sphérique et déviatorique
- Invariants d'un tenseur
- Valeurs propres et vecteurs propres de tenseurs
- Eléments d'analyse tensorielle : fonctions tensorielles à valeurs scalaires ou tensorielles
- Opérateurs gradient et divergence et leur application
- Dérivation tensorielle d'une fonction scalaire
- Dérivation spatiale ou temporelle d'une fonction scalaire ou tensorielle de tenseur
- Théorèmes d'intégration de Gauss et Stokes

#### Chapitre 2. Cinématique des milieux continus

# Programme MAGIS



- Corps, configuration et mouvement – Descriptions matérielle et spatiale
- Dérivées matérielles, vitesse et accélération
- Gradient de déformation, tenseurs de déformation et invariants – Décomposition polaire,
- Changements de volume et d'aire – Conservation de la masse – Distorsion
- Déformations homogènes et mouvement de corps rigide
- Cinématique linéarisée – Petits déplacements et tenseur de déformation linéarisé
- Taux de déformation
- Objectivité des grandeurs cinématiques

## Chapitre 3. Contraintes et équilibre

- Forces volumiques et de contact – Postulat de Cauchy
- Equations d'équilibre d'un milieu continu
- Propriétés du tenseur de contrainte de Cauchy – Contrainte déviatorique et volumique
- Exemples d'états de contrainte
- Tenseurs de contraintes de Piola-Kirchhoff
- Objectivité des contraintes – Principe du travail virtuel

## Chapitre 4. Elasticité et applications

- Rappels sur l'élasticité linéaire et infinitésimale
- Tenseur d'élasticité en représentation matérielle et spatiale
- Exemples d'applications <https://pimm.artsetmetiers.fr/mecanique-des-milieus-continus>

## Science des matériaux, métallurgie

<https://pimm.artsetmetiers.fr/mecanique-des-milieus-continus>

Le cours est facultatif mais fortement conseillé

Le cours est dispensé en anglais 

### Equipe pédagogique

Coord. Anne-Françoise GOURGUES-LORENZON ([anne-francoise.gourgues-lorenzon@mines-paristech.fr](mailto:anne-francoise.gourgues-lorenzon@mines-paristech.fr), MINES Paristech)

### Thèmes abordés

#### Chapitre 1. Les éléments de base sur la microstructure des matériaux

- Introduction aux différentes familles de matériaux : réflexion à partir de leurs propriétés d'emploi, origine et ordre de grandeurs numériques de ces propriétés (module d'Young, dilatation thermique, température de fusion...).
- Rappel sur les liaisons atomiques. Etat cristallin, état amorphe (et transition vitreuse), notions de base de cristallographie.
- Microstructure des alliages métalliques, des céramiques : solution solide, grains, texture, phases.
- Défauts : lacunes, dislocations, interfaces et énergie d'interface, cavités, inclusions...

#### Chapitre 2. Formation des microstructures : outils thermocinétiques

- Les bases des transformations de phase du point de vue du matériau.
- Rappels de thermodynamique (potentiels thermodynamiques, diagrammes d'équilibre)
- Notions de cinétique (germination, croissance, loi d'Avrami), activation thermique.

## Programme MAGIS



- Transformations non diffusives

### Chapitre 3. Elaboration des matériaux : quelques exemples

- Missions des procédés d'élaboration pour différentes familles de matériaux
- Elaboration des alliages ferreux (voie électrique, voie minéral), solidification, croissance des cristaux solides, microstructures et défauts de solidification
- Matériaux cimentaires
- Elaboration et mise en œuvre des verres minéraux : le rôle de la viscosité

### Chapitre 4. Liens entre microstructure et résistance mécanique - Traitements thermiques

- Application au traitement thermique des alliages métalliques : diagramme d'équilibre fer-carbone, diagrammes TTT, TRC des aciers, microstructures associées.
- Etude de cas sur la précipitation : traitement thermique des alliages d'aluminium.
- Exemple 1 d'application : aciers pour automobiles
- Durcissement : solution solide, joints de grains (Hall-Petch), écrouissage, précipitation. Quantification de ces différentes contributions.
- Exemple 2 d'application : superalliages base nickel pour aubes de turbines aéronautiques

### Chapitre 5. Mise en œuvre et microstructure des polymères

- Introduction à la structure des polymères : notion de macromolécule. Réseau 2D, 3D.
- Configuration (tacticité), conformation
- Etat amorphe. Pelote statistique.
- Etat cristallin : structure cristalline
- Microstructures : lamelles cristallines, sphérolite
- Evolution du module avec la température : état vitreux, viscoélasticité, état caoutchoutique, écoulement. Interprétation de mesures de spectroscopie d'impédance mécanique.
- Fibres : naturelles, synthétiques : microstructure et propriétés (rigidité)

## Programme MAGIS



Semestre 1 – 30 ECTS

<https://pimm.artsetmetiers.fr/semestre-1-30-ects>

Cours de tronc commun – 12 ECTS

<https://pimm.artsetmetiers.fr/cours-de-tronc-commun-12-ects>

### Origine physique du comportement des matériaux

<https://pimm.artsetmetiers.fr/origine-physique-du-comportement-des-materiaux>

L'unité d'enseignement est obligatoire.

Les cours sont dispensés en français.

Les cours sont dispensés en anglais.

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

3 ECTS / 30 h / 10 séances de 3 heures

Cours magistral : 9 séances de 1h30

Travaux dirigés : 9 séances de 1h30

Travaux pratiques : 1 séance de 4h00

### Equipe pédagogique

Coord. **Véronique Favier** ([veronique.favier@ensam.eu](mailto:veronique.favier@ensam.eu), ENSAM Paris)

Etienne Barthel, [etienne.barthel@espci.psl.eu](mailto:etienne.barthel@espci.psl.eu)

Véronique Favier, [veronique.favier@ensam.eu](mailto:veronique.favier@ensam.eu)

Ricardo Gatti, [riccardo.gatti@onera.fr](mailto:riccardo.gatti@onera.fr)

Bruno Fayolle, [bruno.fayolle@ensam.eu](mailto:bruno.fayolle@ensam.eu)

Samuel Forest, [samuel.forest@mines-paristech.fr](mailto:samuel.forest@mines-paristech.fr)

Sylvie Pommier, [sylvie.pommier@universite-paris-saclay.fr](mailto:sylvie.pommier@universite-paris-saclay.fr)

### Objectifs

Cette unité d'enseignement a pour objectif d'éclairer les relations entre la microstructure des matériaux et leurs propriétés mécaniques en s'intéressant aux mécanismes élémentaires de déformation et de durcissement. C'est un domaine interdisciplinaire au carrefour de la mécanique et de la physique. En effet, le comportement mécanique d'un matériau, autrefois caractérisé et modélisé essentiellement à l'échelle macroscopique (l'échelle de l'objet, la pièce) l'est de plus en plus à des échelles multiples car il découle de mécanismes physiques se produisant à des échelles allant de l'échelle atomique (0.1 nm), jusqu'à l'échelle de la microstructure (0.1 mm). Bien comprendre ces mécanismes permet de modéliser de manière plus pertinente le comportement des matériaux et également de créer des matériaux nouveaux aux propriétés optimales pour une application donnée. On s'intéressera ici plus particulièrement aux cas des matériaux métalliques, polymères et des matériaux à longueur interne (matériaux nanostructurés, mousses métalliques ou os exemple).

### Applications

La science des matériaux est une culture à acquérir dès que l'on travaille dans le domaine de la tenue en service des matériaux, de leur transformation ou de leur fabrication, et plus particulièrement lorsque des comportements complexes (non-linéaires par exemple) sont rencontrés. Les applications les plus directes seront le choix de matériau dans les phases de dimensionnement, ou le choix de procédés de transformation pour un matériau donné afin d'obtenir les propriétés optimales pour une application donnée et enfin la conception de nouveaux matériaux pour des applications émergentes. Les secteurs industriels concernés sont très larges, transport, énergie, construction mais aussi électronique ou santé !

## Programme MAGIS



### Thèmes abordés

- Polymères : 3 premières séances
- Métaux : 4 séances suivantes
- Matériaux à longueur interne (métal et polymères) : 2 dernières séances
- 1 TP : numérique ou expérimental et une séance de restitution (30% de la note finale)

### Plan du cours

#### Séance 1 : Polymères, cours

Introduction générale aux macromolécules. Les grandes familles de matériaux polymères par structure et par technique de mise en œuvre. Leurs applications principales. Relations entre leurs microstructures et leurs propriétés mécaniques et optiques.

#### Séance 2 : Polymères, cours, TD

Equivalence temps-température, visco-élasticité et hyperélasticité, influence de la température sur le comportement mécanique des polymères - Exercice : Viscoélasticité – Equivalence Temps-température

#### Séance 3 : Polymères, cours et TD

Mécanismes de plasticité et de rupture des polymères ...- Etude de cas : observation des mécanismes d'endommagement : craquelures et bandes de cisaillement

#### Séance 4 : Métaux, cours et TD

Introduction générale sur le comportement des métaux. Contrainte: Plasticité cristalline : systèmes de glissement, cissons résolues, critère de plasticité du monocristal. Ecarts à la loi de Schmid dans les CC et HC. Cas du polycristal, rôle de la texture. Exercice: calcul de surface seuil du monocristal en traction-torsion selon l'orientation cristalline, sensibilisation aux effets de la texture cristalline

#### Séance 5 : Métaux, cours et TD

Dislocations: Paradoxe de Taylor et dislocations, vis, coin. Vecteur de Burgers. Champ de contrainte et de déformation autour d'une dislocation, énergie associée. Exercice: Interaction élastique entre deux dislocations selon leurs positions relatives et leur nature Vis/Coin. Conséquences pratiques ...

#### Séance 6 : Métaux, cours et TD

Durcissement : Mécanismes de durcissement, création et multiplication des dislocations (moulin de Franck et Read). Interaction dislocation solution solide, dislocation /précipités (contournement, cisaillement). Exercice : Description de la courbe d'érouissage du monocristal.

#### Séance 7 : Métaux, cours et TD

Vitesse de déformation : Cinématique de la déformation plastique cristalline : glissement simple et glissements multiples, mécanismes de déformations plastiques complémentaires, dislocations géométriquement nécessaires, montée, glissement dévié, maclage et autres. Exercice : Déformation Dissociation des dislocations, effets Suzuki, études de cas (microstructures alliages industriels / applications)

#### Séance 8 : Matériaux à longueur interne, cours

Matériaux nano-structurés et nano-objets. Loi d'évolution de la densité de dislocation avec la déformation plastique. Mise en évidence de l'effet de taille de grain sur les propriétés mécaniques des polycristaux: loi de Hall Petch et écart à cette loi pour les nano-cristallites

#### Séance 9 : Matériaux à longueur interne, TD et cours

Exercice: Dislocations géométriquement nécessaires et dislocation image pour expliquer les effet de surface dans les nano-objets. Déformation des mousses métalliques et micro-objets. Comment la structure interne et/ou externe d'un matériau modifie ses propriétés mécaniques, exemple des mousses d'aluminium et des interconnectes métalliques dans les microsystemes.

#### Séance 10 : Matériaux à longueur interne – démonstration




Simulation numérique de la dynamique des dislocations dans les matériaux à fort effet de confinement. / Simulation numérique du comportement d'un polycristal avec utilisation de loi de plasticité cristalline.

### Modèles de comportement et thermodynamique des solides

<https://pimm.artsetmetiers.fr/modeles-de-comportement-et-thermodynamique->

## Programme MAGIS



L'unité d'enseignement est obligatoire.   
Les cours sont dispensés en français.   
Les cours sont dispensés en anglais. 

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

3 ECTS / 10 séances de 3 heures  
Cours magistral : 10 séances de 1h30  
Travaux dirigés : 10 séances de 1h30  
Travaux pratiques numériques : 4h00

### Equipe pédagogique

Coord. **Rodrigue Desmorat** ([rodrigue.desmorat@ens-paris-saclay.fr](mailto:rodrigue.desmorat@ens-paris-saclay.fr), ENS Paris-Saclay)

René Billardon, [rene.billardon@safrangroup.com](mailto:rene.billardon@safrangroup.com)  
Rodrigue Desmorat, [rodrigue.desmorat@ens-paris-saclay.fr](mailto:rodrigue.desmorat@ens-paris-saclay.fr)  
Karine Lavernhe, [karine.lavernhe@ens-paris-saclay.fr](mailto:karine.lavernhe@ens-paris-saclay.fr)  
Martin Poncelet, [martin.poncelet@ens-paris-saclay.fr](mailto:martin.poncelet@ens-paris-saclay.fr)

### Objectifs

l'objectif final est de présenter dans le cadre de la thermodynamique des milieux continus à variables internes les principaux modèles utilisés pour décrire les grandes classes de comportement des matériaux sous sollicitations thermomécaniques, tout au long de leur cycle de vie.

### Applications

Le but est d'acquérir les connaissances permettant de choisir, d'identifier et éventuellement de développer, le modèle le mieux adapté pour décrire le comportement thermomécanique des matériaux solides lors de la simulation numérique des procédés de fabrication ou de la tenue en service des structures.

### Thèmes abordés

- Thermoélasticité (an)isotrope
- Thermodynamique des milieux continus à variables internes
- Modélisation des comportements thermo-élastoplastique et thermo-élastoviscoplastique
- Endommagement continu
- Thermodynamique de la rupture
- 1 TP numérique : Ecrouissages isotrope et cinématique, application au comportement d'une mini-structure

### Plan du cours

#### Séance 1

Cours 1 : Comportement thermo-élastique (an)isotrope et principes de la thermodynamique des milieux continus.

TD 1 : Viscoélasticité 1D avec variables internes.

#### Séance 2

Cours 2 : Comportement viscoélastique linéaire et non linéaire : phénoménologie, mécanismes, modélisation, identification.

TD 2 : Elasticité anisotrope.

#### Séance 3

Cours 3 : Thermodynamique des milieux continus à variables internes.

TD 3 : Viscoélasticité 3D (formulation à variables internes vs. formulation fonctionnelle).

## Programme MAGIS



### Séance 4

Cours 4 : Comportement thermo-élastoplastique : phénoménologie, mécanismes, modélisation (1ère partie).

TD 4 : Critères de plasticité.

### Séance 5

Cours 5 : Comportement thermo-élastoplastique : modélisation (2ème partie).

TD 5 : Elastoplasticité 1D.

### Séance 6

Cours 6 : Comportement thermo-élastoplastique : modélisation, thermodynamique (3ème partie).

TD 6 : Elasto-viscoplasticité 1D.

### Séance 7

Cours 7 : Comportement thermo-élastoviscoplastique : phénoménologie, mécanismes, modélisation, identification.

TD 7 : Elastoplasticité sous chargement non-proportionnel.

### Séance 8

Cours 8 : Concept d'endommagement continu.

TD 8 : Opérateur tangent.

### Séance 9

Cours 9 : Thermodynamique de la rupture.

TD 9 : Endommagement 1D.

### Séance 10

Cours 10 : Introduction aux milieux poreux.

TD 10 : Introduction aux milieux poreux.

### Evaluation

Examen écrit.

### Méthodes numériques pour mécanique des milieux continus

<https://pimm.artsetmetiers.fr/methodes-numeriques-pour-mecanique-des-milieux-continus>

L'unité d'enseignement est obligatoire. 

Les cours sont dispensés en français. 

Les cours sont dispensés en anglais. 

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

3 ECTS / 10 séances de 3 heures

Cours magistral : 10 séances de 1h

Travaux dirigés : 4 séances de 2h

Travaux pratiques : 6 séances de 2h

### Equipe pédagogique

Coord. **Andrea Barbarulo** ([andrea.barbarulo@centralesupelec.fr](mailto:andrea.barbarulo@centralesupelec.fr), CentraleSupélec)

Guillaume Puel ([guillaume.puel@centralesupelec.fr](mailto:guillaume.puel@centralesupelec.fr), CentraleSupélec)

### Objectifs

Cette unité d'enseignement porte sur les méthodes de numériques en calcul des structures et mécaniques des matériaux. Le cours est divisé en deux grandes parties : (i) Calcul des structures en non-linéaire, (ii) formulation et mise en pratique des lois de comportements complexes dans les codes de calcul des structures. Les objectifs du cours sont donc (i) de fournir aux élèves les bases nécessaires pour réaliser et maîtriser les calculs de structures (principalement en employant la méthode des éléments finis) et (ii) de pouvoir implanter dans un code de calcul une loi de comportement.

## Programme MAGIS



### Applications

Le cours est dédié au métiers d'ingénieur de conception, recherche et développement pour des industries variées aéronautique, transport, constructions, électronique, ..., utilisant et fabriquant des matériaux complexes à des échelles micro et macroscopiques.

Le recours au calcul de structures pour évaluer les champs de contraintes, déformations, endommagement... est désormais très fréquent. Longtemps cantonné à des calculs en élasticité linéaire, le calcul des structures est de plus en plus employé pour dimensionner des structures dans des cas non linéaires complexes (plasticité, viscoplasticité, endommagement, grandes déformations, contact...). Le cours est destiné à donner aux étudiants des outils pour pouvoir répondre efficacement à ces questions précises.

### Plan du cours

#### Séance 1 : Rappel de la méthodes des éléments finis (CM + TD)

Equations de l'équilibre d'un solide élastique. Principe des puissances virtuelles, formulation faible de l'équilibre. Principes de minimum, formulation variationnelle de l'équilibre.

#### Séance 2 : Méthode des éléments finis en élasticité linéaire (CM + TP)

Construction du problème d'élasticité. Le système d'équations discret et sa résolution numérique. Cas statique dynamique. Conditions aux limites et calcul des réactions. Calcul numérique des facteurs d'intensité de contraintes. Calcul numérique du taux de restitution d'énergie.

#### Séance 3 : Calcul de solides à comportement non-linéaire (CM + TD)

Rappels sur les grandes déformations. Équations non linéaires : algorithmes itératifs de type Newton.

#### Séance 4 : Calcul de solides à comportement non-linéaire (CM + TD)

Rappels sur le comportement élastoplastique. Équations non linéaires : algorithmes itératifs de type Newton.

#### Séance 5 : Calcul de solides élastoplastiques : aspects locaux (CM + TP)

Calcul d'une structure élastoplastique : position du problème. Intégration locale du comportement élastoplastique. Exemple.

#### Séance 6 : Calcul de solides élastoplastiques : algorithme d'intégration d'une loi de comportement (CM+TP)

#### Séance 7 : Calcul de solides élastoplastiques : identification des loi de comportement (CM + TP)

Essais disponibles. Problème à résoudre et techniques de résolution. Calculs de sensibilités.

#### Séance 8 et 9 : Exercices de programmation (TP)

#### Séance 10 : Examen

### Evaluation :

Examen écrit + Contrôle continu – devoirs, projets numériques.

### Logiciels :

Castem, Zebulon, Calculix, Abaqus / Scilab, Matlab, Mathematica

### Techniques expérimentales avancées

<https://pimm.artsetmetiers.fr/techniques-experimentales-avancees>

L'unité d'enseignement est obligatoire. ✓

Les cours sont dispensés en français. 🇫🇷

Les cours sont dispensés en anglais. 🇬🇧

Coordinateur : Hubert Olivier

[olivier.hubert@ens-paris-saclay.fr](mailto:olivier.hubert@ens-paris-saclay.fr)

### Equipe pédagogique :

Hubert, Olivier, Professeur des Universités, CNU 60, ENS Paris-Saclay

[olivier.hubert@ens-paris-saclay.fr](mailto:olivier.hubert@ens-paris-saclay.fr)



## Programme MAGIS



Poncelet, Martin, Maître de conférences, CNU 60, ENS Paris-Saclay

[martin.poncelet@ens-paris-saclay.fr](mailto:martin.poncelet@ens-paris-saclay.fr)

Roux, Stéphane, DR CNRS, INSIS, ENS Paris-Saclay

[stephane.roux@ens-paris-saclay.fr](mailto:stephane.roux@ens-paris-saclay.fr)

Hild, François, DR CNRS, INSIS, ENS Paris-Saclay

[francois.hild@ens-paris-saclay.fr](mailto:francois.hild@ens-paris-saclay.fr)

Castelnau, Olivier, DR CNRS, INSIS, ENSAM

[olivier.castelnau@ensam.eu](mailto:olivier.castelnau@ensam.eu)

Morgeneyer, Thilo, Maître de recherches, Mines de Paris

[thilo.morgeneyer@mines-paristech.fr](mailto:thilo.morgeneyer@mines-paristech.fr)

Richaud, Emmanuel, Professeur des Universités, CNU 60, ENSAM

[emmanuel.richaud@ensam.eu](mailto:emmanuel.richaud@ensam.eu)

Gandiolle, Camille, Maître de conférences, CNU 60, Centralesupelec

[camille.gandiolle@centralesupelec.fr](mailto:camille.gandiolle@centralesupelec.fr)

Roland, Sébastien, Maître de conférences, CNU 60, ENSAM

[Sebastien.ROLAND@ensam.eu](mailto:Sebastien.ROLAND@ensam.eu)

Gorny, Cyrille, Ingénieur, ENSAM

[cyril.gorny@ensam.eu](mailto:cyril.gorny@ensam.eu)

Auger, Thierry, CR CNRS, INSIS, ENSAM

[Thierry.AUGER@ensam.eu](mailto:Thierry.AUGER@ensam.eu)

### Déroulement et organisation pratique :

Cours: Essais mécaniques pour l'étude du comportement mécanique des matériaux (machine, PID) Mesure et capteurs (principe de mesure, conditionnement, numérisation) Plans d'expérience Mesure de champs – corrélation d'images numériques 2D/3D Méthodes numériques – identification de champs de propriétés Techniques d'analyse de la microstructure des matériaux (microscopie, diffraction des rayons X)

TPs: traction (élasticité, plasticité), thermomécanique, endommagement; traitements thermiques; corrélation d'images; ATD/DSC; fabrication additive; analyses métallurgiques, microscopie optique/MEB/MET; diffraction des électrons.

### Objectifs pédagogiques visés :

#### Contenu :

La résolution d'un problème mécanique des matériaux nécessite souvent la connaissance précise des lois de comportement, ou plus généralement des propriétés de la matière. Les modes de sollicitation et/ou les techniques de mesures dépendent des propriétés recherchées. Elles conditionnent aussi bien la machine, l'éprouvette, la (ou les) technique(s) de mesure(s), tout comme les algorithmes d'identification ou encore les techniques de caractérisation microstructurale à mettre en jeu. Ce cours se propose à la fois d'apporter aux étudiants une connaissance des outils de caractérisation "classiques" d'un laboratoire d'essais, et de les familiariser aux méthodes d'identification modernes du comportement des matériaux à travers les mesures de champs (en particulier cinématique), 1D, 2D, 3D et 4D. L'accent sera mis spécialement sur les travaux pratiques, dont la réalisation, l'analyse des résultats et la rédaction feront l'objet d'une évaluation par les enseignants du module. Un examen permettra d'apprécier la culture acquise dans le domaine des techniques expérimentales par l'étudiant au cours du semestre.

#### Compétences :

Acquérir les connaissances et compétences techniques associés à des outils classiques et modernes de mesure du comportement au sens large des matériaux

#### Compétences complémentaires :

Corrélation d'images numériques, microscopie (optique, MEB), diffraction des rayons X.

## Programme MAGIS



Apprentissage de l'ensemble (analyse, rédaction et synthèse), indispensable à la formation des chercheurs et des cadres de haut niveau.

### Prérequis :

Mécanique des milieux continus, élasticité, thermique, métallurgie (bases).

### **[Projet de recherche et cours de langue étrangère - 6 ECTS](https://pimm.artsetmetiers.fr/projet-de-recherche-et-cours-de-langue-etrangere-6-ects)** **<https://pimm.artsetmetiers.fr/projet-de-recherche-et-cours-de-langue-etrangere-6-ects>**

### **Projet de recherche**

**<https://pimm.artsetmetiers.fr/projet-de-recherche>**

**L'unité d'enseignement est obligatoire.** 

**Les cours sont dispensés en français.** 

**Les cours sont dispensés en anglais.** 

### **Descriptif de l'Unité d'Enseignement**

3 ECTS / 30h

Cours magistral : 9h00

Travaux pratiques : 21h00

### **Equipe pédagogique**

Coord. **Xavier Colin** ([xavier.colin@ensam.eu](mailto:xavier.colin@ensam.eu), ENSAM Paris)

### **Objectifs du projet de recherche**

L'objectif de cette unité d'enseignement est de vous préparer à conduire un projet de recherche.

Sauf exceptions, le projet de recherche que vous allez mener dans le cadre de ce module est une préparation du stage de recherche. Si votre projet a été bien conduit, au début du stage, vous avez déjà fait l'étude bibliographique, les commandes de matière ou de matériel sont lancées ou peuvent être lancées dans les premiers jours du stage etc...

Le stage vous permet de mener l'étude qui a été préparée dans le cadre de ce projet.

Les apprentissages vus au cours de ce module comprennent plusieurs volets. D'abord un apprentissage des méthodes de gestion de projet qui seront ensuite mises en application au cours du stage. Vous aurez également une formation à la recherche bibliographique et sur la rédaction d'une revue bibliographique. Puis vous serez amenés à faire l'état des lieux des connaissances sur le sujet de votre projet au travers d'une étude bibliographique poussée. Il s'agira de définir qu'elles sont les motivations de ce projet (pourquoi on s'intéresse à ce problème, à quoi cela peut servir dans la pratique), puis de préciser le contexte scientifique (ce que les autres chercheurs ont fait sur le sujet, et dans ce qui a déjà été fait, ce sur quoi on peut s'appuyer, ce qui reste à faire évoluer et ce qui est éventuellement faux ou très insuffisant). Ensuite vous aurez à définir la démarche que vous emploierez pour avancer sur le problème scientifique qui vous est posé et la manière dont vous vous organiserez au cours de votre stage pour mettre en œuvre cette démarche. Ce sera l'occasion de mettre en application les cours de gestion de projet qu'on vous aura délivrés. Vous transmettez cette étude pré-

## Programme MAGIS



paratoire au stage de recherche sous forme d'un rapport écrit et d'une séance de posters. Enfin, au cours de ce projet, vous pourrez également réaliser des expériences et/ou simulations numériques préliminaires. Pour votre projet, un enseignant-chercheur "encadrant" vous aidera. Un autre enseignant-chercheur "rapporteur" évaluera votre travail.

### Modalités d'évaluation du Projet de recherche

La note du projet sera calculée à partir de deux notes. La note attribuée par le rapporteur du projet au rapport écrit (voir le rapporteur attribué à votre projet sur la fiche projet) et la note attribuée à la soutenance orale (séance poster). Le rapport écrit doit être envoyé au rapporteur 15 jours avant la soutenance orale.

Par ailleurs, vous devrez rédiger une synthèse de votre travail sur une page recto dans une langue étrangère, à savoir anglais pour les étudiants francophones et anglais pour les étudiants anglophones. Ce travail permet d'évaluer votre esprit de synthèse et votre capacité à rédiger dans la langue étrangère. Finalement, vous devrez également rédiger un plan de management de votre projet. Ce travail permet d'évaluer votre capacité à planifier un projet, à prendre du recul par rapport aux problèmes purement scientifiques, de réfléchir aux besoins humains et techniques nécessaires à la réalisation du projet, à poser des jalons pour être sûr d'atteindre les objectifs du projet dans le délai demandé.

### Communication scientifique en langue étrangère

<https://pimm.artsetmetiers.fr/communication-scientifique-en-langue-etrangere>

L'unité d'enseignement est obligatoire. 

Les cours sont dispensés en français. 

Les cours sont dispensés en anglais. 

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

3 ECTS

Travaux dirigés : 30h00

### Equipe pédagogique

Coord. **Arnaud Jérôme** ([arnaud.jerome@ensam.eu](mailto:arnaud.jerome@ensam.eu), ENSAM Paris)

**Julia Camarero** ([julia.camarero@ensam.eu](mailto:julia.camarero@ensam.eu), ENSAM Paris)

### Objectifs

Un étudiant qui suit une formation par la recherche doit nécessairement maîtriser l'anglais pour pouvoir lire et comprendre les publications scientifiques mais aussi présenter ses travaux lors de congrès ou dans des journaux scientifiques.

Des cours d'anglais sont dispensés pour les étudiants francophones et non anglophones dans les différents établissements partenaires du master. L'anglais est la langue de communication des sciences. Les objectifs des cours sont adaptés aux niveaux des étudiants. Le niveau de langue visé varie entre B2 et C2.

Des cours de français sont proposés aux étudiants anglophones et non-francophones. Les objectifs des cours sont adaptés aux niveaux des étudiants. Le niveau de langue visé varie entre A2 et B2.

### Modalités d'évaluation du Projet de recherche

La note finale de ce module est issue de trois notes :

## Programme MAGIS



- Une première note donnée par le professeur de langue étrangère sur le niveau de l'élève à l'oral et à l'écrit.
- Une deuxième note donnée par le rapporteur de votre projet de recherche à la suite de sa lecture de la synthèse en langue étrangère
- Une troisième note donnée suite à l'évaluation des connaissances en gestion de projet. Cette évaluation est sous forme de QCMs. Trois QCMs sont à remplir par les étudiants.

Par ailleurs, si les étudiants ont obtenu une note minimale de 100 sur 300 à l'issue des trois QCM, ils peuvent demander à passer la Certification à la gestion de projet (CAMIP) proposée par Arts et Métiers ParisTech et qui qualifie les capacités de l'étudiant à bien gérer son projet.

### Cours d'itinéraire et d'option – 12 ECTS

<https://pimm.artsetmetiers.fr/cours-ditineraire-et-dooption-12-ects>

### Cours d'itinéraire

Ces cours sont obligatoires

#### Itinéraire 1 – « Endommagement et rupture des matériaux et structures »

<https://pimm.artsetmetiers.fr/itineraire-1-endommagement-et-rupture-des-materiaux-et-structures>

Coord. **Thilo Morgeneyer** ([thilo.morgeneyer@mines-paristech.fr](mailto:thilo.morgeneyer@mines-paristech.fr), Mines ParisTech)

#### Mécanique de la rupture

<https://pimm.artsetmetiers.fr/mecanique-de-la-rupture>

L'unité d'enseignement est obligatoire. ✓

Les cours sont dispensés en anglais. 🇬🇧

#### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

3 ECTS / 30 h / 10 séances de 3 heures

Cours magistral : 15 h

Travaux dirigés : 3 h

Travaux pratiques : 6 h

Conférences : 6 h

#### Equipe pédagogique

Coord. **Thilo Morgeneyer** ([thilo.morgeneyer@mines-paristech.fr](mailto:thilo.morgeneyer@mines-paristech.fr), Mines ParisTech)

#### Objectifs

Cette unité d'enseignement porte sur l'intégrité des structures fondée sur la mécanique de la rupture et qui a pour but de prévoir la fiabilité, la durée de vie et la sécurité de composants industriels de dimensions, géométries ou matériaux variés. Nous avons pour objectif de présenter et de pratiquer les démarches modernes et efficaces de dimensionnement en présence de fissures selon le mode de fissuration envisagé.

### Applications

La mécanique de la rupture est appliquée dans l'industrie lorsque la rupture potentielle d'un composant peut avoir des conséquences catastrophiques (perte de vies humaines, dégâts écologiques importants etc..). C'est le cas des transports aéronautiques ou ferroviaires, de la production d'énergie et en particulier nucléaire et enfin des industries de la fabrication, du transport ou du recyclage de divers produits actifs ou toxiques (industrie pétrolière, chimique, etc...). Dans ces secteurs industriels, le risque de rupture n'est pas acceptable, il faut donc supposer a priori qu'un défaut peut exister, même si c'est très improbable, et prévoir à quelles conditions ce défaut ne pourra pas être à l'origine d'une rupture catastrophique.

### Thèmes abordés

Mécanique linéaire de la rupture, mode I et modes mixtes  
Mécanique non linéaire de la rupture  
Mécanismes de rupture : ductile, fragile, fatigue et modèles  
Travaux pratiques numériques: Calcul de K, J, T ...

- Travaux pratiques expérimentaux: observations des mécanismes principaux en MEB, mesure de ténacité mode I, et modes mixtes
- Fatigue of Materials, S. Suresh , Cambridge University Press, (1998)

### Plan du cours

#### Séance 1 : Eléments de mécanique linéaire de la rupture

Introduction, Théorie de Griffith, Existence de singularités en élasticité, développement asymptotique, mécanique linéaire de la rupture (KI, KII, KIII, T)

#### Séance 2 : Exercices, application des concepts de la MLER

Analyse d'un essai de traction sur éprouvette pré-fissurée, détermination de KIC. Application sur une structure (expertise d'un accident réel).

#### Séance 3 : TP numérique, comment calculer numériquement les FIC

Détermination de KI, KII et T. Lissage des contraintes, des déplacements, intégrale J, intégrale d'interaction. Deux modèles seront utilisés, correspondant aux éprouvettes testées lors des TP expérimentaux.

#### Séance 4 : Mécanique linéaire de la rupture, problèmes tridimensionnels (géométrie et chargement)

Fissuration en mode mixte I, II, III. Critères de bifurcation en MLER. Rôle des termes non-singuliers sur la stabilité du plan de fissuration. Fissures tridimensionnelles à fronts courbes, Singularités de bord (intersection d'un front de fissure tridimensionnel avec la surface libre de la pièce), singularité d'interface.

#### Séance 5 : Eléments de mécanique non-linéaire de la rupture

Comment la plasticité modifie les conditions de chargement de la région en pointe de fissure. Mécanismes et modèles à l'échelle micro (seuil d'émission de dislocation, écrantage par la présence de dislocations), puis à l'échelle macro (zones plastiques d'Irwin, intégrale J et champs HRR)

#### Séance 6 : TP expérimental

Observation en microscopie électronique à balayage de faciès de rupture typiques, rupture ductile, fragile et par fatigue. Mesure de ténacité à l'initiation et à l'arrêt, en mode I et en mode mixte sur des éprouvettes dont la géométrie a été calculée lors du TP numérique.

#### Séance 7 : Fissuration par fatigue en mode I

Fissuration par fatigue en mode I. Loi de Paris et ses trois domaines, mécanismes de fissuration associés. Cas d'application, prévision de la durée de vie d'un composant ferroviaire. Cas des chargements variables, effet de la plasticité sur la fissuration et méthodes pour la prévision de la vitesse de fissuration.

#### Séance 8 : Fissuration par fatigue en modes mixtes

Fissuration par fatigue en modes mixtes. Exemples en torsion ou fatigue de roulement . Effet du frottement sur la fissuration et difficultés expérimentales associées. Mécanismes physiques de propagation en cisaillement plan ou antiplan.

#### Séance 9 : Nouveaux outils et concepts pour la prévision de la fissuration tridimensionnelle

## Programme MAGIS



### ductile ou fragile

Approche locale et effets de la taille des éléments pour la simulation de la rupture ductile et par fatigue. Level-sets et X-FEM. Zones cohésives.

### Séance 10 : Conférence industrielle - la rupture ductile

Rupture ductile et méthodes de dimensionnement des composants industriels. Approches locale et globales de la rupture ductile.

## Endommagement et rupture des polymères et composites

<https://pimm.artsetmetiers.fr/endommagement-et-rupture-des-polymeres-et-composites>

L'unité d'enseignement est obligatoire.

Les cours sont dispensés en anglais

### Outline

3 ECTS / 30 h

### Team

Coordinator : **Federica Daghia** ([federica.daghia@ens-paris-saclay.fr](mailto:federica.daghia@ens-paris-saclay.fr), ENS Paris-Saclay)

Instructors :

**Lucien Laiarinandrasana** ([lucien.laiarinandrasana@mines-paristech.fr](mailto:lucien.laiarinandrasana@mines-paristech.fr), Mines ParisTech)

**Sebastien Joannes** ([sebastien.joannes@mines-paristech.fr](mailto:sebastien.joannes@mines-paristech.fr), Mines ParisTech)

**Federica Daghia** ([federica.daghia@ens-paris-saclay.fr](mailto:federica.daghia@ens-paris-saclay.fr), ENS Paris-Saclay)

**Cristian Ovalle Rodas** ([cristian.ovalle\\_rodas@mines-paristech.fr](mailto:cristian.ovalle_rodas@mines-paristech.fr), Mines Paris-Tech)

### Objectives

The aim of the course is to discover the damage and fracture mechanisms of polymers and polymer matrix composites at different scales, and to learn about the appropriate modelling approaches. Specific aspects developed in the course include the extension of fracture mechanics concepts to large and viscoplastic deformations, statistical approaches for fibres' characterization, the damage mesomodel for laminated composites, thermo-mechanical aspects and ageing of elastomers.

### Targets

Polymers and polymer matrix composites occupy an increasing part of the market in different industrial applications, especially in the transportation industry. It is therefore important to understand, and to be able to predict, the degradation and failure of these materials. Due to their specificities (large deformations and viscosity for polymers, complex and hierarchical microstructure for composites), the study of these materials require specific tools, both from the point of view of characterization and of the appropriate modelling approaches, which often involve different scales of observation and scale transition techniques.

### Topics

- Polymers : extension of classical fracture mechanics concepts to polymers (large deformations, viscosity), deformation and damage mechanisms in link with their microstructure.
- Polymer matrix composites : damage and fracture at different scales - fibre/matrix, ply/interface, laminate.

## Programme MAGIS



- Rubbers : damage and fracture behaviour under monotonic and fatigue loading, including thermal considerations.

### Content

Each session lasts 3 hours, it can include classical course as well as exercise sessions.

#### Session 1 (Lucien Laiarinandrasana)

Fracture mechanics applied to polymers: limitations of linear elastic fracture mechanics due to large transformations, viscoelastic and viscoplastic behaviour and non-linearities.

#### Session 2 (Lucien Laiarinandrasana)

Deformation and damage mechanisms in polymers classes in link with their microstructure observed by fractography and 3D observations.

#### Session 3 (Lucien Laiarinandrasana)

Fracture mechanics concepts for polymers: essential work of fracture and effects of viscosity.

#### Sessions 4 (Sebastien Joannes)

Characterization of single fibres: failure mechanisms at the fibre's scale, statistical aspects, multi-scale models.

#### Sessions 5 (Sebastien Joannes)

The unidirectional ply with continuous aligned fibres: anisotropy, symmetry classes, failure mechanisms in the fibres and transverse directions.

#### Session 6 (Federica Daghia)

Notions on laminated composites: stacking sequence, modelling of the overall behaviour, couplings (normal/shear, membrane/bending).

#### Session 7 (Federica Daghia)

Damage mechanisms at the ply's and at the laminate's scale: load redistribution and final failure, multiple cracking, delamination.

#### Session 8 (Federica Daghia)

The damage mesomodel for laminates: ply and interface models, illustrations.

#### Session 9 (Cristian Ovalle Rodas)

Mechanical behaviour of elastomers: hyperelasticity. Influence of the manufacturing process.

#### Session 10 (Cristian Ovalle Rodas)

Fatigue behaviour of elastomers: Wohler's curves, damage initiation mechanisms, thermomechanical and ageing aspects.

### Mécanique de l'endommagement

<https://pimm.artsetmetiers.fr/mecanique-de-lendommagement>

L'unité d'enseignement est obligatoire. 

Les cours sont dispensés en anglais. 

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

3 ECTS / 30 h

Cours magistral: 15 h

Travaux dirigés : 15 h

Travaux pratiques : 0 h

### Equipe pédagogique

Coord. **Rodrigue Desmorat** ([rodrigue.desmorat@ens-paris-saclay.fr](mailto:rodrigue.desmorat@ens-paris-saclay.fr), ENS Paris-Saclay)

### Objectifs

Le cours a pour objectif de donner un état de l'art sur les mécanismes d'endommagement des différents matériaux (métaux et alliages, béton et verres, composites, élastomères) et les différentes

applications (e.g. rupture sous des conditions de chargement monotones, fatigue, dynamique). Le cours vise également à donner les concepts de base de l'implantation numérique de lois de comportement avec endommagement.

### Applications

Ce cours de modélisation avancée prépare les ingénieurs et les jeunes chercheurs aux nouvelles méthodes de dimensionnement basées sur le concept de la mécanique de l'endommagement. Les secteurs d'applications sont l'aéronautique et l'aérospatiale, l'énergie, l'automobile et le génie civil.

### Plan du cours

- A - Description probabiliste
  1. Description probabiliste de la dégradation et de la ruine des matériaux fragiles et quasi-fragiles.
  2. Analyse de la transition entre fragmentation simple et fragmentation multiple.
  3. Introduction au processus de Poisson. Modèle de Weibull.
- B - Modèles phénoménologiques dans le cadre de la thermodynamique
  1. Modèle d'endommagement de Marigo et Mazars.
  2. Modèle d'endommagement de type Lemaître : concept de contrainte efficace, seuil d'énergie stockée pour l'endommagement, loi d'évolution de l'endommagement, isotropie/anisotropie induite (tenseurs d'endommagement).
  3. Comportement différent en traction et compression.
  4. Effet de fermeture des micro-défauts ou conditions quasi-unilatérales.
  5. Cadre général de la thermodynamique pour les hysteresis, la fatigue et l'endommagement.
- C - Les modèles de type Gurson
  1. Modèle GTN pour la rupture ductile.
  2. Modèle unifié de Gurson-Rousselier-Lemaitre par une approche thermodynamique
- D - Localisation et instabilités
  1. Analyse des bifurcations. Analyse des perturbations. Régularisation et modèles non locaux.

### Examen écrit

**Itinéraire 2 – « Mise en forme des métaux et fabrication additive »**  
<https://pimm.artsetmetiers.fr/itineraire-2-mise-en-forme-des-metaux-et-fabrication-additive>

Coord. **Morgan Dal** ([morgan.dal@ensam.eu](mailto:morgan.dal@ensam.eu), ENSAM Paris)

**Fabrication additive des métaux**

<https://pimm.artsetmetiers.fr/fabrication-additive-des-metaux>



## Programme MAGIS



L'unité d'enseignement est obligatoire.   
Les cours sont dispensés en 

Coord. **Morgan Dal** ([morgan.dal@ensam.eu](mailto:morgan.dal@ensam.eu), ENSAM Paris)

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

3 ECTS / 30 h

#### Equipe pédagogique

Morgan Dal ([morgan.dal@ensam.eu](mailto:morgan.dal@ensam.eu), ENSAM Paris)

Yves Bienvenu ([yves.bienvenu@mines-paristech.fr](mailto:yves.bienvenu@mines-paristech.fr), Mines ParisTech)

Michel Bellet ([michel.bellet@mines-paristech.fr](mailto:michel.bellet@mines-paristech.fr), Mines ParisTech)

Véronique Favier ([veronique.favier@ensam.eu](mailto:veronique.favier@ensam.eu), ENSAM Paris)

Vincent Guipont ([vincent.guipont@mines-paristech.fr](mailto:vincent.guipont@mines-paristech.fr), Mines ParisTech)

#### Objectifs

L'objectif de ce cours est de donner des connaissances solides, aux étudiants et aux professionnels, sur les procédés de transformation à l'état « fluide » (liquide, semi-liquide et poudres), la microstructure des métaux et les mécanismes se produisant lors de ces procédés de transformation couplant des effets mécaniques et thermiques en vue (1) de mieux modéliser et simuler ces procédés de transformation et (2) de prévoir les performances mécaniques des matériaux et pièces lors de leur utilisation.

#### Applications

Ce cours est dédié à tous les procédés de transformation à l'état « fluide » tels que les procédés de fonderie (moulage en sable, coulée sous pression ...), métallurgie des poudres (compaction à froid, frittage, metal injection moulding ...), procédés sans contact outil/matière par faisceaux de hautes énergies (procédés laser, procédés par projection thermique, ...). Les connaissances acquises pourront être directement mises en application pour une meilleure maîtrise et l'optimisation de ces procédés dans une démarche intégrée « produit-process ». Les secteurs industriels concernés sont tous ceux utilisant les procédés de transformation et préoccupés de la conséquence de ces procédés sur les propriétés d'emploi des pièces : aéronautique, transport, nucléaire, énergie, biomédical, industries mécaniques, électroménager, outillages portatifs...

#### Thèmes abordés

- Solidification des métaux et alliages et comportement en mise en forme : 3 séances CM
- Applications aux procédés « sans contact » avec ou sans apport de matière 5 séances CM
- Température et flux thermique dans les procédés à l'état « fluide » : 2 séances CM

#### Plan du cours

##### Séance 1 :

Thermodynamique – Diagramme de phase – Cinétique de la solidification – Microségrégation – Microstructure de solidification – défauts

##### Séance 2 :

Solidification rapide et autres types de solidification (structure ultrafine, structure amorphe, défauts, cas des polymères ...)

##### Séance 3 :

Description du comportement du liquide vers le solide .

##### Séance 4 :

Procédés par projection thermique – Présentation de la technologie et de la mise en œuvre.

## Programme MAGIS



Séance 5 :

Procédés par projection thermique – Propriétés des revêtements.

Séance 6 :

Procédés laser – Présentation des différents procédés (processus physiques, régimes d'interaction, thermique).

Séance 7 :

Procédés laser – Microstructure, défauts et propriétés induites 3h (PP) Métallurgie des poudres.

Séance 8 :

Présentation de la technologie et de la mise en œuvre des procédés - Microstructure et propriétés induites.

Séance 9 :

Description des phénomènes thermiques– modélisation des sources de chaleur –Modélisation des échanges thermiques (surface de contact et transfert).

Séance 10 :

Encore à discuter ...suite du CM9 et/ou mesures expérimentales et techniques d'identification ?

### Mise en forme par déformation plastique

<https://pimm.artsetmetiers.fr/mise-en-forme-par-deformation-plastique>

L'unité d'enseignement est obligatoire. 

Les cours sont dispensés en

Coord. **Franck Morel** ([franck.morel@ensam.eu](mailto:franck.morel@ensam.eu), ENSAM Angers)

#### Descriptif de l'unité d'enseignement [Mise en forme par déformation plastique](#)

3 ECTS / 30 h

Courses : 10 sessions de 3h

Exercices : Aucun

Practice : Aucun

#### Equipe pédagogique

**Franck Morel** ([franck.morel@ensam.eu](mailto:franck.morel@ensam.eu), ENSAM Angers)

Charles Mareau ([charles.mareau@ensam.eu](mailto:charles.mareau@ensam.eu), ENSAM Angers)

Charbel Moussa ([charbel.moussa@mines-paristech.fr](mailto:charbel.moussa@mines-paristech.fr), Mines ParisTech)

Ivan Iordanoff ([ivan.iordanoff@ensam.eu](mailto:ivan.iordanoff@ensam.eu), ENSAM Bordeaux)

Rodrigue Desmorat ([rodrigue.desmorat@ens-paris-saclay.fr](mailto:rodrigue.desmorat@ens-paris-saclay.fr), ENS Paris-Saclay)

Thierry Palin-Luc ([thierry.palin-luc@ensam.eu](mailto:thierry.palin-luc@ensam.eu), ENSAM Bordeaux)

#### Objectif

L'objectif de ce cours est de donner des connaissances solides, aux étudiants et aux professionnels, sur la microstructure des métaux et les mécanismes se produisant lors de procédés de transformation de la matière à l'état solide couplant des effets mécaniques et thermiques en vue (1) de mieux modéliser et simuler ces procédés de transformation et (2) de prévoir les performances mécaniques des matériaux et pièces lors de leur utilisation.

## Applications

Ce cours est dédié à tous les procédés de transformation à l'état solide tels que la mise en forme des tôles (laminage, emboutissage, découpage...), la mise en forme des pièces massives (forgeage, filage, étirage, ...) et les procédés d'enlèvement de matière. Les connaissances acquises pourront être directement mises en application pour l'optimisation de ces procédés dans une démarche intégrée « produit-process ». Les secteurs industriels concernés sont tous ceux utilisant les procédés de transformation et préoccupés de la conséquence de ces procédés sur les propriétés d'emploi des pièces : aéronautique, transport, nucléaire, santé, emballage, construction, électro-ménager...

## Thèmes abordés

- Transformation structurale à l'état « solide » et comportement en mise en forme: séances 1 à 4.
- Tribologie : séances 5 à 6.
- Rôle des contraintes résiduelles et des hétérogénéités microstructurales sur les propriétés d'usage : séances 7 à 10.

## Plan du cours

### Séance 1 :

Transformation de phase et précipitation (JLL).

### Séance 2 :

Restauration et recristallisation (YC).

### Séance 3 :

Texture et structure de dislocation lors de la déformation à froid et à chaud (YC)

### Séance 4 :

Lois de comportement thermo-élasto(visco)plastique pour les hautes températures, les grandes vitesses de déformations et les grandes déformations (RD): Lois de Johnson-Cook, Norton-Hoff, thermiquement activées – Notion d'endommagement associé – Extension du formalisme aux grandes transformations dans le cas de matériaux élasto(visco)plastiques.

### Séance 5 :

La notion de frottement, le modèle de Blok et ses dérivés, les modèles d'usure - Les mises en évidence expérimentales des contradictions inhérentes à ces modèles.

### Séance 6 :

Description du contact à 3 corps et mise en évidence des flux de matières et des flux thermiques en s'appuyant sur un modèle simplifié de type éléments discrets - Proposition d'une démarche couplant expérimentale et numérique pour l'établissement de lois de comportement, exemples de moyens expérimentaux adaptés aux sollicitations dans le cadre des procédés, exemple de modèle DEM/FEM locaux.

### Séance 7 :

Origine des contraintes résiduelles et calculs dans un cas simple de mise en forme – Contraintes résiduelles après mise en forme et traitements thermiques – Les différentes techniques d'analyse des contraintes résiduelles (JLL).

### Séance 8 :

Influence des contraintes résiduelles et des hétérogénéités microstructurales sur la déformation, sur la résistance statique, sur la résistance chimique, sur les propriétés physiques (JLL).

### Séance 9 :

Intégrité des matériaux et tenue en fatigue (FM): Rappel sur les critères d'endurance en fatigue - Effet de l'état de surface, des contraintes résiduelles et des hétérogénéités microstructurales.

### Séance 10 :

Exemples de différents procédés (usinage, forgeage, fonderie, traitements superficiels ...) et des effets associés en fatigue (FM).

## Evalutation :

Examen écrit.

## Programme MAGIS



Simulation numérique des procédés des métaux

<https://pimm.artsetmetiers.fr/simulation-numerique-des-procedes-des-metaux>

 L'unité d'enseignement est obligatoire.   
Les cours sont dispensés en français

Coord. Etienne Pessard ([etienne.pessard@ensam.eu](mailto:etienne.pessard@ensam.eu), ENSAM Angers)

### Equipe Pédagogique

Yessine. Ayed, Ensam Angers

[Yessine.AYED@ensam.eu](mailto:Yessine.AYED@ensam.eu)

Amine. Ammar, Ensam Angers

[Amine.AMMAR@ensam.eu](mailto:Amine.AMMAR@ensam.eu)

Julien Artozoul, Ensam Angers

[Julien.ARTOZOUL@ensam.eu](mailto:Julien.ARTOZOUL@ensam.eu)

Idriss Tiba, Ensam Angers

[Idriss.TIBA@ensam.eu](mailto:Idriss.TIBA@ensam.eu)

Aude Caillaud, Ensam Angers

[aude.caillaud@ensam.eu](mailto:aude.caillaud@ensam.eu)

Etienne Pessard, Ensam Angers

[Etienne.Pessard@ensam.eu](mailto:Etienne.Pessard@ensam.eu)

### Descriptif de l'UE

3 ECTS / 30 h

Cours magistral : 10 h

Travaux dirigés : 10 h

Travaux pratiques : 28 h

### Objectifs

L'objectif de ce cours est de donner aux étudiants et aux professionnels des procédés des outils de modélisation et de simulation de procédés de mise en forme des alliages métalliques et de leur permettre d'utiliser des logiciels métiers afin de leur montrer leurs performances et leurs limites.

Ce cours est dédié à certains procédés de transformation des alliages métalliques à l'état « fluide » tels que les procédés de fonderie (moulage en sable, coulée sous pression ...), la mise en forme des pièces massives (forgeage, filage, étirage, ...) Les connaissances acquises pourront être directement mises en application pour une meilleure maîtrise et l'optimisation de ces procédés. Les secteurs industriels concernés sont tous ceux utilisant les procédés de transformation et préoccupés de la conséquence de ces procédés sur les propriétés d'emploi des pièces : aéronautique, transport, nucléaire, énergie, biomédical, industries mécaniques, électroménager, outillages portatifs...

### Thèmes abordés

#### Introduction : vers la modélisation

CM1 : Comment établir les bases de la modélisation multiphysique ? Exemple de couplage thermomécanique/métallurgique

CM2 : De la géométrie de la pièce vers la simulation du procédé : maillages et aspects numériques

Obtention des données matériaux et identification

CM3 : Données matériaux : rhéologie et essais sur simulateur thermomécanique (GLEEBLE)

## Programme MAGIS



CM4 : Mise en place d'expérimentation spécifique pour la fonderie

CM5 : Mise en place d'expérimentation spécifique pour la forge

Etude de cas semi-industriels – Simulation numérique et réalisation de pièces

Prise en main de codes métiers (fonderie PROCAST, QUICKCAST, ForgeNxt,

### Présentation du cas étudié

Mise en données

Confrontation expérience VS simulation (géométrie des pièces, efforts mesurés en forgeage, santé matière ...)

Discussion de l'intérêt des simulations numériques pour l'optimisation des procédés de mise en forme et de l'importance de la connaissance de son domaine de validité.

### Itinéraire 3 – « Cycle de vie des matériaux polymères et composites »

<https://pimm.artsetmetiers.fr/itineraire-3-cycle-de-vie-des-materiaux-polymeres-et-composites>

### Durabilité et recyclage des polymères et composites

<https://pimm.artsetmetiers.fr/durabilite-et-recyclage-des-polymeres-et-composites>

**L'unité d'enseignement est obligatoire.**  
**Les cours sont dispensés en anglais.** 🇬🇧

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

3 ECTS / 30 h

Cours magistral : 13h30

Travaux dirigés : 4h30

Travaux pratiques : 8h

### Equipe

Coord. **Xavier Colin** ([xavier.colin@ensam.eu](mailto:xavier.colin@ensam.eu), ENSAM Paris)

**pédagogique**

Xavier Colin, ENSAM Paris, [Xavier.COLIN@ensam.eu](mailto:Xavier.COLIN@ensam.eu)

Lucien Laiarinandrasana, PSL, [lucien.laiarinandrasana@mines-paristech.fr](mailto:lucien.laiarinandrasana@mines-paristech.fr)

Bruno Fayolle, ENSAM Paris, [bruno.fayolle@ensam.eu](mailto:bruno.fayolle@ensam.eu)

### Objectifs

Donner aux étudiants une vue générale des outils théoriques de prédiction de durée de vie de structures en polymère dans leurs conditions d'utilisation.

Présenter une application de ces outils au travers d'études de cas.

### Applications

Dans un premier temps conçus pour résister aux chargements mécaniques statiques et dynamiques, les structures en polymère sont maintenant envisagées pour des applications à long terme (typiquement plusieurs dizaines d'années) dans des conditions environnementales de plus en plus sévères. Les concepteurs, familiarisés avec le domaine de la modélisation mécanique, sont de plus en plus demandeurs de modèles cinétiques leur permettant de faire entrer le facteur temps dans la conception. Les approches classiques, fondées sur l'utilisation (souvent infondée) de l'équation d'Arrhenius ou d'autres modèles totalement empiriques, sont de moins en moins compatibles avec les exigences actuelles de la conception et l'on observe une forte pression industrielle en faveur du développement de modèles de prédiction de durée de vie. Les actions récentes auxquelles les laboratoires des différents intervenants ont participé traduisent bien ce regain d'intérêt.

### Thèmes

### abordés

Ce cours n'a pas la prétention de décrire tous les types de vieillissement susceptibles de se produire en pratique. Il a pour ambition de présenter une démarche générale de prédiction de durée de vie, applicable à tout problème de vieillissement d'une structure en polymère, et de montrer le bien fondé de cette démarche aux travers de quelques études de cas soigneusement choisies. Pour ce faire, le cours sera divisé en trois grandes parties. Dans une première partie, on s'attachera à décrire les mécanismes de vieillissement chimique les plus courants (oxydation, hydrolyse) ainsi que leurs cinétiques correspondantes. Dans une seconde partie, une attention particulière sera apportée aux mécanismes de fragilisation aux échelles locale et globale en l'absence de tout chargement mécanique. Une fois l'état de fragilisation structural clairement défini, ses conséquences sur les caractéristiques mécaniques seront ensuite décrites. Les lois de comportement ainsi établies permettront d'aborder les outils de la mécanique de la rupture adaptés afin de prédire la durée de vie résiduelle de la structure. Cette démarche sera mise en œuvre aux travers de quelques études de cas ayant fait l'objet de recherches dans les laboratoires des différents intervenants.

Le plan du cours sera donc :

Mécanismes d'oxydation, hydrolyse.

Propriétés de transport des réactifs moléculaires.

Couplage diffusion/réaction.

Mécanismes de stabilisation.

Coupures de chaîne et des actes de réticulation.

Retrait « contrarié » de la couche superficielle dégradée.

Conséquences sur les propriétés mécaniques.

Mécanismes de fissuration fragile lente dans les polymères.

Mécanique de la rupture en viscoplasticité : approche globale et notion d'approche locale.

Fragilisation de tuyaux PE utilisés pour le transport de l'eau potable.

Endommagement et fissuration en fluage de tube extrudé travaillant sous pression interne.

- Mécanismes de vieillissement chimique, aspects cinétiques - CM 4h30, TD 3h00
- Fragilisation locale et globale - CM 4h30 TD 1h30
- Application de la mécanique de la rupture aux polymères - CM 6h TD 3h
- Introduction au recyclage des polymères - CM 1h30
- Etudes de cas - TP 6h

### Exemples de stages de Master et de thèses liés à l'unité d'enseignement :

Vieillissement thermique de composites à matrice époxy (EADS, 2006/09).

Vieillissement thermique de propergols à matrice PBD (SNPE, 2004/07).

Propriétés à long terme de gaines de PEhd utilisées pour les ponts à haubans (LCPC, 2007/10).

Vieillissement thermique de joncs composites hybrides pour le renfort de ligne aérienne (EdF, 2007).

## Programme MAGIS



Développement de modèles de durée de vie des câbles synthétiques (EdF, 2008/11).

Viellissement d'isolants de câbles électriques en PE et copolymères éthylène/propylène en ambiance nucléaire (EdF, 2003/06).

Le PET recyclé en emballage alimentaire : approche expérimentale et modélisation cinétique (2005/08).

Impact de la qualité de l'eau sur le vieillissement de produits innovants de robinetterie en matériau de synthèse (CSTB, 2008/11).

Endommagement et fissuration en fluage de polyéthylènes extrudés : approche locale – approche globale (GdF 2000/03).

Effet du vieillissement sur l'amorçage et la propagation de fissure par fluage dans le PEHD (2010/09).

- Aéronautique et espace :
- Génie Civil :
- Electricité :
- Nucléaire :
- Emballage alimentaire :
- Transport de fluides :

### Evaluation

Travail Personnel de développement ou d'analyse d'articles : Rapport formaté (2 pages A4) + présentation orale (15 min)

### Mise en forme des polymères et composites

<https://pimm.artsetmetiers.fr/mise-en-forme-des-polymeres-et-composites>

L'unité d'enseignement est obligatoire. 

Les cours sont dispensés en anglais. 

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

3 ECTS / 30 h

Cours magistral : 6 séances de 3h

Travaux dirigés : 4 séances de 1h30

Travaux pratiques : 1 séance de 4h

### Equipe

Coord. Gilles Regnier ([gilles.regnier@ensam.eu](mailto:gilles.regnier@ensam.eu), ENSAM Paris)

pédagogique

Emmanuel Baranger, ENS, [baranger@imt.ens-cachan.fr](mailto:baranger@imt.ens-cachan.fr)

Corinne billerault, IFOCA, [corinne.billerault@ifoca.com](mailto:corinne.billerault@ifoca.com)

Jorge Peixinho, ENSAM Paris, [Jorge.PEIXINHO@ensam.eu](mailto:Jorge.PEIXINHO@ensam.eu)

Gilles Regnier, ENSAM Paris, [gilles.regnier@ensam.eu](mailto:gilles.regnier@ensam.eu)

Cyrille Sollogoub, ENSAM Paris, [Cyrille.SOLLOGOUB@ensam.eu](mailto:Cyrille.SOLLOGOUB@ensam.eu)

### Objectifs

Montrer les particularités de la mise en forme des polymères et des composites à matrice organique (comportement viscoélastique, cinétique des transitions d'état, rôle des renforts micro- et nanométriques qui en font des matériaux composites).

Donner les connaissances sur les micro- et les nanostructures induites afin de comprendre leur influence sur les propriétés.

Connaître le champ d'application et les limites des outils et codes de simulation.

### Applications

Les matériaux organiques et composites prennent une part toujours grandissante dans le très large

## Programme MAGIS



éventail de matériaux utilisés pour les produits manufacturés. L'optimisation de leur mise en forme passe de plus en plus par une phase de simulation sur codes métiers fondés sur un certain nombre d'hypothèses dont dépendent fortement les prédictions. Ce cours a pour ambition de montrer ce que peuvent apporter des codes tels que REM3D ou Moldflow pour simuler l'injection des thermoplastiques, mais aussi d'en donner les limites actuelles liées à la complexité des microstructures induites.

### Exemples de stages de Master liés à l'unité d'enseignement :

Simulation du thermoformage des vitrages en PMMA (Saint-Gobain 2008).  
Simulation du déliantage des pièces en céramique injectée (Snecma 2007).  
Propriétés thermo-élastiques des polymères injectés renforcés de fibres (Legrand 2006, Bosch 2008).  
Rhéologie des polymères renforcés par des nanotubes de carbone (2007).  
Propriétés viscoélastiques d'un PE renforcé par des nanoargiles (2007).

- Aéronautique :
- Génie électrique / Automobile :
- Nanotechnologies :

### Thèmes abordés

Comportement visqueux rhéofluidifiant.  
Viscoélasticité en écoulement.  
Microstructures induites.  
Modèles cinétiques.

- Les procédés de mise en forme des polymères - CM 3h
- Rhéologie à l'état fondu - CM 3h, TD 3h
- Cristallisation - CM 1h30, TD 1h30
- Les renforts microscopiques ou nanométriques (fibres, nanocharges,...) et nanostructuration - CM 6h
- Propriétés thermoélastiques induites - CM 1h30, TD 1h30
- Le procédé d'injection - CM 3h
- Simulation de l'injection des thermoplastiques sur le code Moldflow - TP 4h

### Evaluation

Travail Personnel de développement ou d'analyse d'articles : Rapport formaté (2 pages A4) + présentation orale (15 min)

### Comportement mécanique des Polymères

<https://pimm.artsetmetiers.fr/comportement-mecanique-des-polymeres>

L'unité d'enseignement est obligatoire.

Les cours sont dispensés en anglais.

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

3 ECTS / 30 h

Cours magistral : 13 séances de 1h30

Travaux dirigés : 6 séances de 1h30

Travaux pratiques : 1 séance de 4h00

### Equipe pédagogique

Coord. **Bruno Fayolle** ([fayolle.bruno@ensam.eu](mailto:fayolle.bruno@ensam.eu), ENSAM Paris)

Etienne Barthel, PSL, [etienne.barthel@espci.psl.eu](mailto:etienne.barthel@espci.psl.eu)

Antoine Châteauminis, PSL, [antoine.chateauminis@espci.fr](mailto:antoine.chateauminis@espci.fr)



## Programme MAGIS



Justin Dirrenberger, ENSAM Paris, [Justin.DIRRENBARGER@ensam.eu](mailto:Justin.DIRRENBARGER@ensam.eu)

Bruno Fayolle, ENSAM Paris, [bruno.fayolle@ensam.eu](mailto:bruno.fayolle@ensam.eu)

Patrick Heuillet, LRCCP, [heuillet@lrccp.com](mailto:heuillet@lrccp.com)

Alba Marcellan, PSL, [alba.marcellan@espci.fr](mailto:alba.marcellan@espci.fr)

### Objectifs

Les objectifs de cette UE sont de donner une base de connaissances du comportement des matériaux polymères permettant de les utiliser à bon escient et de sélectionner le matériau le plus adapté dans les applications où le gain de poids, la résistance à la rupture, la résistance chimique ou une combinaison de ces propriétés en font des candidats de choix pour remplacer les métaux.

### Applications

Les domaines principaux d'applications sont : l'Aéronautique et Espace, l'Automobile aussi bien pour des pièces de style (carrosserie) que pour des pièces techniques (engrenages, etc.), l'Exploitation Pétrolière, le Génie Civil en particulier pour les revêtements et les joints d'étanchéité, l'Electricité en tant que matériaux isolants, l'Emballage et le conditionnement de fluides, Transport et stockage de fluides (eau potable, gaz), Sports et loisirs, microélectronique, Santé (prothèses, tissu artificiel).

### Thèmes abordés

- Viscoélasticité linéaire, fluage et relaxation, comportement dynamique, équivalence temps-température, mobilité moléculaire (J. Diani CM 4h30 – TD 1h30 – TP 4h00)
- Présenter l'interprétation physique et moléculaire des théories d'hyperélasticité appliquées aux élastomères, puis introduire le formalisme des grandes déformations appliqué aux élastomères (A. Marcellan and L. Laiarinandrasana CM 6h)
- Analyser la spécificité de la mécanique linéaire et non linéaire de la rupture appliquée aux cas particuliers des polymères (L. Laiarinandrasana CM 3h)
- Décrire les mécanismes de plasticité et rupture à l'échelle microscopique, établir les relations entre la structure chimique, l'architecture du polymère et les mécanismes de déformation plastique (C. Creton CM 3h – TD 1h30)
- Introduire les notions de base en mécanique des contacts élastiques adhésifs dans les polymères (A. Chateaubinois CM 4h30 – TD 1h30)

### Evaluation

Travail personnel de développement ou d'analyse d'articles : rapport formaté (2 pages A4) et présentation orale.

### **Itinéraire 4 – « Procédé d'usinage avancé et simulation »**

<https://pimm.artsetmetiers.fr/itineraire-4-procede-dusinage-avance-et-simulation>

### **Approche multi-physique de la coupe, matériaux et intégrité matière**

<https://pimm.artsetmetiers.fr/approche-multi-physique-de-la-coupe-materiaux-et-integrite-matiere>

L'unité d'enseignement est obligatoire.

Les cours sont dispensés en français. 

Les cours sont dispensés en anglais 

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

## Programme MAGIS



3 ECTS / 30 h

Cours magistral : 16h

Travaux dirigés : 8h

Travaux pratiques : 8h



Coord. **Guillaume Fromentin** ([guillaume.fromentin@ensam.eu](mailto:guillaume.fromentin@ensam.eu), ENSAM Cluny)

### Equipe pédagogique :

Gérard POULACHON, Professeur des Universités, Arts et Métiers, Cluny,  
[gerard.poulachon@ensam.eu](mailto:gerard.poulachon@ensam.eu)

Frédéric ROSSI, Maître de Conférences, ENSAM, Cluny, [frederic.rossi@ensam.eu](mailto:frederic.rossi@ensam.eu)

José OUTEIRO, Maître de Conférences HDR, ENSAM, Cluny, [jose.outeiro@ensam.eu](mailto:jose.outeiro@ensam.eu)

### Déroulement et organisation pratique :

Cours 1 - Coupe, Usinage à Grande Vitesse et Modèles Analytiques : principes de la coupe orthogonale, description de la géométrie d'outil, paramétrage de la zone de coupe, Théories de Merchant et d'Albrecht, modélisation analytique des forces de coupe.

Cours 2 - Thermique de la coupe : instrumentation et modélisation.

Cours 3 - Usinabilité des matériaux difficiles & interaction matériaux procédés : Phénomènes physiques autour de l'arête de coupe, arête rapportée, aspects tribologiques en coupe des métaux.

Cours 4 - Modélisation et simulation numérique de la coupe par enlèvement de matière : introduction ; aspects fondamentaux sur la simulation numérique ; comportement mécanique des matériaux et lois de comportement ; frottement et lois de contact ; simulation de la formation du copeaux (séparation de la matière) ; conditions aux limites ; validation ; logiciels d'éléments finis pour la simulation de la coupe ; exemples d'application.

Cours 5 - Intégrité de surface (IS) : Introduction et définitions ; défauts de surface ; contraintes résiduelles ; microstructure et transformations de phase ; techniques expérimentales pour évaluer l'IS surface ; modélisation et simulation de l'IS.

### Objectifs pédagogiques visés :

L'objectif est d'analyser les phénomènes thermomécaniques au voisinage de la pointe d'un outil coupant et ses conséquences sur l'intégrité de la surface usinée. Ces phénomènes seront observés aux échelles mésoscopique et microscopique, en s'appuyant sur des expérimentations et des simulations numériques de la coupe.

### Contenu :

- Notions fondamentales et théorie sur la coupe par enlèvement de matière.
- Usinabilité des matériaux difficiles, tels que ceux rencontrés dans les secteurs aéronautique, automobile et nucléaire.
- Détermination des domaines de validité des paramètres de coupe pour un outil et matériau donnés.

## Programme MAGIS



- La qualification d'outils coupants de nouvelle génération et la validation de nouvelles métallurgies de matériaux à usiner.
- La mise en œuvre de la simulation numérique et de moyens expérimentaux dédiés à la compréhension des phénomènes thermiques et mécaniques de la coupe.
- L'analyse de l'intégrité de surface des pièces usinées, notamment l'évaluation de l'état mécanique, métallurgique et topographique.

### Prérequis :

Notions du procédé d'usinage ; Méthodes numériques ; Mécanique des milieux continus ; Thermique.

### Usinage avancé et ses applications

<https://pimm.artsetmetiers.fr/usinage-avance-et-ses-applications>

L'unité d'enseignement est obligatoire. ✓

Les cours sont dispensés en

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

3 ECTS

### Equipe pédagogique

Coord. **Guillaume FROMENTIN** ([gerard.poulachon@ensam.eu](mailto:gerard.poulachon@ensam.eu),

Mehdi CHERIF [Mehdi.CHERIF@ensam.eu](mailto:Mehdi.CHERIF@ensam.eu)

Guenael GERMAIN [Guenael.Germain@ensam.eu](mailto:Guenael.Germain@ensam.eu)

Guillaume FROMENTIN [guillaume.fromentin@ENSAM.EU](mailto:guillaume.fromentin@ENSAM.EU)

Mikhail GUSKOV [mikhail.guskov@ensam.eu](mailto:mikhail.guskov@ensam.eu)

Philippe LORONG [Philippe.LORONG@ensam.eu](mailto:Philippe.LORONG@ensam.eu)

David PRAT [David.PRAT@ENSAM.EU](mailto:David.PRAT@ENSAM.EU)

### Mise en forme par déformation plastique

<https://pimm.artsetmetiers.fr/mise-en-forme-par-deformation-plastique-0>

L'unité d'enseignement est obligatoire. ✓

Les cours sont dispensés en

Coord. **Franck Morel** ([franck.morel@ensam.eu](mailto:franck.morel@ensam.eu), ENSAM Angers)

3 ECTS / 30 h

Courses : 10 sessions de 3h

Exercices : Aucun

Practice : Aucun

### Equipe pédagogique

### Objectif

L'objectif de ce cours est de donner des connaissances solides, aux étudiants et aux professionnels, sur la microstructure des métaux et les mécanismes se produisant lors de procédés de transformation de la matière à l'état solide couplant des effets mécaniques et thermiques en vue (1) de mieux modéliser et simuler ces procédés de transformation et (2) de prévoir les performances mécaniques des matériaux et pièces lors de leur utilisation.

# Programme MAGIS



Ce cours est dédié à tous les procédés de transformation à l'état solide tels que la mise en forme des tôles (laminage, emboutissage, découpage...), la mise en forme des pièces massives (forgeage, filage, étirage, ...) et les procédés d'enlèvement de matière. Les connaissances acquises pourront être directement mises en application pour l'optimisation de ces procédés dans une démarche intégrée « produit-process ». Les secteurs industriels concernés sont tous ceux utilisant les procédés de transformation et préoccupés de la conséquence de ces procédés sur les propriétés d'emploi des pièces : aéronautique, transport, nucléaire, santé, emballage, construction, électro-ménager...

## Thèmes abordés

- Transformation structurale à l'état « solide » et comportement en mise en forme: séances 1 à 4.
- Tribologie : séances 5 à 6.
- Rôle des contraintes résiduelles et des hétérogénéités microstructurales sur les propriétés d'usage : séances 7 à 10.

## Plan du cours

### Séance 1 :

Transformation de phase et précipitation (JLL).

### Séance 2 :

Restauration et recristallisation (YC).

### Séance 3 :

Texture et structure de dislocation lors de la déformation à froid et à chaud (YC)

### Séance 4 :

Lois de comportement thermo-élasto(visco)plastique pour les hautes températures, les grandes vitesses de déformations et les grandes déformations (RD): Lois de Johnson-Cook, Norton-Hoff, thermiquement activées – Notion d'endommagement associé – Extension du formalisme aux grandes transformations dans le cas de matériaux élasto(visco)plastiques.

### Séance 5 :

La notion de frottement, le modèle de Blok et ses dérivés, les modèles d'usure - Les mises en évidence expérimentales des contradictions inhérentes à ces modèles.

### Séance 6 :

Description du contact à 3 corps et mise en évidence des flux de matières et des flux thermiques en s'appuyant sur un modèle simplifié de type éléments discrets - Proposition d'une démarche couplant expérimentale et numérique pour l'établissement de lois de comportement, exemples de moyens expérimentaux adaptés aux sollicitations dans le cadre des procédés, exemple de modèle DEM/FEM locaux.

### Séance 7 :

Origine des contraintes résiduelles et calculs dans un cas simple de mise en forme – Contraintes résiduelles après mise en forme et traitements thermiques – Les différentes techniques d'analyse des contraintes résiduelles (JLL).

### Séance 8 :

Influence des contraintes résiduelles et des hétérogénéités microstructurales sur la déformation, sur la résistance statique, sur la résistance chimique, sur les propriétés physiques (JLL).

### Séance 9 :

Intégrité des matériaux et tenue en fatigue (FM): Rappel sur les critères d'endurance en fatigue - Effet de l'état de surface, des contraintes résiduelles et des hétérogénéités microstructurales.

### Séance 10 :

Exemples de différents procédés (usinage, forgeage, fonderie, traitements superficiels ...) et des effets associés en fatigue (FM).

## Programme MAGIS



**Évaluation :**  
Examen écrit.



### Cours d' Option

<https://pimm.artsetmetiers.fr/cours-d-option>

**L'unité d'enseignement est en option**

#### Comportement mécanique des matériaux sous impact

<https://pimm.artsetmetiers.fr/comportement-mecanique-des-materiaux-sous-impact>

**L'unité d'enseignement est en option**  
**Les cours sont dispensés en anglais.** 

#### Équipe pédagogique

Coord. **Bastien Durand** ([bastien.durand@ens-paris-saclay.fr](mailto:bastien.durand@ens-paris-saclay.fr), ENS Paris-Saclay)

#### Équipe pédagogique :

DURAND, Bastien, Maître de Conférences, CNU 60, ENS Paris-Saclay  
[bastien.durand@ens-paris-saclay.fr](mailto:bastien.durand@ens-paris-saclay.fr)

#### Objectifs pédagogiques :

Le cours traite du comportement mécanique des matériaux utilisés en ingénierie (métaux et mousses) sous chargements dynamiques. L'étude de la propagation des ondes mécaniques est au cœur de ce domaine.

#### Contenu :

Le cours donne d'abord le bagage théorique nécessaire pour comprendre la propagation des ondes (méthodes des caractéristiques dans le diagramme de Lagrange, relations de Rankine & Hugoniot). Ces connaissances seront utiles aux futurs ingénieurs et chercheurs qui travailleront sur des problèmes impliquant des chargements dynamiques sur des structures ou sur des matériaux.

Le cours donne également des compétences expérimentales (barres d'Hopkinson) et numériques (ABAQUS).

Domaines concernés : absorption d'énergie dans les véhicules, applications militaires, usinage à grande vitesse...

#### Prérequis :

Enseignements de base de MAGIS

#### Déroulement et organisation pratique :

ONDES ELASTIQUES :

## Programme MAGIS



- Ondes de traction/compression simple ;
- Ondes hydrostatiques et de cisaillement en milieux 3D ;
- Ondes de traction/compression confinée ;
- Ondes de torsion ;
- Ondes de flexion ;
- Ondes de traction/compression dans les plaques ;
- Etude théorique de la technique des barres d'Hopkinson en compression ;
- Dispersion des ondes dans une barre par l'inertie latérale.

### ONDES ELASTO-PLASTIQUES :

- Linéarité par parties ;
- Diagrammes de Lagrange.

### EQUATIONS DE RANKINE & HUGONOT ET EQUATIONS D'ETAT HABITUELLES :

- Equations de conservation ;
- Application à l'élasticité ;
- Ondes dans des gaz polytropiques et dans des matériaux solides fortement comprimés (théorie des fronts d'onde, droite de Rayleigh) ;
- Application à la mécanique des fluides incompressibles (relation de Bernoulli) ;
- Comportement dynamique des mousses.

### ONDES VISCO-ELASTIQUES

### TRAVAUX EXPERIMENTAUX :

- Essai de cisaillement dynamique sur un joint de colle à l'aide de barres d'Hopkinson de traction ;
- Exploitation des mesures de jauges de déformation pour déterminer forces et vitesses ;
- Corrélation d'Images Numérique pour déterminer les déplacements locaux.

### TRAVAUX NUMERIQUES :

- Utilisation d'un logiciel de modélisation par éléments finis (ABAQUS-CAE) ;
- Etude numérique des ondes élasto-plastiques dans les matériaux solides et dans les mousses ;
- Etude numérique de la dispersion des ondes.

## Mécanique de l'endommagement

<https://pimm.artsetmetiers.fr/mecanique-de-lendommagement-1>

L'unité d'enseignement est en option

Les cours sont dispensés en anglais.

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

3 ECTS / 30 h

Cours magistral: 15 h

Travaux dirigés : 15 h

Travaux pratiques : 0 h

### Equipe pédagogique

Coord. **Rodrigue Desmorat** ([rodrigue.desmorat@ens-paris-saclay.fr](mailto:rodrigue.desmorat@ens-paris-saclay.fr), ENS Paris-Saclay)

## Programme MAGIS



### Objectifs

Le cours a pour objectif de donner un état de l'art sur les mécanismes d'endommagement des différents matériaux (métaux et alliages, béton et verres, composites, élastomères) et les différentes applications (e.g. rupture sous des conditions de chargement monotones, fatigue, dynamique). Le cours vise également à donner les concepts de mise en œuvre de l'implantation numérique de lois de comportement avec endommagement.

**Applications** : prépare les ingénieurs et les jeunes chercheurs aux nouvelles méthodes de dimensionnement basées sur le concept de la mécanique de l'endommagement. Les secteurs d'applications sont l'aéronautique et l'aérospatiale, l'énergie, l'automobile et le génie civil.

### Mise en forme par déformation plastique

<https://pimm.artsetmetiers.fr/mise-en-forme-par-deformation-plastique-1>

L'unité d'enseignement est en option

Les cours sont dispensés en français 

Coord. **Franck Morel** ([franck.morel@ensam.eu](mailto:franck.morel@ensam.eu), ENSAM Angers)

### Equipe pédagogique

**Franck Morel** ([franck.morel@ensam.eu](mailto:franck.morel@ensam.eu), ENSAM Angers)

Charles Mareau ([charles.mareau@ensam.eu](mailto:charles.mareau@ensam.eu), ENSAM Angers)

Charbel Moussa ([charbel.moussa@mines-paristech.fr](mailto:charbel.moussa@mines-paristech.fr), Mines ParisTech)

Ivan Iordanoff ([ivan.iordanoff@ensam.eu](mailto:ivan.iordanoff@ensam.eu), ENSAM Bordeaux)

Rodrigue Desmorat ([rodrigue.desmorat@ens-paris-saclay.fr](mailto:rodrigue.desmorat@ens-paris-saclay.fr), ENS Paris-Saclay)

Thierry Palin-Luc ([thierry.palin-luc@ensam.eu](mailto:thierry.palin-luc@ensam.eu), ENSAM Bordeaux)

### Descriptif de l'unité d'enseignement [Mise en forme par déformation plastique](#)

3 ECTS / 30 h

Courses : 10 sessions de 3h

Exercices : Aucun

Practice : Aucun

### Objectif

L'objectif de ce cours est de donner des connaissances solides, aux étudiants et aux professionnels, sur la microstructure des métaux et les mécanismes se produisant lors de procédés de transformation de la matière à l'état solide couplant des effets mécaniques et thermiques en vue (1) de mieux modéliser et simuler ces procédés de transformation et (2) de prévoir les performances mécaniques des matériaux et pièces lors de leur utilisation.

### Applications

Ce cours est dédié à tous les procédés de transformation à l'état solide tels que la mise en forme des tôles (laminage, emboutissage, découpage...), la mise en forme des pièces massives (forgeage, filage, étirage, ...) et les procédés d'enlèvement de matière. Les connaissances acquises pourront être directement mises en application pour l'optimisation de ces procédés dans une démarche intégrée « produit-process ». Les secteurs industriels concernés sont tous ceux utilisant les procédés de transformation et préoccupés de la conséquence de ces procédés sur les propriétés d'emploi des pièces : aéronautique, transport, nucléaire, santé, emballage, construction, électro-ménager...

### Thèmes abordés

- Transformation structurale à l'état « solide » et comportement en mise en forme: séances 1 à 4.
- Tribologie : séances 5 à 6.

## Programme MAGIS



- Rôle des contraintes résiduelles et des hétérogénéités microstructurales sur les propriétés d'usage : séances 7 à 10.

### Plan du cours

#### Séance 1 :

Transformation de phase et précipitation (JLL).

#### Séance 2 :

Restauration et recristallisation (YC).

#### Séance 3 :

Texture et structure de dislocation lors de la déformation à froid et à chaud (YC)

#### Séance 4 :

Lois de comportement thermo-élasto(visco)plastique pour les hautes températures, les grandes vitesses de déformations et les grandes déformations (RD): Lois de Johnson-Cook, Norton-Hoff, thermiquement activées – Notion d'endommagement associé – Extension du formalisme aux grandes transformations dans le cas de matériaux élasto(visco)plastiques.

#### Séance 5 :

La notion de frottement, le modèle de Blok et ses dérivés, les modèles d'usure - Les mises en évidence expérimentales des contradictions inhérentes à ces modèles.

#### Séance 6 :

Description du contact à 3 corps et mise en évidence des flux de matières et des flux thermiques en s'appuyant sur un modèle simplifié de type éléments discrets - Proposition d'une démarche couplant expérimentale et numérique pour l'établissement de lois de comportement, exemples de moyens expérimentaux adaptés aux sollicitations dans le cadre des procédés, exemple de modèle DEM/FEM locaux.

#### Séance 7 :

Origine des contraintes résiduelles et calculs dans un cas simple de mise en forme – Contraintes résiduelles après mise en forme et traitements thermiques – Les différentes techniques d'analyse des contraintes résiduelles (JLL).

#### Séance 8 :

Influence des contraintes résiduelles et des hétérogénéités microstructurales sur la déformation, sur la résistance statique, sur la résistance chimique, sur les propriétés physiques (JLL).

#### Séance 9 :

Intégrité des matériaux et tenue en fatigue (FM): Rappel sur les critères d'endurance en fatigue - Effet de l'état de surface, des contraintes résiduelles et des hétérogénéités microstructurales.

#### Séance 10 :

Exemples de différents procédés (usinage, forgeage, fonderie, traitements superficiels ...) et des effets associés en fatigue (FM).

### Évaluation :

Examen écrit.

### Modélisation algorithmique des problèmes multi-physiques

<https://pimm.artsetmetiers.fr/modelisation-algorithmique-des-problemes-multi-physiques>

L'unité d'enseignement est en option

Les cours sont dispensés en français 

Coord. Olivier Hubert ([olivier.hubert@ens-paris-saclay.fr](mailto:olivier.hubert@ens-paris-saclay.fr) ENS Paris-Saclay)

Equipe pédagogique



## Programme MAGIS



Hubert, Olivier, Professeur des universités, CNU60, ENS Paris-Saclay  
[olivier.hubert@ens-paris-saclay.fr](mailto:olivier.hubert@ens-paris-saclay.fr)



Lorong Philippe, Professeur des universités, CNU60, ENSAM  
[philippe.lorong@ensam.eu](mailto:philippe.lorong@ensam.eu)

Ranc, Nicolas, Professeur des universités, CNU60, ENSAM  
[nicolas.ranc@ensam.eu](mailto:nicolas.ranc@ensam.eu)

Guilhem, Yoann, Maître de conférences, CNU 60, ENS Paris-Saclay.  
[Yoann.guilhem@ens-paris-saclay.fr](mailto:Yoann.guilhem@ens-paris-saclay.fr)

### Déroulement et organisation pratique :

Cours 1A : Typologie des couplages multiphysiques (locaux, globaux, fort, faibles), formulation unifiée des équations de bilan et des lois de comportement (conservation de la masse, quantité de mouvement, énergie); Diffusion chimique, chaleur, changement de phase

Cours 1B : Problèmes elliptiques, paraboliques et hyperboliques (algorithmes, convergence et stabilité).

Cours 2A : Résolution en différences finies, schéma explicite, implicite, theta-schéma

Cours 2B : Thermomécanique de la plasticité: statique, fatigue, mesure, simulation.

Cours 3A : Changement d'échelle pour la simulation des déformations libres: AMF, magnéto-mécanique, électro-mécanique.

Séance projet 3B : Présentation/ choix des projets

Séance projet 4 : Validation des objectifs des projets numériques, validation des formulations

Séances 5-10 : Projets numériques.

### Objectifs pédagogiques visés :

#### Contenu :

L'objectif final est de proposer une typologie des problèmes multi-physiques rencontrés en mécanique des matériaux, de présenter les méthodes et algorithmes qui permettent de construire un modèle numérique associé, et de mettre en œuvre ces concepts à travers un projet numérique (couplage fort avec évolution spatio-temporelle des champs physiques modélisés).

#### Compétences :

- 1/ Acquérir les connaissances permettant de choisir, d'identifier et éventuellement de développer, le modèle le mieux adapté pour décrire un ou plusieurs couplages multiphysiques;
- 2/ Acquérir les connaissances permettant de choisir, d'identifier et éventuellement de développer, la méthode numérique la plus adaptée à la résolution du problème visé;

#### Compétences complémentaires :

- langage matlab, python

## Programme MAGIS



- écriture d'un article scientifique
- présentation orale de ses travaux.



### Prérequis :

Mécanique des milieux continus, élasticité, thermique, éléments de programmation.

### Mise en forme des polymères et composites

<https://pimm.artsetmetiers.fr/mise-en-forme-des-polymeres-et-composites-0>

### L'unité d'enseignement est en option

Les cours sont dispensés en anglais. 🇬🇧

### Descriptif de l'Unité d'Enseignement

3 ECTS / 30 h

Cours magistral : 6 séances de 3h

Travaux dirigés : 4 séances de 1h30

Travaux pratiques : 1 séance de 4h

### Equipe pédagogique

Coord. **Gilles Regnier** ([gilles.regnier@ensam.eu](mailto:gilles.regnier@ensam.eu), ENSAM Paris)

### Objectifs

Montrer les particularités de la mise en forme des polymères et des composites à matrice organique (comportement viscoélastique, cinétique des transitions d'état, rôle des renforts micro- et nanométriques qui en font des matériaux composites).

Donner les connaissances sur les micro- et les nanostructures induites afin de comprendre leur influence sur les propriétés.

Connaître le champ d'application et les limites des outils et codes de simulation.

### Applications

Les matériaux organiques et composites prennent une part toujours grandissante dans le très large éventail de matériaux utilisés pour les produits manufacturés. L'optimisation de leur mise en forme passe de plus en plus par une phase de simulation sur codes métiers fondés sur un certain nombre d'hypothèses dont dépendent fortement les prédictions. Ce cours a pour ambition de montrer ce que peuvent apporter des codes tels que REM3D ou Moldflow pour simuler l'injection des thermoplastiques, mais aussi d'en donner les limites actuelles liées à la complexité des microstructures induites.

### Exemples de stages de Master liés à l'unité d'enseignement :

Simulation du thermoformage des vitrages en PMMA (Saint-Gobain 2008).

Simulation du déliantage des pièces en céramique injectée (Snecma 2007).

Propriétés thermo-élastiques des polymères injectés renforcés de fibres (Legrand 2006, Bosch 2008).

Rhéologie des polymères renforcés par des nanotubes de carbone (2007).

Propriétés viscoélastiques d'un PE renforcé par des nanoargiles (2007).

- Aéronautique :
- Génie électrique / Automobile :
- Nanotechnologies :

### Thèmes abordés

## Programme MAGIS



Comportement visqueux rhéofluidifiant.  
Viscoélasticité en écoulement.  
Microstructures induites.  
Modèles cinétiques.

- Les procédés de mise en forme des polymères - CM 3h
- Rhéologie à l'état fondu - CM 3h, TD 3h
- Cristallisation - CM 1h30, TD 1h30
- Les renforts microscopiques ou nanométriques (fibres, nanocharges,...) et nanostructuration - CM 6h
- Propriétés thermoélastiques induites - CM 1h30, TD 1h30
- Le procédé d'injection - CM 3h
- Simulation de l'injection des thermoplastiques sur le code Moldflow - TP 4h

### Evaluation

Travail Personnel de développement ou d'analyse d'articles : Rapport formaté (2 pages A4) + présentation orale (15 min)

### Fatigue des matériaux

<https://pimm.artsetmetiers.fr/fatigue-des-materiaux>

L'unité d'enseignement est en option  
Les cours sont dispensés en

Coord. **Véronique Aubin** ([veronique.aubin@centralesupelec.fr](mailto:veronique.aubin@centralesupelec.fr)), CentraleSupélec

### Eco-Matériaux

<https://pimm.artsetmetiers.fr/eco-materiaux>

L'unité d'enseignement est en option  
Les cours sont dispensés en anglais 



3 ECTS

Coord. **Martin Poncelet** ([martin.poncelet@ens-paris-saclay.fr](mailto:martin.poncelet@ens-paris-saclay.fr)), ENS Paris-Saclay)

## Programme MAGIS



Carole CHARBUILLET, Ensam Chambéry  
[Carole.CHARBUILLET@ensam.eu](mailto:Carole.CHARBUILLET@ensam.eu)

Imade KOUTIRI, Ensam Paris  
[Imade.KOUTIRI@ensam.eu](mailto:Imade.KOUTIRI@ensam.eu)

Bertrand LARATTE, Ensam Bordeaux  
[Bertrand.LARATTE@ensam.eu](mailto:Bertrand.LARATTE@ensam.eu)

Cyrille SOLLOGOUB, Ensam Paris  
[Cyrille.SOLLOGOUB@ensam.eu](mailto:Cyrille.SOLLOGOUB@ensam.eu)

Martin PONCELET, ENS Paris-Saclay  
[martin.poncelet@ens-paris-saclay.fr](mailto:martin.poncelet@ens-paris-saclay.fr)

Anne-Francoise Gourgue, Mine-ParisTech  
[anne-francoise.gourgues@mines-paristech.fr](mailto:anne-francoise.gourgues@mines-paristech.fr)

Mateusz BOGDAN  
[mateusz.bogdan@arep.fr](mailto:mateusz.bogdan@arep.fr)

### Keywords :

Cours en 5 parties, accompagné de 2 TD et d'un BE.

### Mots clefs :

Limitation des ressources, impact environnemental, recyclage, durabilité, optimisation, fabrication additive.

Cette UE se concentre sur l'impact environnemental de l'usage des matériaux, et des moyens de le réduire.

Le cours commence par aborder la problématique des contraintes s'exerçant lors du choix de matériaux. Au delà du simple coût économique, il y a la restriction des ressources (limitations géologiques, politiques), des cadres légaux (nationaux, internationaux) et la mise en place de filières de recyclage (à la fois contrainte et solution partielle du problème de limitation). De manière plus générale que l'impact environnemental d'un matériau, la question de l'estimation de l'impact d'un produit entier (donc incluant ses matériaux, mais aussi ses procédés de fabrication et de manière générale, l'ensemble de son cycle de vie) se pose. Quelles méthodes existent pour qualifier cet impact ?

Une description des enjeux techniques, écologiques et géostratégiques, ainsi que les solutions de recyclage et de réutilisation pour deux familles de matériaux est ensuite proposée. Il s'agit d'une part de la famille des métalliques, de l'industrie lourde (acier, aluminium) au métaux précieux et terres rares, et d'autre part, de la famille des polymères, naturels, issus des hydrocarbures ou biosourcés.

Enfin, les pistes actuelles visant à la réduction de l'usage des matériaux seront présentées : fonctionnalisation (un matériau rempli plusieurs fonctions), optimisation topologique (moindre quantité de matériau utilisé pour une même performance), techniques de fabrication additive (permettant une diminution de la quantité de matière utilisée lors de la production). Un regard critique portant sur

## Programme MAGIS



l'ensemble de la filière de fabrication additive sera proposé, incluant donc l'élaboration des consommables et le post-traitement des pièces.

### Semestre 2 – 30 ECTS

<https://pimm.artsetmetiers.fr/semestre-2-30-ects>

Coord. **Xavier Colin** ([xavier.colin@ensam.eu](mailto:xavier.colin@ensam.eu), ENSAM Paris)

Le second semestre consiste en un stage de recherche dans l'un des laboratoires des partenaires.

30 ECTS / 14 semaines

#### Objectifs du Stage de recherche

A partir de mi Février et jusqu'à fin Juin, vous allez être accueilli dans une équipe de recherche pour mener à bien votre projet de recherche dans le cadre du stage. Sauf exceptions, le projet de recherche est une préparation du stage de recherche. Si votre projet a été bien conduit, au début du stage, vous avez déjà fait l'étude bibliographique, les commandes de matière ou de matériel sont lancées ou peuvent être lancées dans les premiers jours du stage etc...

Le stage vous permet de mener l'étude qui a été préparée dans le cadre du projet.

#### Modalités d'évaluation du Stage de recherche

La note du stage sera calculée à partir de quatre notes:

- La note attribuée par le rapporteur pour les deux états d'avancement intermédiaires ou jalons à remettre 6 semaines et 12 semaines après le début du stage. Chaque jalon statue sur l'avancement du projet et sur ce qu'il reste à faire jusqu'à la fin du stage en environ 1 page.
- La note attribuée par le rapporteur pour le rapport écrit.
- La note attribuée par le responsable de stage.
- La note de soutenance. La durée de la soutenance sera de 30 minutes, dont 20 minutes d'exposé et 10 minutes de question. Les étudiants d'un groupe DOIVENT assister aux exposés des autres étudiants du même groupe. L'emploi du temps de la journée de soutenance (salles, horaires et Jury) seront disponibles sous peu sur l'agenda.

## Programme MAGIS



Programme MAGIS

