

## Thermodynamique Appliquée

Niveau L3 - Semestre S6 - Crédits 3 ECTS - Code LU3ME010 – Mention Licence Mécanique

### Objectifs.

L'objectif de ce module est de compléter et d'approfondir les notions de base en thermodynamique macroscopique en abordant les aspects fondamentaux de la discipline jusqu'aux applications industrielles.

### Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Changement de phase - caractérisation d'un mélange. équilibre d'un corps sous deux phases
- Energie et conversion de l'énergie, analyse de systèmes de conversion d'énergie, Machine de conversion d'énergie.
- Etudes des principaux cycles thermodynamiques (Rankine, Hirn, Brayton, Otto, Stirling, Diesel, Atkinson, machine frigorifique et de climatisation etc.).
- Thermodynamique chimique, équation de Gibbs généralisée, loi de déplacement d'équilibre

**Pré-requis minimum.** Bases de Thermodynamiques aquises en L1 et L2

### Références bibliographiques.

- J.P. Perez, Thermodynamique : Fondements et applications, Dunod 2001
- M.Hulin, Thermodynamique Licence, Dunod, 1996
- B. Pascal, Energétique -Thermodynamique générale, Dunod 1996

### Ressources mises à disposition des étudiants.

Transparents de cours, sujets de travaux dirigés et d'annales corrigés.

### Connaissances scientifiques développées dans l'unité

- Concepts de base traiter des problèmes de thermodynamique appliquée

### Compétences développées dans l'unité.

- Disciplinaires : acquisition des bases en thermodynamique. Résolutions de bilan d'énergie dans des situations complexes et dans des systèmes réels.
- Interdisciplinaires : application des compétences en mathématiques (manipulation de fonctions de plusieurs variables et de formes différentielles, résolution d'EDO) à des problèmes de thermodynamique, Physique des systèmes
- Transversales : Physico-Chimie des systèmes thermodynamiques

### Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

- Heures présentes totales : CM : 10h, TD : 14h, TP : 6h (2 fois 3h)
- Travail personnel attendu : 40 – 50 h.

**Évaluation :** Un QCM en ligne, un examen Ecrit et un compte-rendu de TP

**Responsables.** M Patrick Da Costa

## Méthodes mathématiques et numériques pour la mécanique : EDP 2

Niveau L3 - Semestre S6 - Crédits 6 ECTS - Code LU3ME009 – Mention Licence Mécanique

**Objectifs :** Acquérir les notions et méthodes mathématiques et numériques nécessaires à la résolution d'équations aux dérivées partielles (EDP) d'ordre 2 de la mécanique.

### Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Chapitre 1: Méthodes numériques pour le calcul des valeurs et vecteurs propres pour des matrices carrées: localisation des valeurs propres, méthode de la puissance itérée, puissance itérée inverse, déflation, méthode de Jacobi.
- Chapitre 2: Différences finies 2D, Application à la résolution de l'équation de Poisson, Méthodes Numériques pour les matrices creuses (SOP par points et par blocs).
- Chapitre 3: Séries de Fourier, Séparation des variables, Application à la résolution des EDP: équation de la chaleur, équation de Laplace, équation des ondes.
- Chapitre 4: Transformées de Fourier, introduction aux convolutions et distributions. Application à la résolution des équations aux dérivées partielles.
- Chapitre 5: Transformées de Laplace et application à la résolution des équations aux dérivées partielles.

**Pré-requis mimuminum.** Méthodes mathématiques et numériques pour la mécanique : EDO (S4), Méthodes mathématiques et numériques pour la mécanique : EDP 1 (S5), Programmation pour le calcul scientifique (S3, Fortran 2003 ou C).

### Références bibliographiques.

- W. Strauss : "Partial Differential Equations : An Introduction", Wiley Global Education, 2007
- H. Reinhard : "Equations aux dérivées partielles : fondements et applications", Dunod, 1991
- P. A. Raviart et J. M. Thomas, Introduction à l'analyse numérique des équations aux dérivées partielles, Masson, 1992.
- J. P. Demaillly, Analyse numérique et équations différentielles, Edition Presses Universitaires de Grenoble, 1991.
- D. Euvrard, Résolution numérique des équations aux dérivées partielles de la physique, de la mécanique et des sciences de l'ingénieur: Différences finies, éléments finis, problèmes en domaine non borné, 3ème édition, Masson, 1994.
- G. H. Golub, C. F. Van Loan, Matrix Computation, 3rd Edition, books.google.com, 1996.
- Y. Saad, Iterative Methods for Sparse Linear Systems, 2nd edition, SIAM , 2003.

### Ressources mises à disposition des étudiants.

Polycopié de cours, sujets de travaux dirigés et d'annales corrigés.

### Connaissances scientifiques développées dans l'unité

- Concepts de base pour l'analyse et la résolution des équations aux dérivées partielles linéaires par séparation de variables, en dimension 1,2 et 3 pour des géométries simples.
- Concepts de base pour l'utilisation des transformées linéaires (Fourier et Laplace) dans la résolutions des équations aux dérivées partielles linéaires.
- Savoir écrire un programme de résolution par différences finies d'un problème elliptique 2D
- Savoir écrire un programme de calcul des valeurs propres et vecteurs propres.

### Compétences développées dans l'unité.

- Disciplinaires : Connaître les méthodes mathématiques et numériques de résolution des EDP d'ordre 2, de calcul des valeurs et vecteurs propres
- Interdisciplinaires : Connaître les problèmes physiques et mécaniques conduisant à des EDP d'ordre 2,
- Transversales : savoir interpréter physiquement les résultats obtenus.

### Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures totales présentielles : 53h réparties en 12 séances de cours de 1h 45, 11 séances de TD de 2h, 2 séances de TP de 3h, un projet en autonomie avec présentation de 4h - Travail personnel attendu : 60 h – 80 h.

**Évaluation :** Évaluation sur la base de contrôles continus écrits, TP et projet.

**Responsables.** Fatiha Bouchelaghem, Diana Baltean-Carlès, Maîtres de Conférences, Institut Jean Le Rond d'Alembert

## Méthodes mathématiques et numériques pour la mécanique 2

Niveau L3 - Semestre S5 - Crédits 6 ECTS - Code LU3ME008 – Mention Licence mécanique

### Présentation pédagogique.

Cette unité d'enseignement vise à introduire quelques notions fondamentales de résolution numérique et analytique des problèmes de la mécanique modélisés par des équations aux dérivées partielles. L'unité d'enseignement est divisée en Cours, Travaux Dirigés, Travaux Pratiques (utilisant les langages de programmation C et Fortran) et un projet numérique à réaliser en autonomie.

### Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Chapitre 1: Différences finies 1D stationnaire et instationnaire
- Chapitre 2: Résolution des systèmes linéaires par des méthodes directes
- Chapitre 3: Résolution des systèmes linéaires par des méthodes itératives
- Chapitre 4: Résolution des EDP d'ordre 1 (caractéristiques, équation de transport)
- Chapitre 5: Forme canonique pour EDP d'ordre 2 hyperbolique, elliptique, parabolique
- Chapitre 6: Equation des ondes (solution d'Alembert homogène et non-homogène)
- Chapitre 7: Equation de la chaleur ou diffusion (solution fondamentale, fonction de Green, homogène et non-homogène)

**Pré-requis.** Les concepts de base enseignés dans les unités de mathématiques et de méthodes numériques de niveau L1 et L2: dérivation numérique, fonctions de plusieurs variables, calcul différentiel et intégral, équations différentielles.

### Références bibliographiques.

- G. H. Golub, G.A. Meurant : "Résolution numérique des grands systèmes linéaires", Edition Eyrolles, 1983.
- P. Lascaux, R. Théodor : "Analyse numérique matricielle appliquée à l'art de l'ingénieur", tom.1- 2, Edition Masson, 1986.
- R. Théodor : "Initiation à l'analyse numérique ", Edition Masson, 1989.
- J. P. Nougier : "Méthodes de calcul numérique ", Edition Masson, 1989.
- M. Crouzeix, A.L. Mignot : "Analyse numérique des équations différentielles", Edition Masson, 1989.
- P. G. Ciarlet : "Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation", Edition Masson, 1990.
- J. P. Demaillly : "Analyse numérique t équations différentielles", Edition Presses Universitaires de Grenoble, 1991.
- GH Golub, CF Van Loan, "Matrix Computation", 3rd Edition, books.google.com, 1996
- F. Jedrzejewski : "Introduction aux méthodes numériques", Edition Springer, 2001.
- Y. Saad, "Iterative Methods for Sparse Linear Systems", 2nd edition, SIAM , 2003
- Y. Pinchover, J. Rubinstein : "An introduction to partial differential equations", Cambridge, 2005
- W. Strauss : "Partial Differential Equations : An Introduction", Wiley Global Education, 2007
- H. Reinhard : "Equations aux dérivées partielles : fondements et applications", Dunod, 1991

**Ressources mises à disposition des étudiants.** Polycopié de cours et supports de présentation, sujets et corrigés des Travaux Dirigés et annales corrigées, quizz / QCM pour auto-évaluation (ou évaluation), sujets et corrigés Travaux Pratiques.

### Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

Concepts de base dans la résolution numérique d'un problème de mécanique stationnaire ou instationnaire 1D par la méthode de différences finies, allant de la discréttisation jusqu'à la résolution du système matriciel associé.

Concepts de base de l'analyse mathématique des équations aux dérivées partielles : classification, méthodes de résolutions classiques, propriétés des solutions, comparaison avec le résultat numérique.

### Compétences développées dans l'unité.

- Savoir analyser une équation aux dérivées partielles : type d'équation, méthode de résolution, propriétés des solutions, problème bien posé, unicité, stabilité.
- Comprendre le développement analytique des solutions de problèmes fondamentaux de la mécanique : diffusion (ou chaleur) et ondes. Faire le lien avec le comportement physique attendu via les connaissances acquises et la simulation numérique.
- Savoir écrire un programme de résolution par différences finies d'un problème aux limites instationnaire/stationnaire 1D.
- Savoir implémenter la résolution d'un système linéaire par des méthodes directes et itératives.

### Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures totales présentes : 53h réparties en 12 séances de cours de 1h 45, 11 séances de TD de 2h, 2 séances de TP de 3h, un projet en autonomie avec présentation de 4h - Travail personnel attendu : 60 h – 80 h.

**Évaluation.** Évaluation sur la base de contrôles continus écrits, TP et projet

**Responsables.** Anca Belme, Diana Baltean-Carlès, Catherine Weisman, Maîtres de Conférences, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université. Han Zhao, Professeur, Sorbonne Université, LMT ENS Paris Saclay

## Mécanique des fluides

Niveau L3 - Semestre S6 - Crédits 6 ECTS - Code LU3ME007 – Mention Licence Mécanique

### Présentation pédagogique.

Cet enseignement s'inscrit dans la continuité de l'enseignement de Mécanique des Milieux Continus (MMC) du Semestre S5. Il vise à approfondir et appliquer les connaissances acquises en MMC à l'étude plus particulière des écoulements de fluides. L'objectif est de donner aux étudiants des bases solides sur les lois de conservation générales applicables à l'étude des écoulements de fluides. Le contexte est volontairement limité aux écoulements monophasiques d'une substance pure et étudie les différentes approximations rencontrées (incompressible, anélastique, compressible).

### Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Introduction à la mécanique des fluides (exemples d'applications, problèmes rencontrés). Lois de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie) et de comportement (viscosité et conductivité thermique). Equations de Transport Dérivées (énergie cinétique, température statique, entropie – Lois intégrales de conservation (poussée, traînée, moment). Vitesse du son et nombre de Mach.
- Écoulements incompressibles : Simplification des équations de Navier-Stokes - équation de la température en écoulements incompressibles et approximation anélastique– Exemples de Solutions Exactes – Similitude (Nombres de Reynolds, Strouhal, Froude, ...) - Couche limite sur plaque plane (Approximation de Prandtl, solution de Blasius, épaisseurs intégrales et leur relation au coefficient de frottement)
- Écoulements compressibles : Rappels de thermodynamique et hypothèse d'équilibre local - Grandeur thermodynamiques statiques et totales - Échauffement aérodynamique - Exemples de Solutions Exactes (Couette compressible, structure interne d'une onde-de-choc) – Écoulements compressibles quasi-1D.
- Travaux pratiques numériques : illustrations et analyses de problèmes par des solutions numériques d'écoulements réels.

**Pré-requis minimum.** Les connaissances et compétences développées dans le cours de bases de mécanique des milieux continus (semestre S5, niveau L3) et dans le cours de mécanique des fluides de niveau L2, ainsi que celles en mathématiques (analyse vectorielle, fonctions de plusieurs variables, équations aux dérivées partielles).

### Références bibliographiques.

- S. Candel : Dynamique des Fluides, Masson, Paris, 1990.

**Ressources mises à disposition des étudiants.** Sujets de travaux dirigés et de travaux pratiques numériques.

### Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Connaissances des lois et des équations générales de la mécanique des fluides ; lien avec les connaissances acquises en mécanique des milieux continus.
- Notions de similitude ; opérateurs vectoriels et notation indicelle.

### Compétences développées dans l'unité.

- Savoir modéliser un problème simple de mécanique des fluides (hypothèses, équations et conditions aux limites).
- Savoir mettre en œuvre les connaissances pour la résolution de problèmes simples de mécanique des fluides.
- Savoir analyser les solutions (théoriques et numériques), interpréter les résultats de façon critique et les hypothèses formulées.

### Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentes totales : 58 h réparties en 26 h de cours, 26 h de travaux dirigés et 6 h de travaux numériques. Travail personnel attendu : 60 h – 80 h.

**Évaluation.** Évaluation sur la base de deux examens écrits de deux heures (écrit 1/30, écrit 2 / 40) et compte-rendu de travaux pratiques numériques (/30).

**Responsables.** Mme I. Vallet et G. Gerolymos

## Structures élastiques

Niveau L3 - Semestre S6 - Crédits 6 ECTS - Code LU3ME006 – Mention : Licence Mécanique

### Présentation pédagogique.

Cette unité d'enseignement a pour objectif de compléter, approfondir et mettre en application les concepts de la Mécanique des Milieux Continus (dans la continuité de l'unité de bases des milieux continus du semestre S5) pour des milieux solides. Les méthodes de résolutions de problèmes d'élasticité tridimensionnelle seront en particulier détaillées (approche déplacement, approche contrainte, déformations planes, contraintes planes) et leurs solutions analysées (traction, torsion, flexion). L'accent sera mis sur la formulation des équations et conditions aux limites (solutions exactes, approchées, principe de Saint-Venant, unicité, en lien avec le cours d'équations aux dérivées partielles). La seconde partie du cours sera consacrée à une introduction à la théorie des poutres. Les équations statiques et cinématiques qui régissent les structures poutres droites élastiques linéaires seront établies et illustrées par différentes applications. Les méthodes énergétiques (théorèmes de Castigliano, Ménabréa) seront présentées et appliquées à la résolution de structures hyperélastiques.

### Contenu de l'Unité d'Enseignement

- Élasticité tridimensionnelle : Formulation et méthodes de résolution de problèmes d'élasticité linéarisée tridimensionnels. Contrainte et déformation planes. Problèmes classiques traction, flexion, torsion.
- Statique des Poutres : Modèle géométrique, modélisation des efforts extérieurs et intérieurs, équations locales d'équilibre
- Cinématique des poutres et Lois de comportement : Cinématique, déformation, Théorie naturelle (Timoshenko) - Hypothèse de Bernoulli, Relations de comportement, contraintes.
- Méthodes d'énergétique - Structures hyperstatiques : Energie de déformation élastique, théorème de Castigliano et application au calcul de déplacements, Théorème de Ménabréa et applications aux structures hyperstatiques.
- Travaux pratiques expérimentaux : Étude d'un tube cylindrique sous pression, Essais de flexion trois points, Mesure de photoélasticité, Analyse des résultats et confrontation aux solutions théoriques tridimensionnelles et poutres.

**Pré-requis minimum.** Les connaissances et compétences développées dans l'unité de bases de mécanique des milieux continus, niveau L3, semestre S5, ainsi que des connaissances mathématiques en analyse vectorielle et équations aux dérivées partielles (unités de mathématiques des semestres S5 et S6, niveau L3).

### Références bibliographiques.

- G. Duvaut, Mécanique des Milieux Continus, Dunod 1990.
- H. Dumontet, et al., Exercices corrigés de mécanique des milieux continus, Dunod 1998.
- S. Forest et al., Cours de Mécanique des Milieux Continus, École des Mines de Paris, (polycopié en ligne sur le net).
- S.P. Timoshenko, Résistance des matériaux, Tomes 1 et 2. Dunod, Paris, 1990.
- J. Salençon, Mécanique des Milieux Continus, Tomes 1 et 2, Collection Ellipse, 2005, (polycopié de cours en ligne).

### Ressources mises à disposition des étudiants.

Polycopié et supports de cours, sujets de travaux dirigés et annales corrigées. Supports matériels des travaux pratiques.

### Connaissances scientifiques développées dans l'unité

- Connaissances avancées dans la formulation et la résolution de problèmes d'élasticité linéaire tridimensionnelle.
- Connaissances de base en théorie des poutres.

### Compétences développées dans l'unité (parfois dénommées compétences techniques ou savoir faire)

- Savoir formuler les équations et conditions aux limites de problèmes classiques de structures élastiques linéaires tridimensionnelles et élancées (poutres droites, portiques).
- Savoir mettre en place une méthode de résolution de ces problèmes.
- Capacité à analyser les solutions de ces problèmes.
- Connaître les limites des modélisations proposées et la qualité des solutions construites.
- Savoir effectuer des mesures avec différents capteurs lors des Travaux Pratiques expérimentaux, analyser des images.
- Savoir analyser les sources d'incertitudes et interpréter les résultats de façon critique au regard de la théorie.
- Savoir rédiger un rapport d'essai.
- Respecter une procédure expérimentale.

### Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentes totales : 56 heures réparties en 24 h de cours, 30 h de travaux dirigés et 6 h de travaux pratiques expérimentaux. Travail personnel attendu : 60 h – 80 h.

**Évaluation.** L'évaluation se fait sur la base de deux épreuves écrites de deux heures (écrit 1 / 20, écrit 2 / 60) et un rapport de TP ( / 20).

**Responsables.** A. Fernandes et D. Kondo

## Bases de la mécanique des milieux continus

Niveau L3 - Semestre S5 - Crédits 6 ECTS - Code LU3M3004 - Mention Licence mécanique

### Présentation pédagogique.

Cet enseignement a pour objectif de fournir les concepts de base de la mécanique des milieux continus (indispensables pour la poursuite d'études en mécanique) et de les illustrer sur des exemples de comportements simples de milieux fluides et solides.

### Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Introduction au calcul tensoriel ; utilisation du calcul indiciel.
- Représentation des milieux continus : échelles, descriptions lagrangienne et eulérienne.
- Tenseurs des déformations, des taux de déformation.
- Équations de conservation : conservation de la masse, conservation de la quantité de mouvement et introduction du tenseur des contraintes.
- Élasticité linéaire : loi de comportement, équation de Navier et résolution de problèmes élémentaires.
- Fluides newtoniens : loi de comportement, équation de Navier-Stokes, applications à des exemples d'écoulements incompressibles parallèles.
- Travaux pratiques expérimentaux fluide : Viscosimètre à écoulement, Viscosimètre à bille et Rhéométrie.
- Travaux pratiques expérimentaux solide : Caractérisation ultrasonore des constantes d'élasticité. Mesure de modules d'élasticité par essais de traction et de torsion. Essais de flexion trois points.

**Pré-requis minimum.** Principes fondamentaux de la statique et de la dynamique des fluides et des solides. Fonctions de plusieurs variables et opérateurs vectoriels (gradient, divergence, rotationnel).

### Références bibliographiques.

- G. Duvaut, Mécanique des Milieux Continus, Dunod, 1989.
- H. Dumontet & al., Exercices corrigés de Mécanique des Milieux Continus, Dunod, 1989.
- P. Germain, P. Muller, Introduction à la Mécanique des Milieux Continu, Masson, 1994.
- J. Coirier, Mécanique des Milieux Continus : cours et exercices corrigés, Dunod, 2001.
- J. Salençon, Cours de Mécanique des milieux Continus, Edition Ellipse, École Polytechnique, 1995.

### Ressources mises à disposition des étudiants.

Polycopiés de cours et supports de présentation. Travaux dirigés, annales corrigées, tests de pré-requis, guide de rédaction de compte-rendus de travaux pratiques.

### Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Concepts de base en mécanique des milieux continus : modélisation des déformations, des efforts, lois de comportement simples et méthodes de résolution, solutions classiques

### Compétences développées dans l'unité.

- Capacité à mobiliser les concepts et connaissances théoriques pour comprendre un problème simple de mécanique des milieux continus solides (élasticité linéaire) et fluides (newtonien) et le mettre en équations.
- Capacité à mettre en œuvre des méthodes de résolution analytiques de problèmes simples de mécanique des milieux continus.
- Capacité à analyser et interpréter les solutions en termes de déplacement, déformations, contraintes (milieu solide) ou vitesses, taux de déformation et contraintes (milieu fluide).

### Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentes totales : 60 h réparties en 22 h de CM, 26 h de TD, 12 h de TP expérimentaux.

Travail personnel attendu : 60 – 90 h.

**Évaluation.** Évaluation sur la base de deux examens écrits de deux heures (écrit 1 /20, écrit 2 / 50) et des Travaux pratiques (/30, compte-rendu, implication).

**Responsable.** D. Kondo, Professeur, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université