

Sorbonne Université CMI4 S8

Liste of Teaching Units

Core Units

- Méthodes numériques en dynamique
- Anglais ou autre langues
- Stage
- Innovation processes

Parcours Mécanique des Solides : Matériaux et Structures (MS2)

- Structures élancées
- Plasticité et analyse limite
- Pratiques de codes de calcul de structures, applications
- Options : Matériaux composites et milieux hétérogènes ou Calcul et dimensionnement de structures

Parcours Mécanique des Fluides et Applications (MF2A)

- Bifurcations et instabilités en mécanique des fluides
- Mécanique des fluides compressibles et aérodynamique incompressible
- Ondes et écoulements en milieu naturel
- Transferts thermiques en mécanique des fluides
- Options : Méthodes numériques avancées / Du microscopique au Macroscopique

Parcours Acoustique (Acou)

- Introduction au traitement du signal audio
- Compléments en acoustique
- Systèmes linéaires et projets en acoustique
- Projet / Complément au stage

Parcours Énergétique et Environnement (EE)

- Ingénierie des énergies renouvelables
- Combustion - Énergétique et impact environnemental
- Turbulence et transferts

Parcours Computational Mechanics (Comp Mech)

- Structures élancées
- Introduction to hydrodynamic instabilities
- Composite Structures
- Numerical methods and simulation in fluid mechanics

Parcours Systèmes Avancées et Robotique (SAR)

- Modélisation et simulation robotique
- ROS et Robotique expérimentale
- Conception, Dessin Assistés par Ordinateur CAO-DAO
- Machine Learning
- Programmation objet C++

UE – Cycle Master – CMI 4 - S8		Code	CM	TD	TP	AMS	Heures Présence	Travail Perso	ECTS	
CMI4 S8 Enseignements de parcours	Méthodes numériques pour la dynamique	MU4MEM2	8		20	30	28	50-60	3	
	Anglais ou autre langues	MU4LV002		12		12	24	20-30	3	
	Stage	MU4MEST1						35-40	6	
	Innovation processes	MU4SP011	20			10	20	40-50	6 *	
	Parcours Mécanique des Matériaux et Structures (MMS)									
	Structures élancées	MU4MES03	24	24	3		51	60-80	6	
	Plasticité et analyse limite	MU4MES04	26	26			52	60-80	6	
	Pratiques de codes de calcul de structures, applications	MU4MES06			28	30	28	40-60	3	
	Options : Matériaux composites et milieux hétérogènes ou Calcul et dimensionnement de structures	MU4MES07 MU4MES08	10 12	10 12	6		26 24	30-40 30-40	3	
	Parcours Mécanique des fluides (MF2A)									
	Bifurcations et instabilités en mécanique des fluides	MU4EF08	12	12			24	30-40	3	
	Méca fluides compressibles, aérodynamique incomp.	MU4EF03	24	24	6		54	60-80	6	
	Ondes et écoulements en milieu naturel	MU4EF04	12	12			24	30-40	3	
	Transferts thermiques en mécanique des fluides	MU4EF06	15	15			28	30-40	3	
	Options : Méthodes Numériques Avancées / Du microscopique au macroscopique	MU4EF07 MU4EF05	15 14	15 14			30 28	30-40 30-40	3 3	
	Parcours Acoustique (Acou)									
	Introduction au traitement du signal audio	MU4MEA05	12		16		28	30 - 40	3	
	Compléments en acoustique	MU4MEA03	16	16	18		50	70 - 90	6	
	Systèmes linéaires et projets en acoustique	MU4MEA04	27				60	27	80 - 100	6
	Projet / Complément au stage	MU4MEA06							75-210	3
	Parcours Énergétique et Environnement (EE)									
	Ingénierie des énergies renouvelables	MU4MEE02	27	10	26		63	60-80	6	
	Combustion - Énergétique et impact environnemental	MU4MEE04	24	20			6	50	60-80	6
	Turbulence et transferts	MU4MEE06	32	26			58	70-90	6	
Parcours Computational Mechanics (Comp. Mech.)										
Structures élancées	MU4MES03	24	24	3		51	60-80	6		

	Bifurcations et instabilités en mécanique des fluides	MU4EF08							3
	Matériaux composites et milieux hétérogènes	MU4MES07	10	1	6		26	30-40	3
	Méthodes numériques en dynamique	MU4MEM2	8		20	30	28	50-60	3
	Mécanique expérimentale								
	Parcours Systèmes Avancées en Robotique (SAR) ÷								
	Modélisation et simulation robotiques	MU4RBR05	29	6	21		56	60-80	6
	ROS et Robotique expérimentale	MU4RBR04	7		44		51	60-80	6
	Conception, Dessin Assistés par Ordinateur CAO-DAO	MU4RBR02	12	12	8		30	30-40	3
	Programmation objet C++	MU4RBI02	8	6	16		30	30-40	3
	Machine Learning	MU4RBI05	14	15			29	30-40	3
Total Tronc commun 12 ECTS + 6* - Total Parcours 18 / 21 ECTS - Total CMI4 - S8 : 30 / 33									
ECTS + 6 *									

* Unités hors contrat (ne rentrant pas dans le calcul de la moyenne du semestre (figurent au supplément au diplôme)

÷ Parcours SAR Tronc commun adapté : Programmation objet C++ (3 ECTS) remplace l'UE du tronc commun Méthodes numériques en dynamique MU4MEM2 (3 ECTS)

Méthodes numériques pour la mécanique

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 3 ECTS - Code MU4MEM02– Mention Master de Mécanique

Présentation pédagogique.

L'objectif de cette unité d'enseignement est de compléter la formation en méthodes numériques de l'étudiant dans le domaine d'expertise de son parcours type de master. L'unité comporte une partie applicative sous forme de travaux pratiques guidés et une partie de mise en situation avec un projet réalisé en binôme et en autonomie.

A titre d'exemple, dans le parcours Mécanique des Solides : matériaux et structures, l'accent est mis sur les schémas itératifs de discrétisation temporelle pour des problèmes évolutifs du premier et second ordre en temps et le couplage avec une discrétisation par éléments finis.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Introduction : Position du problème d'intégration temporelle pour des problèmes paraboliques (équation de la chaleur) et hyperboliques (dynamiques des structures).
- Cas parabolique: systèmes du premier ordre.
 - Introduction d'un schéma aux différences finies. Exemple à 1 ddl, Euler avant.
 - Stabilité d'un schéma: définitions et exemple d'Euler avant scalaire.
 - Méthode du trapèze généralisée (θ -méthode): cas scalaire. Propriétés et conditions de convergence (exercice). Crank-Nicolson.
 - Méthode du trapèze généralisée: cas vectoriel. Implémentation. Méthodes implicites et explicites. Réduction au cas scalaire par projection sur base modale.
- Cas hyperbolique: systèmes du second ordre.
 - Méthodes de la famille de Newmark. Présentation et implémentation.
 - Conditions de stabilité
 - Erreurs d'amplitude et de périodicité
 - Résumé: Méthode de l'accélération moyenne, accélération linéaire et différence finies centrée.
 - Cas de la barre en traction discretisée aux éléments finis. Condition de Courant.
- Projet disciplinaire

Pré-requis. Cours d'analyse des structures par éléments finis (MU4MES01), méthodes numériques et calcul scientifique de 3^e et 4^e année (LU3ME005, MU4MEN01).

Références bibliographiques.

Pour le parcours Mécanique des Solides : matériaux et structures

- M. Bonnet et A. Frangi, Analyse des solides déformables par la méthode des éléments finis, Ellipses, 2007.
- T. Hughes, The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis, Dover, 1987.
- M. Géradin, D. J. Rixen, Théorie des vibrations: application à la dynamique des structures, Masson, 1996.

Ressources mises à disposition des étudiants. Logiciels en salles de TP et en salle libre service. Documentations des logiciels.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Méthodes numériques relatives à la spécialité disciplinaire.

Compétences développées dans l'unité.

- Développer l'autonomie face à la simulation numérique d'un problème de mécanique.
- Savoir implémenter des méthodes numériques et les apprécier en termes de stabilité, précision, convergence, ...
- Savoir présenter des méthodes et résultats numériques.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 28 h réparties en 8 h de cours et 20 h de TD/TP sur machine.

Travail personnel attendu : 50 h – 60 h

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen écrit sur machine de 1 heure (/25) et d'un projet (/75) réalisé en binôme évalué sur le rapport (par exemple sous forme Python notebook) et la restitution orale (5- 10 minutes par binôme).

Responsables. M. A. Fernandez, C. Maurini.

Stage d'application

Niveau CMI4 - **Semestre** S8 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU4MEST1 - **Mention** Master Mécanique

Présentation pédagogique.

Ce stage d'application en fin de CMI4 est d'une durée de 10 à 12 semaines. L'étudiant met en oeuvre ses connaissances et compétences acquises dans les enseignements sur un sujet donné qui s'inscrit dans une problématique industrielle ou de recherche et les approfondit dans son domaine de spécialité.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Le stage est réalisé en entreprise ou en laboratoire de recherche en France ou à l'étranger. La recherche de ce stage est effectuée par l'étudiant lui-même. Il est accompagné dans cette recherche dans le cadre de l'unité d'orientation professionnelle (MU4MEO11).

Pré-requis minimum. Le corpus des enseignements suivis depuis le début du cursus.

Ressources mises à disposition des étudiants.

- Liste des stages des promotions antérieures.
- Divers documents, bases de données, ateliers mis en place dans le cadre de l'unité d'Orientation professionnelle et service de la Faculté dont une base de référencement d'entreprises (Kompass).
- Les étudiants ont accès à la plateforme du réseau national Figure destinée aux étudiants des CMI pour les accompagner dans leurs recherches de stage ou d'emploi, ou tout simplement pour s'informer de l'état du marché du travail
- <https://cmi-figure.jobteaser.com> <https://www.youtube.com/watch?v=AFQiQKVXtuo>
- Procédures de validation, conventions de stage.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Propres à chaque stage selon le domaine d'activités de l'entreprise / laboratoire et les missions confiées.

Compétences développées dans l'unité.

- Savoir participer à un travail d'équipe, prendre des initiatives, savoir se situer et acquérir de l'autonomie.
- Savoir mettre en oeuvre ses connaissances et les appliquer à un sujet nouveau.
- Être capable de respecter un cahier des charges, des délais.
- Être responsable de la qualité de son travail.
- Prendre du recul par rapport à son expérience.
- Savoir communiquer sur son travail à l'écrit et oral.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel. Dix à douze semaines de stage à temps plein entre mai et fin août.

Évaluation.

Rapport de stage (/25 entre 25 à 30 pages), évaluation des tuteurs (/25), soutenance orale(/25 , 15 minutes d'exposé, 15 minutes de questions), réalisation d'un poster (/25).

Responsables. Responsables des parcours et de l'enseignement d'orientation professionnelle des parcours, M. Y. Berthaud et Mme H. Dumontet (responsables du CMI).

Innovation processes

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 3 ECTS - Code MU4SP011- Mention Master

Présentation pédagogique.

Ce cours offre une compréhension des processus d'innovation. Il présente les travaux qui ont été faits sur ce sujet en histoire, économie et sociologie. Il s'intéresse tout particulièrement à trois questions : quels sont les déterminants de l'innovation ? Comment l'innovation est-elle organisée et gouvernée ? Comment les régions innovantes fonctionnent-elles ? Le cours est enseigné en anglais.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Introduction ; les modèles de l'innovation
- Théories du changement technique
- Théories du changement technique
- Le changement technique vu par les économistes
- Les systèmes nationaux de l'innovation ; le cas français
- Les régions innovantes ; la Silicon Valley
- La Route 128

Pré-requis. Le corpus des enseignements d'ouverture sociétale et culturelle du parcours CMI suivis depuis la 1^e année.

Références bibliographiques. S. Berger "Reforms in the French Industrial Ecosystem.", 2015. Bijker, Wiebe, Hughes, Thomas, Trevor, The Social Construction of Technological Systems, Cambridge, MIT Press, 1987. Block and al. "Where do Innovations Come from? Transformations in the United States Economy, 1970-2006," *Socio-Economic Review* , 7, 459-483, 2009. S. Broca, Utopie du logiciel libre: Du bricolage informatique à la réinvention sociale, Editions le passager clandestin, 2013. M. Callon, "The Sociology of the Actor-Network: The Case of the Electric Vehicle," in Michel Callon, John Law and Arie Rip, eds. Mapping the Dynamics of Science and Technology . Houndmills: Macmillan, 1986. F. Caron, La Dynamique de l'innovation, Gallimard, 2010. H. Chesbrough, Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology, Harvard Business School Press, 2003. D. Cutolo, M. Kenney, "The Emergence of Platform-Dependent Entrepreneurs: Power Asymmetries, Risk, and Uncertainty," SSRN, 2019. P. David, "Clio and the Economics of QWERTY." *American Economic Review* , 332-337, 1985. C. Greenhalgh, M. Rogers, Innovation, Intellectual Property, and Economic Growth, Princeton University Press, 2010. R. Heilbroner, "Do Machines Make History?" *Technology and Culture* , pp. 335-345, 1967. D. Hounshell, J. Smith, Science and Corporate Strategy: DuPont R&D, 1902-1980, Cambridge University Press, 1988. T. Hughes, Networks of Power: Electrification in Western Society (1880-1930), Johns Hopkins University Press, 1983. A. Jaffe, J. Lerner, Innovation and its Discontents . Princeton: Princeton University Press, 2004. D. Kaiser, Becoming MIT: Moments of Decision . Cambridge, MIT Press, 2012. M. Kenney, Understanding Silicon Valley: The Anatomy of an Entrepreneurial Region, Stanford University Press, 2000. M. Kenney, D. Mowery, Public Universities and Regional Growth, Stanford University Press, 2014. D. Kirkpatrick, The Facebook Effect . New York, Simon and Schuster, 2010. M. Lallement, L'âge du faire : Hacking, travail, anarchie . Paris, Le Seuil, 2015. N. Lamoreaux, D. Raff, P. Temin, Learning by Doing in Markets, Firms, and Countries, University of Chicago Press, 1999. N. Lamoreaux, K. Sokoloff, D. Sutthisphisal, "Patent Alchemy." *Business History Review* , 87, 3-38, 2013. B. Latour, Aramis ou l'amour des techniques Paris, La Découverte, 1992. S. Leslie, The Cold War and American Science, Columbia University Press, 1992. D. Mowery, N. Rosenberg, Technology and the Pursuit of Economic Growth, Cambridge University Press, 1989. D. Mowery, "Plus ça change : Industrial R&D in the 'Third Industrial Revolution'", *Industrial and Corporate Change* , 18, 2009. M. O'Mara, The Code: Silicon Valley and the Remaking of America . New York: Penguin, 2019. E. Raymond, The Cathedral and the Bazaar: Musings on Linux and Open Source by an Accidental Revolutionary, O'Reilly Media, 1999. N. Rosenberg, "Technological Change in the Machine Tool Industry, 1840-1910." *The Journal of Economic History* 1963. N. Rosenberg, Inside the Black Box. Technology and Economics . New York: Cambridge University Press, 1982. R. Rosenbloom, W. Spencer, Engines of Innovation: U.S. Industrial Research at the End of an Era, Harvard Business School Press, 1996. A. Saxenian, Regional Advantage: Culture and Competition in Silicon Valley and Route 128. Harvard University Press, 1994. E. Von Hippel, The Sources of Innovation . New York: Oxford University Press, 1988.

Ressources mises à disposition des étudiants. Supports des cours magistraux. Liste de livres.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Théories de l'innovation.
- Connaissance des meilleurs travaux sur les systèmes nationaux d'innovation et les régions innovantes.

Compétences développées dans l'unité.

- Perfectionnement de la connaissance de l'anglais.
- Amélioration de l'expression écrite.
- Formes de raisonnement pratiquées dans les sciences sociales.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel. Heuresérielles totales : 20 heures de cours. Travail personnel 40-50 h.

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'une note de compte-rendu de lecture d'un livre sur l'innovation (en anglais ou en français, /50) et d'un Contrôle écrit (en anglais, /50).

Responsables. C. Lecuyer

Parcours Mécanique des Solides

Matériaux et Structures (MS2)

Structures élancées

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 3 ECTS - Code MU4MES03 – Mention Master de Mécanique

Présentation pédagogique.

L'objectif de ce cours est d'initier les étudiants à la théorie des poutres et des plaques élastiques linéaires et non linéaires et à l'utilisation des approches variationnelles en mécanique des structures, avec une introduction aux non-linéarités géométriques et aux problèmes de stabilités.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Exemples de structures élancées, classification et introduction à leur modélisation. Introduction aux calculs des variations : problème modèle de calcul des variations, études de fonctionnelles, minimisation de fonctionnelles et équation d'Euler-Lagrange
- Barres, fils et poutres
 - Barres en traction/compression et poutres en flexion, modèles linéaires : rappel de la cinématique et énergie potentielle, théorème de minimum de l'énergie potentielle, traitement des différents types de conditions aux limites, traitement des discontinuités
 - Structures monodimensionnelles avec non-linéarités géométriques : théorie non-linéaire des fils et des poutres. Stabilité d'un équilibre, bifurcation, flambement. Approximation par des modèles discrets.
- Plaques et membranes
 - Formulation variationnelle pour le problème de plaques linéaires : modèles de Love-Kirchhoff et de Mindlin. Solutions exactes, solutions par séries et solutions approchées.
 - Plaques faiblement non-linéaires : modèle de Von-Karman. Flambement des plaques, modèles réduits, exemples de plaques multistables.

Pré-requis. Bases de mécanique des milieux continus et résistance des matériaux développées dans les enseignements de 3^e année (LU3ME004, LU3ME006) et de 4^e année (MUEM01). Calcul différentiel, équations aux dérivées partielles et formulations faibles (LU3ME003).

Références bibliographiques.

- J.J. Marigo, Mécanique des Milieux continus I, Edition Ecole Polytechnique, 2018.
- Q.S. Nguyen, Stabilité et mécanique non-linéaire, Edition Hermès, 2000
- J.N. Reddy, Theory and analysis of elastic plates, Edition Taylor & Francis 1999.
- B. Audoly and Y. Pomeau, Elasticity and geometry: from hair curls to the nonlinear response of shells, Oxford University Press
- E.H. Mansfield, The bending and stretching of plates, Cambridge University Press, 1989

Ressources mises à disposition des étudiants. Cours, sujet de TD et corrigés, Annales.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Modèles classiques de poutres (barres, fils, poutres) et de plaques linéaires et non linéaires.
- Méthodes classiques de résolution.
- Introduction aux non linéarités géométriques : flambement et perte d'unicité des solutions, stabilité de structures.
- Formulations variationnelles d'un problème de plaque.

Compétences développées dans l'unité.

- Savoir établir, manipuler des approches variationnelles dans différents cas pratiques et les comprendre.
- Savoir mettre en oeuvre les concepts, savoir formuler résoudre des problèmes classiques de poutres et plaques linéaires et non linéaires.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 51 h réparties en 24 heures de cours, 24 heures de TD, 3 h de TP.

Travail personnel attendu : 60 h – 80 h.

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base de deux écrits d'une durée de 2 h chacun.

Responsables. M. A. Fernandes, C. Maurini

Plasticité et Analyse limite

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 6 ECTS - Code MU4MES04 – Mention Master de Mécanique

Présentation pédagogique.

L'objectif de ce cours est présenter les modèles classiques de comportements plastiques et viscoplastiques des matériaux solides (métaux, sols, bétons,...) en petites et grandes transformations et d'utiliser ce formalisme pour le calcul des charges limites supportables par une structure.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Comportement élasto-plastique en petites transformations.
- Problèmes d'élasto-plasticité en petites transformations.
- Comportement élasto-plastique en grandes transformations.
- Théorie des charges-limites.
- Comportement et problèmes viscoplastiques.

Pré-requis. Cours de mécanique des milieux continus de 3^e (LU3ME004, LU3ME006) et 4^e année (MU4MEM01), ainsi que le cours de comportement des matériaux de 4^e année (MU4MES02).

Références bibliographiques.

- P. De Buhan, Plasticité et Calcul à la Rupture, Presses des Ponts et Chaussées, 2007.
- J. Salençon, Calcul à la Rupture et Analyse-Limite, Presses Ponts et Chaussées, 1983.

Ressources mises à disposition des étudiants. Cours, sujet de TD et corrigés, Annales.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Formulations de lois de comportement non linéaire élasto-plastique en petites et grandes transformations, viscoplastiques.
- Théorie des charges limites.

Compétences développées dans l'unité.

- Savoir identifier le comportement de matériaux solides non linéaires classiques, formuler la loi de comportement.
- Calculer des encadrements des charges supportables par une structure au moyen d'hypothèses à formuler.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 52 h réparties en 26 heures de cours et 26 heures de TD.

Travail personnel attendu : 60 h – 80 h.

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen écrit de 3 heures.

Responsables. M. J. B. Leblond

Pratiques de codes de calcul de structures et applications I

Niveau CMI4 - **Semestre** S8 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU4MES06 – **Mention** Master de Mécanique

Présentation pédagogique.

L'objectif de ce cours est l'apprentissage et la pratique d'un code de calculs par éléments finis utilisé pour la simulation de problèmes industriels en mécanique des structures. Cet apprentissage se fait sur le code industriel ABAQUS, permettant en particulier aux étudiants d'acquérir des premières compétences opérationnelles recherchées pour leur stage industriel. Il s'inscrit dans la continuité du cours d'analyse de structures par éléments finis de 4^e année (MU4MESO1).

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Apprentissage de l'interface graphique (Abaqus CAE) et du langage de commande.
- Techniques de maillage en 2D et 3D.
- Création et manipulation des objets liés à la technique des EF.
- Applications à des exemples de thermique stationnaire en 2D et 3D.
- Applications à des exemples d'élasticité statique en 2D et 3D (modèles continus et structures élastiques).
- Algorithmes instationnaires.

Pré-requis. Analyse des structures par éléments finis de 4^e année (MU4MESO1). Bases de la mécanique des milieux continus et des structures de 3^e année (LU3ME004, LU3ME006) et de 4^e année (MU4MEM01, MU4MES02). Analyse, Algèbre linéaire et méthodes numériques de 3^e année (LU3ME005) et 4^e année (MU4MEN01).

Références bibliographiques.

- M. Bonnet et A. Frangi, Analyse des solides déformables par la méthode des éléments finis, Éditions de l'École Polytechnique, 2006.

Ressources mises à disposition des étudiants. Logiciel en salles de TP et en salle libre service. Tutoriaux, documentations des logiciels.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Solutions numériques de problèmes classiques de thermique, élasticité statique.
- Structuration d'un code industriel
- Algorithmes instationnaires

Compétences développées dans l'unité.

- Mise en œuvre pratique de la théorie des éléments finis, (maillage 2D et 3D, manipulation d'objets)..
- Pratique opérationnelle d'un code de calcul industriel sur des problèmes simples
- Mise en œuvre de techniques numériques adaptées.
- Analyse critique des résultats.
- Rédaction de rapport de projet et le présenter.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiels totales : 28 heures de TP sur machine.

Travail personnel attendu : 40 h – 50 h.

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base du rapport et de la soutenance d'uni-projet.

Responsable. A. Fernandes

Matériaux composites et milieux hétérogènes

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 3 ECTS - Code MU4MES07 – Mention Master de Mécanique

Présentation pédagogique.

L'objectif de ce cours est l'étude des matériaux composites et des structures constituées de ces matériaux. On s'intéressera aux modèles et techniques pour l'analyse, la modélisation et le calcul en conception et dimensionnement des matériaux et structures composites.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Introduction : généralités sur les matériaux et les structures composites.

- Définition et classification ; constituants ; procédés de mise en forme ; architecture, structures composites.

Anisotropie en thermo-élasticité.

- Représentation mathématique des tenseurs de contraintes, déformations et de comportement: représentation cartésienne, notation de l'ingénieur et changement de repère ; symétries élastiques.

Calcul des propriétés macroscopiques d'un matériau composite

- Approches variationnelles en homogénéisation et bornes d'ordre 1.
- Loi de mélanges pour les couches orthotropes : des constituants aux propriétés macroscopiques d'une couche unidirectionnelle. Comportement thermo-élastique d'une couche orthotrope.
- Mécanismes de rupture et endommagement des matériaux composites.

Modélisation du comportement mécanique des plaques stratifiées et sandwich.

- Théorie classique des stratifiés et influence des stratifications sur les propriétés ; poutres stratifiées.
- Modèle de plaques stratifiées avec prise en compte du cisaillement transverse ; théorie des plaques sandwich.

Partie TP :

- Calcul d'homogénéisation sur différentes micro-structures.
- Analyse de composite stratifiés : calcul de différents empilements et étude de l'influence des séquences sur la réponse mécanique. Calculs éléments finis sous Castem, Abaqus.

Pré-requis. Mécanique des milieux continus de 3^e année (LU3ME004, LU3ME006) et de 4^e année (MU4MEM01). Comportement de structures élastiques (plaques, poutres) de 4^e année (MU4MES03).

Références bibliographiques.

- J.-M. Berthelot, Matériaux Composites, Éditions Technique & Documentation, 1999.
- J.N. Reddy, Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells, CRC Press, 2004.
- D. Hull, T. W. Clyne, An introduction to composite materials, Cambridge University Press, 1981.

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopiés de cours, sujets de travaux dirigés et annales corrigés. Logiciels en salles de TP et en salle libre service. Documentations des logiciels (Castem, Abaqus). Exemples des années précédentes.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Propriétés macroscopiques de matériaux composites stratifiés, homogénéisation, lois des mélanges.
- Comportement anisotrope.
- Modèles classiques de plaques stratifiées et plaques sandwich.

Compétences développées dans l'unité.

- Calcul de comportement effectif équivalent de matériaux.
- Simulation numérique et analyse de comportement de stratifié.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 26 heures réparties en 10 h de cours, 10 heures de TD et 6 heures de TP sur machine. Travail personnel attendu : 30 h – 40 h.

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen de 2 h et d'un oral (présentation projet/TP).

Responsables. Mme A. Vincenti, M. D.Kondo.

Calcul et dimensionnement de structures

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 3 ECTS - Code MU4MES08 – Mention Master de Mécanique

Présentation pédagogique.

L'objectif de ce cours est d'illustrer et d'appliquer les enseignements de résistance des matériaux, calculs de structures dans des applications relevant du domaine de la construction. Les étudiants sont initiés au calcul réglementaire de structures du génie Civil, introduits au vocabulaire technique et à la démarche de dimensionnement pratiqués dans un bureau d'études. Cette unité vise ainsi à préparer l'étudiant à des missions futures de stage dans ce secteur d'activités

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Introduction. Principes de calcul. Calcul réglementaire. Actions et sollicitations. Calcul du moment de flexion agissant sur une poutre d'un bâtiment pour un calcul à l'ELS (État Limite de Service) et puis l'ELU (État Limite Ultime).
- Principes généraux du béton armé. Aciers d'armature. Application de la loi de Hooke sur un exemple unidirectionnel puis calcul de contrainte induite par gradient thermique (structure mixte acier/composite).
- Matériau béton. Valeurs de calculs des propriétés des matériaux. Association béton-armature.
- Caractéristiques géométriques des sections + Exercice de calcul d'inertie homogénéisé d'une section de structure mixte bois/composites.
- Principes de dimensionnement vis-à-vis de sollicitations normales (traction compression). Exercice complet de dimensionnement d'un tirant en BA puis Exercice complet de dimensionnement d'un poteau en BA.
- Principes de dimensionnement vis-à-vis de la flexion simple puis exercice complet de dimensionnement d'une poutre en BA.
- Exercices de révision au choix des élèves et/ou rattrapage d'un éventuel retard sur le programme.

Pré-requis. Mécanique des milieux continus de 3^e année (LU3ME004, LU3ME006) et de 4^e année (MU4MEM01). Comportement de matériaux solides (MU4MES02), plasticité et analyse limite (MU4MES04), structures élastiques (plaques, poutres) de 4^e année (MU4MES03).

Références bibliographiques.

- C. Chèze, Résistance des matériaux - Dimensionnement des structures, Ellipses, 2012.
- F. Frey, Analyse des structures et milieux continus, Traité de Génie Civil de l'École Polytechnique de Lausanne, 2013.
- P. Guillemont, Aide-mémoire des ouvrages en béton armé : Règles générales - Poteaux, poutres, dalles, planchers-dalles, Dunod, 2018.

Ressources mises à disposition des étudiants. Supports de cours et sujets d'exercices.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Comportement des matériaux de construction, béton, acier, bois.
- Connaissances des bases du calcul de structures réglementaire, Eurocodes.

Compétences développées dans l'unité.

- Mise en application de connaissances de résistance des matériaux de matériaux hétérogènes dans un contexte applicatif.
- Calcul de d'éléments de structures.
- Dimensionnement de structures dans un cadre réglementaire.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 24 h réparties en 12 heures de cours, 12 heures de travaux dirigés.

personnel attendu : 30 h – 40 h.

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen écrit de 3 heures (/100).

Responsable. M. M. Quiertant, ingénieur de recherche IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux).

Parcours Mécanique des Fluides et Applications (MF2A)

Bifurcations et instabilités en mécanique des fluides.

Niveau CMI4 - **Semestre** S8 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU4MEF08

Mention Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications

Présentation pédagogique.

Les instabilités sont omniprésentes en mécanique des fluides : l'écoulement de l'air dans la couche limite autour d'une aile d'avion se déstabilise par la croissance d'ondes longitudinales et donne naissance à la turbulence. Le jet d'eau qui s'écoule d'un robinet se déstabilise en gouttelettes sous l'effet de la force de tension de surface, le sillage d'un cylindre se déstabilise pour donner naissance à une allée de tourbillons alternés. Lors de ce cours, nous introduisons les notions théoriques et les outils techniques qui nous permettent de décrire qualitativement et quantitativement ces phénomènes d'instabilité.

Le cours s'appuie largement sur des séances de travaux pratiques numériques afin de mettre tout de suite en pratique les connaissances de l'étudiant et de se familiariser avec les outils de la recherche en mécanique des fluides.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Panorama général des phénomènes d'instabilité. Notion de mode propre. Exemple en approximation de la lubrification avec l'instabilité d'un fluide lourd au dessus d'un fluide léger (Rayleigh-Taylor). Notion de relation de dispersion, de courbe neutre. Analyse harmonique d'équations modèles 1D : convection diffusion, équation des ondes, équation de réaction/diffusion, équation de Saint-Venant. Etude de stabilité sur des systèmes scalaires : attracteur de Lorenz. Instabilité de la couche de Mélange (Kelvin-Helmholtz). Formalisme de la stabilité en problème aux valeurs propres, représentation matricielle des systèmes dynamiques. Les méthodes numériques pour l'étude de la stabilité: discrétisation des équations, résolutions matricielles, valeurs propres/vecteur propres. Marche en temps des équations de la stabilité.

Pré-requis. Concepts de base de la mécanique des fluides de CMI3, notions de schémas numériques de CMI4

Références bibliographiques.

Sur la mécanique des fluides générale :

- Guyon, Hulin & Petit, 'Hydrodynamique Physique', EDP Sciences, 2012.

Sur les instabilités:

- F. Charru, 'Instabilités hydrodynamiques' EDP Sciences, 2007.

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours, notebooks Python, pages Basilisk.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Bilans de matière et quantité de mouvement. Conditions limites.
- Notions sur la stabilité

Compétences développées dans l'unité.

- Résoudre des systèmes d'équations et en déduire la stabilité.
- Programmer et comparer les solutions numériques et analytiques.
- Rédiger un rapport de projet

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heuresérielles totales : 24 h réparties en 12 h de CM, 12 h TD et un projet

Travail personnel attendu : 30 - 40 h.

Évaluation. Examen écrit (/80) projet (/20)

Responsables. M. P.Y. Lagrée, E. Sultan

Mécanique des fluides compressibles et aérodynamique incompressible

Niveau CMI4 - **Semestre** S2 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU4MEF03 -
Mention Master Mécanique des Fluides et Applications

Présentation pédagogique.

Cette UE présente les fondements de l'aérodynamique incompressible et compressible. L'accent est mis sur la détermination des écoulements autour de profils d'ailes, d'ailes d'envergure finies, via les distributions de vitesse, de pression et de température, les coefficients aérodynamiques et la prédiction des chocs. Les techniques d'approximation d'écoulements (singularités, théorie des profils minces, de la ligne portante, écoulements isentropiques, faisceaux de détente, ondes de choc, couches limites) sont présentées et mises en pratique de manière théorique, numérique et expérimentale sur des situations pertinentes au pré-dimensionnement en R&D dans les domaines aéronautique ou automobile. Une part importante est consacrée à la maîtrise numérique des équations présentées sous Python et leur mise en œuvre pratique.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Partie théorique :

- Efforts et coefficients aérodynamiques (pression, frottement, portance – théorème de Kutta-Joukowski, différents types de traînée)
- Profils d'aile (géométrie, nomenclature, profils NACA)
- Méthodes de calcul pour les écoulements incompressibles (présentation des différentes techniques)
- Théorie des profils minces (nappe tourbillonnaire, condition de Kutta, portance des profils symétriques et cambrés)
- Ailes d'envergure finie (ligne portante, écoulement et traînée induits)
- Suivant les années : effets visqueux (traînée visqueuse, décollement) / éoliennes / hélicoptères / drones
- Théorie monodimensionnelle des fluides compressibles : écoulements isentropiques, onde de choc droite (relations de saut, épaisseur), régimes d'écoulements dans une tuyère de Laval, écoulement de Fanno.
- Écoulements supersoniques 2D : ligne de Mach, ondes de choc obliques, écoulement de Prandtl-Meyer, interaction d'ondes et lignes de glissement (applications aux profils d'ailes supersoniques)
- Écoulements linéarisés subsoniques : potentiel des vitesses, correction de Prandtl-Glauert, règle de l'aire (application aux voilures)

Partie numérique :

- Etude d'un profil NACA23012 en soufflerie numérique (code compressible volumes finis)
- Performances aérodynamiques d'un profil d'aile supersonique (Notebook python applicatif de la partie théorique)

Partie expérimentale en soufflerie :

- Etude d'un profil NACA23012 : distribution de pression, polaires du profil, décollement de la couche limite.
- Transition laminaire/turbulent dans une couche limite par la mesure de son épaisseur et de profils de vitesse.

Pré-requis. Notions de cinématique des écoulements : champ de vitesse, fonction de courant, potentiel. Approximation écoulement parfait incompressible : théorèmes de Bernoulli. Notions de base de thermodynamique (1^{er} et 2^{ème} principes). Équations de Navier-Stokes.

Références bibliographiques. Anderson, Jr, J.D. (2001). *Fundamentals of aerodynamics*. 3rd edition, McGraw Hill. Comolet, R. (1976) *Mécanique expérimentale des fluides*. 2nde édition, Masson. Drela, M. (2014) *Flight vehicle aerodynamics*. 1st edition, MIT Press. Faure, Th. (2008) *Dynamique des fluides appliquée. Applications à l'aérodynamique*. Dunod.

Ressources mises à disposition des étudiants. Supports de cours, sujets de TD/TP, notebooks Python, annales, vidéos.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Principes de l'aérodynamique incompressible et sa modélisation
- Étude quantitative des écoulements prototypes compressibles non visqueux

Compétences développées dans l'unité.

- Compréhension des écoulements aérodynamiques
- Prévion des écoulements et des efforts aérodynamiques, pré-dimensionnement.

Compétences méthodologiques et transversales

- Démarche scientifique du modélisateur : utilisation des différents niveaux de modélisation dans le cadre aérodynamique
- Utilisation appropriée des outils numériques disponibles au niveau Master
- Étude expérimentale en soufflerie ; comparaison de résultats théoriques, numériques et expérimentaux.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiellees totales : 54 h réparties en 24 h de CM, 24 h de TD et 6h de TP.

Travail personnel attendu : 60 - 80 h.

Évaluation. Contrôle continu (/20), examen écrit (/40), travaux pratiques expérimentaux et numériques (/40).

Responsables. J.-C. Chassaing & I. Delbende.

Niveau CMI4 - **Semestre** S8 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU4MEF04 – **Mention** Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications

Présentation pédagogique.

Ce module vise à présenter un panorama des phénomènes hydrodynamiques environnementaux : écoulements dans les rivières, propagation des vagues et écoulements souterrains, ainsi que quelques notions d'érosion et sédimentation. Les outils pour modéliser et comprendre ces phénomènes sont les équations de Saint Venant, la propagation d'ondes linéaires et la loi de Darcy. Des exemples simplifiés seront codés en Python, des exemples réalistes seront abordés sous Basilisk.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Rappels généraux de mécanique des fluides. Dynamique des vagues, houle, relation de dispersion
- Modélisation de type Saint-Venant & Crue, rupture de barrage, ressauts
- Effets non linéaires et dispersifs : mascaret et soliton
- Écoulements sub et super critiques sur les obstacles dans les canaux
- Méthodes numériques associées en volumes finis, solveur de Riemann
- Couplage fond écoulement : érosion, nombre de Shields, loi d'Exner
- Loi de Darcy linéaire et non linéaire & Loi de Richards pour l'imbibition
- Modèles d'écoulements souterrains, aquifères

Pré-requis. Concepts de base de la mécanique des fluides de CMI3, notions de schémas numériques de CMI4

Références bibliographiques.

- Billingham King, "Wave motion" Cambridge 2001,
- Landau Lifschitz "Fluid Mechanics" (1987),
- Hubert Chanson "The hydraulics of open channel flow" Elsevier 1999.
- Eleterio Toro "Riemann Solvers" Springer 2009

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours, notebooks Python, pages Basilisk.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Bilans de matière et quantité de mouvement. Conditions limites.
- Notions sur les systèmes hyperboliques
- Analogies avec les films minces : lubrification et couches limites.

Compétences développées dans l'unité.

- Analyser phénoménologique d'écoulements.
- Modéliser des écoulements avec applications dans l'environnement

Compétences méthodologiques et transversales

- Démarche scientifique du modélisateur et mise en œuvre d'une stratégie de résolution : identification des phénomènes dominants, simplification du problème, résolution asymptotique, numérique et analyse critique des résultats.
- Utilisation appropriée des outils numériques disponibles au niveau Master
- Projet de groupe sur un problème pratique complexe

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 24h réparties en 12 h de CM et 12 h TD.
Travail personnel attendu : 30 - 40 h.

Évaluation. Examen écrit (/80) projet (/20)

Responsables. P.Y. Lagrée

Transferts thermiques en mécanique des fluides

Mise à jour 01/03/2020

Niveau CMI4 - **Semestre** S8 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU4MEF06 – Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

Ce module a pour vocation d'apporter les bases nécessaires à la compréhension des mécanismes fondamentaux mis en jeu dans les trois modes de transferts de chaleur classiques (conduction, convection et rayonnement) qui interviennent généralement de manière couplée dans les milieux naturels et dans les applications industrielles. Ce cours se propose de faire acquérir les outils nécessaires à la résolution de problèmes simples faisant intervenir des couplages conduction-convection-rayonnement dans les fluides en écoulement. Une première partie dédiée à la convection forcée reviendra sur le concept de couche limite dynamique et présentera le concept de couche limite thermique. Une méthode de résolution des équations de couches limites par intégration sera proposée puis nous aborderons des problèmes académiques de transfert de chaleur dans les écoulements en conduite. Une deuxième partie sera consacrée aux échanges de chaleur par rayonnement entre surfaces noires ou grises, qui se terminera par une introduction aux parois semi-transparentes avec application aux capteurs solaires.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Couches limites de convection forcée : analyse d'échelle, coefficient d'échange, nombres de Prandtl, de Nusselt.
- Solution approchée des équations de couches limites : méthode intégrale.
- Convection forcée interne laminaire: longueurs d'établissement, température de mélange, résolution des champs de vitesse et de température, détermination analytique du nombre de Nusselt et du coefficient d'échange convectif.
- Transferts radiatifs : luminance, émittance, loi de Lambert, facteurs de forme. Rayonnement du corps noir et gris : lois de Planck et de Stefan-Boltzmann, loi de Wien, facteurs de forme, radiosité, échanges radiatifs entre surfaces.
- Parois semi-transparentes, couplage rayonnement-convection: application aux capteurs solaires.

Pré-requis. Équations de Navier-Stokes incompressibles. Couche limite dynamique. Équation de conservation de l'énergie. Transfert de chaleur par conduction (loi de Fourier).

Références bibliographiques.

- J.F. Sacadura, Transferts thermiques : initiation et approfondissement, Tech. & Doc., Lavoisier, 2015.
- Convection Heat Transfer, A. Bejan, Ed. Wiley, 2004.
- Fundamentals of Heat and Mass Transfer, P. Incropera et al., Ed. Wiley, 2006.

Ressources mises à disposition des étudiants

Polycopié du cours et sujets de TD. Annales des examens des dernières années avec les corrigés.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Équations de couches limites de convection forcée laminaire.
- Mécanismes fondamentaux mis en jeu dans les transferts convectifs et radiatifs.
- Bilans énergétiques avec couplage convection/rayonnement dans un fluide en écoulement.
- Échanges par rayonnement entre surfaces.

Compétences développées dans l'unité.

- Analyse phénoménologique des écoulements de convection forcée.
- Résolution d'équations de type couche limite à l'aide d'un modèle Intégral.
- Détermination analytique d'un coefficient d'échange convectif dans des configurations académiques.
- Établissement d'un bilan énergétique complet avec couplage convection/rayonnement.
- Analyse des transferts radiatifs entre plusieurs corps non noirs à travers un milieu transparent.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles : 30 h réparties en 15 h de cours, 15 h de TD

Travail personnel attendu : 30-40 h.

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen de 2 heures (100 %).

Répartition pondération du contrôle des connaissances : Écrit : 100%.

Responsables. Sophie Mergui

Du microscopique au macroscopique en mécanique des fluides

Niveau CMI4 - **Semestre** S7 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU4MEF05 **Mention** Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

Les étudiants des disciplines des sciences de l'ingénieur rencontrent de nombreux paramètres et grandeurs définis à l'échelle macroscopique (température, pression, module d'Young, viscosité, capacité calorifique, conductivité électrique...), mais abordent rarement la question de leur origine physique. L'objectif de cette UE est précisément de lever le voile sur ces processus microscopiques souvent simples et d'illustrer comment ils expliquent les comportements familiers à l'échelle observable, comment ils permettent de prédire les valeurs des coefficients macroscopiques associés.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- La température et les propriétés de la matière : agitation thermique et interactions
- Passage du micro au macro par la physique statistique : postulats de base, entropie, distributions à l'équilibre de Maxwell-Boltzmann, Fermi-Dirac et Bose-Einstein
- Cinétique du gaz parfait : loi de répartition des vitesses de Maxwell, pression cinétique, équation d'état
- Processus de transport dans les gaz : diffusion moléculaire, viscosité de cisaillement, conduction thermique
- Liquides : description microscopique, phénomènes de transport (diffusion et viscosité), tension de surface
- Introduction aux automates cellulaires et aux méthodes de Boltzmann sur réseau

Pré-requis. Thermodynamique et mécanique des fluides de base (CMI3).

Références bibliographiques.

Couture et Zitoun. Physique Statistique. Ellipses (1992).

Walton. Three phases of matter. OUP (1983).

Diu, Guthmann, Lederer et Roulet. Eléments de Physique Statistique. Hermann (1989).

Tabor. Gases, liquids and solids and other states of matter. CUP (1969).

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours, sujets de TD, notebooks Python, exercices d'entraînement, annales, vidéos.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Connaissance des ordres de grandeurs.
- Acquérir des connaissances en physique statistique avec diverses distributions.

Compétences développées dans l'unité.

- Calculer des grandeurs macroscopiques à partir de la physique statistique.
- Comparer les différents résultats selon la théorie.
- Analyser ces différences au regard des résultats expérimentaux classiques.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 24 h réparties en 14 h de cours et 14 h de TD.

Travail personnel attendu : 30 – 40 h.

Évaluation. Examen écrit par contrôle continu.

Responsables.

Méthodes numériques avancées

Niveau CMI4 - **Semestre** S7 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU4MEF05 **Mention** Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

L'objectif de cette unité est d'introduire la discrétisation des équations de convection diffusion, puis les spécificités liées aux équations de Navier-Stokes sur des maillages octree. Dans ce contexte, des schémas adaptés de résolution en volumes finis, ainsi que les schémas d'intégration temporelle seront présentés en analysant les problèmes de convergence. Les étudiants seront formés à étudier la qualité des simulations réalisées par comparaison avec des données issues de la littérature scientifique.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Présentation de la méthode des volumes finis : Équation de convection-diffusion stationnaire et instationnaire, conservation des flux discrets. Introduction du schéma de Bell-Collella-Glaz. Traitement des conditions aux limites, CFL, couplage vitesse-pression : rappel de la méthode de projection, mise en œuvre (notamment calcul des gradients) dans un code volumes-finis octree tel que Gerris Flow Solver (<http://gfs.sf.net>) ou Basilisk (<http://basilisk.f>)
- Projet utilisant Gerris et Basilisk sur plusieurs cas-tests d'écoulements laminaires dans le but d'appréhender la méthodologie de calcul et les qualités prédictives de ces logiciels (par exemple : écoulements en canal, couches limites, écoulements autour d'obstacles)
- Brève introduction à la simulation des écoulements multiphasiques.

Pré-requis. Bases en méthodes numériques (CMI3 et CMI4-S1), mécanique des fluides (CMI4-S1) .

Références bibliographiques.

- Tryggvason, G., Scardovelli, R., & Zaleski, S. (2011). *Direct numerical simulations of gas-liquid multiphase flows*. Cambridge University Press.
- Popinet, S. (2003). Gerris: a tree-based adaptive solver for the incompressible Euler equations in complex geometries. *Journal of Computational Physics*, 190(2), 572-600.
- Martin, D. F., & Colella, P. (2000). A cell-centered adaptive projection method for the incompressible Euler equations. *Journal of Computational Physics*, 163(2), 271-312.

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours, sujets de TD, notebooks Python, exercices d'entraînement, annales, vidéos.

Compétences développées dans l'unité.

- Acquérir les bases théoriques de la méthode des volumes finis.
- Savoir utiliser des codes dédiés pour simuler des écoulements réels.
- Analyser la qualité des résultats numériques
- Interpréter les résultats mécaniquement.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heuresérielles totales : 30 h réparties en 15 CM et 15 h TP.

Travail personnel : 30 – 40 h.

Évaluation. Examen écrit : 50, examen sur machine 50

Responsables. S. Zaleski

Parcours Acoustique (Acou)

Introduction au traitement du signal audio

Niveau CMI4 - **Semestre** S8 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU4MEA05 – **Mention** Master de mécanique (et de robotique)

Présentation pédagogique.

Cette unité d'enseignement d'introduction au traitement du signal audio aborde l'étude de l'ensemble de la chaîne d'acquisition et restitution du signal audio pour le traitement et la modélisation des signaux audio, la prise en compte des considérations acoustiques proches du signal, des connaissances en traitement de l'information pour le codage et des effets psycho-acoustiques pour la compression.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Cette unité d'enseignement s'articule autour de trois thèmes :

- Acquisition et restitution du signal sonore.
- Analyse temps-fréquence.
- Codage du signal audio, application à la compression.

Pré-requis. Bases du traitement du signal analogique et numérique : échantillonnage, transformées de Fourier, transformée de Laplace, transformée en Z. Programmation MATLAB/Python.

Références bibliographiques.

- Blanchet, Charbit, Signaux et Images sous Matlab, Hermes Sciences, 2001.
- Hayes, Statistical Digital Signal Processing, John Wiley, 1996.
- Kahrs, applications of digital signal processing to audio and acoustics, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- Hartmann, signal, sound and sensation, Springer-Verlag, 1996.

Ressources mises à disposition des étudiants.

Le département fournit un PC portable aux étudiants qui n'en sont pas dotés.

Dispositif de prêt semestriel : PC Linux - Étudiant administrateur dans le cadre de la charte info SU. Possibilité d'utiliser les salles banalisées gérées par le service du planning.

Compétences développées dans l'unité.

- Savoir échantillonner correctement un signal audio,
- Connaître les convertisseurs sigma/delta, la quantification et les interpolateurs,
- Maîtriser la transformée de Fourier discrète pour l'analyse fréquentiel des signaux,
- Maîtriser l'analyse temps-fréquence,
- Connaître les principes de bases de la perception humaine,
- Mettre en place des stratégies de compression des données sonores.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 30 h réparties en 12 h CM, 16 h TP expérimentaux.

Travail personnel attendu : 30 – 40 h

Évaluation. Deux évaluations écrites et une évaluation du TP/projet.

Responsables. H. Boutin, N. Obin

Compléments en acoustique

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 6 ECTS - Code MU4MEM03 – Mention Master de mécanique

Présentation pédagogique.

Cette unité d'enseignement a pour objectif de présenter deux thèmes importants de l'acoustique : 1) les ondes élastiques dans les solides isotropes et 2) l'acoustique du bâtiment. Ces deux thèmes sont traités séparément par deux équipes pédagogiques différentes.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Ondes élastiques dans les solides isotropes Cette partie du cours porte sur l'étude de la propagation d'ondes élastiques dans les solides isotropes. Le découplage de l'équation des ondes montre l'existence de deux ondes susceptibles de se propager dans un solide isotrope : une onde longitudinale et une onde transverse. Si dans un solide illimité, ces deux ondes se propagent de manière indépendante en régime linéaire, la présence d'interface impose leur couplage. Les phénomènes de réflexion et de transmission aux interfaces sont analysés en détail. La diversité des ondes guidées se propageant dans les solides, dont les noms viennent de physicien et géophysiciens célèbres (Rayleigh, Lamb, Scholte, Love, Stoneley), est également présentée. Pour chaque type d'onde, la polarisation et l'équation caractéristique donnant la vitesse de phase sont explicitées. Enfin, les principales techniques de génération d'ultrasons sont présentées. En plus des cours et des travaux dirigés, des travaux pratiques numériques sont réalisés pendant lesquels des signaux issus d'expériences simples sont analysés.

Acoustique du bâtiment Cette partie a pour objectif de donner des bases en conception et dimensionnement (isolation et correction acoustique) de l'habitat en vue d'assurer le confort de l'utilisateur en terme acoustique. Pour cela, elle s'articule autour de trois grands thèmes :

1. Bases de l'acoustique linéaire.
2. Acoustique des salles.
3. Isolation acoustique des parois.

Pré-requis. Mécanique des milieux continus. Acoustique générale.

Références bibliographiques.

- D. Royer et E. Dieulesaint, Ondes élastiques dans les solides : Propagation libre et guidée, tome 1, Masson, 1996.
- D. Royer et E. Dieulesaint, Ondes élastiques dans les solides : Génération, interaction acousto-optique, applications, tome 2, Masson, 1999.

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié de cours. Chaque étudiant doit venir avec un ordinateur portable, équipé de Python. Le département fournit un PC portable aux étudiants qui n'en sont pas dotés

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

Ondes élastiques dans les solides isotropes

- Modéliser la propagation d'ondes élastiques dans un solide isotrope illimité
- Modéliser les phénomènes de réflexion et transmission aux interfaces
- Modéliser la propagation d'ondes guidées (Rayleigh, Lamb, Scholte, ...)
- Connaître les moyens de générations d'ultrasons dans des matériaux

Acoustique du bâtiment

- Modéliser l'acoustique dans des salles de géométries simples
- Modéliser l'isolation des parois
- Connaître le vocabulaire de base en acoustique du bâtiment
- Connaître les principaux indicateurs sonores pertinents en acoustique du bâtiment
- Connaître les principales méthodes d'isolation des parois.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel. Heures présentielles totales : 50 heures réparties en Ondes élastiques dans les solides isotropes 8 h CM, 8 h TD et 10 h TP.

Acoustique du bâtiment 8 h CM, 8 h TD et 8 h TP. Travail personnel : 70 - 90 h

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base de deux examens écrits de deux heures (70 %) et deux rapports de TP (30 %).

Responsable. T. Valier-Brasier, J.D. Polack

Systemes linéaires et projets en acoustique

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 6 ECTS - Code MU4MEA04 – Mention Master de mécanique

Présentation pédagogique.

Cette unité d'enseignement est organisée en deux parties, avec une première partie consacrée à une présentation des Signaux aléatoires et Identification des systèmes linéaires et une deuxième partie à un travail sous forme de projets.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Signaux aléatoires et Identification des systèmes linéaires

- Analyse statistique des signaux aléatoires.
- Fonctions de Corrélation.
- Densités spectrales de puissance.
- Fonctions de réponse en fréquence.
- Fonction de Cohérence.
- Fonction de transfert.
- Réponse impulsionnelle.
- Applications à des cas réel.

Projets. Le contenu de chaque projet est différent. Chaque projet est proposé par un membre de l'équipe pédagogique du parcours type acoustique.

Pré-requis. Base du traitement numérique du signal. Acoustique générale.

Références bibliographiques.

Signaux aléatoires et Identification des systèmes linéaires :

- Monson H. Hayes, Statistical Digital Signal Processing and Modeling, Wiley, April 1996.
- Julius S. Bendat, Allan G. Piersol, Engineering applications of correlation and spectral analysis , Wiley, 1993.

Ressources mises à disposition des étudiants.

Signaux aléatoires et Identification des systèmes linéaires : Signaux réels de systèmes acoustiques et/ou vibratoires

Projets : Dépend de chaque projet

Compétences développées dans l'unité.

- Extraire les informations en temps et en fréquence de signaux aléatoires en acoustique et vibrations.
- Identifier un système linéaire en acoustique et vibrations.
- Savoir concevoir une expérience et/ou une simulation numérique.
- Réaliser des mesures/simulations en respectant un protocole.
- Analyser des résultats et les interpréter.
- Travailler en binôme.
- Rédiger un rapport technique et soutenance orale.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles : 27h (8 séances de 3h+3h examen) -

Heures non présentielles : partie signaux 20-40 h, projet en binôme en autonomie 60 h

Évaluation.

Signaux aléatoires et Identification des systèmes linéaires : Examen Écrit, Examen sur machine (70%)

Projets : rapport écrit et soutenance (30 %) (10 minutes d'exposé 5 minutes de questions).

Responsables. F. Ollivier, T. Valier-Brasier

Parcours Énergétique et Environnement (EE)

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 6 ECTS - Code MU4MEE02

Mention Master science pour l'ingénieur mention mécanique, parcours Energétique et environnement

Présentation pédagogique.

Ce cours sur les énergies renouvelables traite des systèmes éoliens et hydroliennes, de l'énergie solaire et de sa ressource, ainsi que de sa transformation photovoltaïque et thermique. Ce cours apporte un contenu opérationnel de haut niveau qui répond à une forte demande du monde professionnel faisant suite à la Loi sur la **Transition Énergétique** et aux engagements pris par la France à la COP 21 (2015). Les connaissances acquises forme spécifiquement au développement et au dimensionnement de solutions énergétiques renouvelables (solaire, éolien).

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Module 1, éolienne et hydrolienne.

- Présentation des filières de production des énergies renouvelables et répartition et systèmes associés.
- Mise en équation de l'aéro-hydrodynamique des profils (caractéristiques géométriques, cinématique, efforts aéro-hydrodynamique, traînée, portance).
- Description des écoulements dans les turbomachines à fluide incompressible.
- Fonctionnement des turbines hydrauliques (Pelton, Francis, Kaplan), performances et dimensionnement.
- Fonctionnement des éoliennes et des hydroliennes.
- Efficacité énergétique des systèmes de production. Pertes, cavitation, performances.

Module 2. Ressource solaire, photovoltaïque et thermique.

Le solaire photovoltaïque.

- Principe de base, les différentes technologies, caractéristiques des cellules et des modules. Comportement des différentes technologies de module PV en fonction du rayonnement solaire et calcul du productible en fonction de la ressource solaire. Les cellules PV multi jonction et le PV sous concentration.
- *Les principales applications du solaire photovoltaïque.* Prise en main des principaux outils de dimensionnement et de simulation PV : introduction et première étude de cas d'une installation existante.
- Objectifs : parvenir au pré-dimensionnement d'une installation PV. Prise en main du logiciel professionnel PVSyst avec étude de cas complète : projet d'installation d'un système PV sur un bâtiment d'habitation dans la ville de Chamonix avec prise en compte des masques lointains (horizon) et des masques rapprochés (immeuble voisin), réalisation d'une scène 3D pour les masques rapprochés, préparation du plan de calepinage. Étude et conception d'une centrale solaire PV posée au sol avec travail d'optimisation sur l'orientation, l'inclinaison et l'espacement des rangées de modules PV. L'objectif est de mettre en évidence le compromis à établir entre inclinaison optimum des modules et espacement des rangées. Ce travail fera l'objet d'un rapport à rendre qui sera noté.

Le solaire thermique.

- Principe de fonctionnement. Présentation des technologies, rendement d'un capteur solaire thermique.
- Les principales applications du solaire thermique et choix du type de capteur.
- Règle de dimensionnement des capteurs et présentation de quelques logiciels de dimensionnement et de simulation pour le solaire thermique. Principes physiques d'un capteur solaire thermodynamique et principe de concentration du rayonnement solaire. Présentation des différentes technologies de concentration et calcul du facteur de concentration maximum théorique.
- Prise en compte des pertes radiatives des capteurs solaires. Calcul des courbes de rendement théorique du récepteur et de rendement théorique global. Technologies en présence et principales applications.

Pré-requis. Bases de la mécanique des fluides. Mécanique des milieux continus. Base en semi-conducteur et électronique. Base en thermique, thermodynamique et en radiatif. Notion d'optique géométrique.

Références bibliographiques.

- J. A. Duffie, W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley, 2013.
- M. R. Patel, Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation, 2nd Edition, 1999.

Ressources mises à disposition des étudiants. Supports de cours. Annales.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Connaissances des différentes technologies de production d'énergies renouvelables (hydraulique, éolienne, marine, solaire). Différentes technologies de turbines hydrauliques. Capteurs (photo, thermique).
- Modélisation et résolution des problèmes d'écoulements externes et internes.
- Aéro-hydrogénération d'énergie.
- Instrumentation et mesure (connaissance approfondie).
- Évaluation du gisement solaire. Conversion d'énergie solaire.
- Dimensionnement et optimisation

Compétences développées dans l'unité.

- Comprendre et élaborer un cahier des charges pour du dimensionnement.
- Caractériser le fonctionnement d'une turbine.
- Caractériser l'écoulement autour d'un profil aérodynamique.
- Rédiger un rapport.
- Apprendre à travailler en équipe.
- Rigueur / Fiabilité.
- Capacité à communiquer.
- Capacité de raisonner et de penser clairement.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiellees totales : 63 h réparties en 27 h de cours, 10 h de TD, 26 h de TP.

Travail personnel attendu : 60-80 h.

Évaluation. Évaluation sur la base de trois projets (60 %) et d'un examen écrit de trois heures (40 %).

Responsables. M. S. Kouidri, J.J. Wanegue, L. Girard.

Combustion - Énergétique et impact environnemental

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 6 ECTS - Code MU4MEE04 –

Mention Master science pour l'ingénieur mention mécanique, parcours Énergétique et environnement

Présentation pédagogique. La combustion est définie comme une réaction chimique globalement et généralement fortement exothermique, autonome, susceptible de s'accélérer brutalement et d'être accompagnée d'émission de rayonnements se situant globalement dans le visible, le proche UV et le proche IR et peut conduire à la formation d'une flamme. Ce cours va permettre de décrire les différents types de flammes, soit pré mélangée ou de diffusion. Ces deux types de flamme peuvent se former dans des écoulements laminaires ou turbulent ce qui permet de diviser l'étude de la combustion en quatre domaines selon le type de flamme (prémélangée ou de diffusion) et le niveau de turbulence (laminaire ou turbulent). Les grandeurs caractéristiques définissant les flammes seront détaillées. Les carburants de différentes compositions seront proposés et permettront d'appréhender les émissions polluantes associées.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Résolution analytique d'un contour de flamme de diffusion. Calcul d'une structure de flamme pré mélangée monodimensionnelle. Calcul de brûleurs utilisés dans les fours et chaudières.
- Modes de transfert de chaleur entre flamme/environnement : convection et rayonnement. Classification et effets des polluants. Techniques de mesure des polluants. Méthodes de réduction des polluants.
- Construction des schémas de cinétique chimique : avancement de réaction et lois de vitesses de réactions globales / élémentaires et de mécanismes réactionnels.
- Thermochimie et des équations de conservation d'énergie et d'espèces.
- Chimie de la combustion et impact environnemental : mécanismes de formation des polluants.

Un projet complet permettra l'élaboration d'un code de calcul de l'évolution d'un mélange H₂/O₂ en fonction du temps (MATLAB). Exploitation des codes réalisés en projet pour analyser les mécanismes de formation des polluants. Études de cas sur des configurations industrielles.

Pré-requis. Thermodynamique avancée/thermochimie. MMC de Licence. Cours d'aérodynamique/mécanique des fluides de Licence. Outils mathématiques pour la physique. Notions de programmation MATLAB.

Références bibliographiques.

- T. Poinso, D. Veynante, Theoretical and numerical combustion, Editeur : R T Edwards, 2005.
- C. K. Law, Combustion Physics, Chung K. Law, Princeton University, Cambridge University Press, 1982.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Notions de cinétique chimique. Fondamentaux en combustion (types de flammes, richesse).
- Équations de l'aérothermochimie. Structures et caractéristiques des flammes laminaires pré mélangées et non pré mélangées.
- Nature des émissions polluantes associées à la combustion, impacts et conditions de leurs productions.

Compétences développées dans l'unité.

- Connaître les ressources, les modes de production ainsi que les caractéristiques physico-chimique des principaux combustibles (charbon, pétrole, gaz naturel, alcool, hydrogène).
- Comprendre les principes de la combustion stoechiométrique et non-stoechiométrique ; description des modèles de flammes de référence.
- Comprendre le fonctionnement des applications industrielles classiques et émergentes.
- Connaître les modes de formation des polluants atmosphériques générés par la combustion, les méthodes de détection et de réduction de ces polluants. Développer un sens critique face aux utilisations des combustibles fossiles.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures Présentielles: 50 h réparties en 24 h de cours, 20 h de TD et 6 h de projet. Travail personnel attendu : 60-80 h.

Évaluation. Évaluation sur la base d'un projet (25 %), de travaux pratiques (20 %) et d'un examen écrit de trois heures (30 %) ainsi que de contrôle continu (25 %).

Responsables. P. Da Costa ; G. Legros ; A. Matynia.

Turbulence et Transfert : Applications Energétiques et Environnementales

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 6 ECTS - Code MU4MEE06 –

Mention Master science pour l'ingénieur mention mécanique, parcours Energétique et environnement

Présentation pédagogique.

Le cours est divisé en deux parties. **La première partie** couvre les descriptions théoriques et physiques de base des turbulences. Un large éventail de modèles de turbulence et de méthodes de simulation sont présentés et discutés. Les sujets comprennent les modèles de turbulence généralement utilisés dans les codes commerciaux de la CFD ainsi que les approches de recherche actuelles. **La seconde partie** traite des transferts de chaleur et de masse par diffusion dans des systèmes unidimensionnels, bidimensionnels, transitoires, périodiques et à changement de phase. Les sujets abordés sont : Transfert de chaleur par convection pour les flux externes et internes. Similitude et méthodes de solution intégrale. Analogies de la chaleur, de la masse et de la quantité de mouvement. Turbulence. Écoulements induits par la flottabilité. Convection avec changement de phase. Échange de rayonnement entre les surfaces et transfert de rayonnement dans les milieux absorbants-émetteurs. Problèmes de transfert de chaleur multimode.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Écoulement turbulent

- Description des écoulements turbulents. Cascade d'énergie, moyenne d'ensemble et propriétés. Equations de Navier-Stokes incompressibles moyennées. Décomposition de Reynolds.
- Tensions de Reynolds. Signification physique. Couche limite turbulente.
- Équation de transport d'un scalaire passif. Classification des approches d'analyse et de mod. de la turbulence (DNS, LES, RANS). Équ. de transports aux tensions de Reynolds et de l'énergie cinétique turbulente.
- Modèles de turbulence à viscosité tourbillonnaire. Hypothèse de Boussinesq. Écoulement turbulent dans un canal plan. Modèle à 2 équations de transports dans une couche limite turbulente
- Détermination de la constante de von Karman d'un modèle k-e

Transferts thermiques

- Couches limites de convection forcée externe : analyse d'échelle, coefficient d'échange, nombre de Prandtl, nombre de Nusselt. Solution approchée des équations de couches limites : méthode intégrale Convection forcée interne laminaire : longueurs d'établissement, température de mélange.
- Convection forcée interne : résolution des champs de vitesse et de température, application aux échangeurs de chaleur.
- Transferts radiatifs : luminance, émittance, loi de Lambert, facteurs de forme. Rayonnement du corps noir et gris : lois de Planck et de Stefan, facteur d'émission, radiosités, échanges radiatifs entre surfaces. Parois semi-transparentes, couplage rayonnement-convection: application aux capteurs solaires.

Pré-requis. Équations de Navier-Stokes incompressibles. Notations indicielles et calculs tensoriels. Équation de conservation de l'énergie. Transferts de chaleur.

Références bibliographiques.

- A first course in Turbulence H Lumley JL, The MIT Press 1972
- Homogeneous Turbulence Dynamics, Pierre Sagaut, Cambridge University Press 2008
- Turbulent flow, Stephen POPE, Cambridge University Press 2012

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié du cours en pdf et planches présentées en amphi le cas échéant. Sujets de TD et les corrigés, annales des examens des dernières années avec les corrigés et des commentaires ainsi que de nombreux documents complémentaires.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Notations indicielles et calculs tensoriels.
- Équation de conservation de l'énergie, transferts de chaleur.
- Compréhension des mécanismes fondamentaux mis en jeu dans les transferts convectifs et radiatifs.
- Détermination des équations de transport de la turbulence.
- Analyse et modélisation des équations de la turbulence.

Compétences développées dans l'unité.

- Compréhension et critique des modèles de turbulence.
- Résoudre les équations de type couche limite à l'aide d'un modèle Intégral.
- Calculer un nombre de Nusselt dans des configurations académiques.
- Établir un bilan énergétique complet avec couplage convection/rayonnement.
- Analyser des transferts radiatifs entre plusieurs corps gris à travers un milieu transparent.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles : 58 h réparties en 32 h de cours, 26 heures de TD. Travail personnel attendu : 70-90 h.

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen de 3 heures (85 %) et d'un contrôle continu (15 %).

Responsables. Mme S. Mergui, M. G. Gerolymos, Mme I. Vallet.

Parcours Computational Mechanics (Comp Mech)

Structures élancées

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 3 ECTS - Code MU4MES03 – Mention Master de Mécanique

Présentation pédagogique.

L'objectif de ce cours est d'initier les étudiants à la théorie des poutres et des plaques élastiques linéaires et non linéaires et à l'utilisation des approches variationnelles en mécanique des structures, avec une introduction aux non-linéarités géométriques et aux problèmes de stabilités.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Exemples de structures élancées, classification et introduction à leur modélisation. Introduction aux calculs des variations : problème modèle de calcul des variations, études de fonctionnelles, minimisation de fonctionnelles et équation d'Euler-Lagrange
- Barres, fils et poutres
 - Barres en traction/compression et poutres en flexion, modèles linéaires : rappel de la cinématique et énergie potentielle, théorème de minimum de l'énergie potentielle, traitement des différents types de conditions aux limites, traitement des discontinuités
 - Structures monodimensionnelles avec non-linéarités géométriques : théorie non-linéaire des fils et des poutres. Stabilité d'un équilibre, bifurcation, flambement. Approximation par des modèles discrets.
- Plaques et membranes
 - Formulation variationnelle pour le problème de plaques linéaires : modèles de Love-Kirchhoff et de Mindlin. Solutions exactes, solutions par séries et solutions approchées.
 - Plaques faiblement non-linéaires : modèle de Von-Karman. Flambement des plaques, modèles réduits, exemples de plaques multistables.

Pré-requis. Bases de mécanique des milieux continus et résistance des matériaux développées dans les enseignements de 3^e année (LU3ME004, LU3ME006) et de 4^e année (MUEM01). Calcul différentiel, équations aux dérivées partielles et formulations faibles (LU3ME003).

Références bibliographiques.

- J.J. Marigo, Mécanique des Milieux continus I, Edition Ecole Polytechnique, 2018.
- Q.S. Nguyen, Stabilité et mécanique non-linéaire, Edition Hermès, 2000
- J.N. Reddy, Theory and analysis of elastic plates, Edition Taylor & Francis 1999.
- B. Audoly and Y. Pomeau, Elasticity and geometry: from hair curls to the nonlinear response of shells, Oxford University Press
- E.H. Mansfield, The bending and stretching of plates, Cambridge University Press, 1989

Ressources mises à disposition des étudiants. Cours, sujet de TD et corrigés, Annales.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Modèles classiques de poutres (barres, fils, poutres) et de plaques linéaires et non linéaires.
- Méthodes classiques de résolution.
- Introduction aux non linéarités géométriques : flambement et perte d'unicité des solutions, stabilité de structures.
- Formulations variationnelles d'un problème de plaque.

Compétences développées dans l'unité.

- Savoir établir, manipuler des approches variationnelles dans différents cas pratiques et les comprendre.
- Savoir mettre en oeuvre les concepts, savoir formuler résoudre des problèmes classiques de poutres et plaques linéaires et non linéaires.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 51 h réparties en 24 heures de cours, 24 heures de TD, 3 h de TP.

Travail personnel attendu : 60 h – 80 h.

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base de deux écrits d'une durée de 2 h chacun.

Responsables. M. A. Fernandes, C. Maurini

Matériaux composites et milieux hétérogènes

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 3 ECTS - Code MU4MES07 – Mention Master de Mécanique

Présentation pédagogique.

L'objectif de ce cours est l'étude des matériaux composites et des structures constituées de ces matériaux. On s'intéressera aux modèles et techniques pour l'analyse, la modélisation et le calcul en conception et dimensionnement des matériaux et structures composites.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Introduction : généralités sur les matériaux et les structures composites.

- Définition et classification ; constituants ; procédés de mise en forme ; architecture, structures composites.

Anisotropie en thermo-élasticité.

- Représentation mathématique des tenseurs de contraintes, déformations et de comportement: représentation cartésienne, notation de l'ingénieur et changement de repère ; symétries élastiques.

Calcul des propriétés macroscopiques d'un matériau composite

- Approches variationnelles en homogénéisation et bornes d'ordre 1.
- Loi de mélanges pour les couches orthotropes : des constituants aux propriétés macroscopiques d'une couche unidirectionnelle. Comportement thermo-élastique d'une couche orthotrope.
- Mécanismes de rupture et endommagement des matériaux composites.

Modélisation du comportement mécanique des plaques stratifiées et sandwich.

- Théorie classique des stratifiés et influence des stratifications sur les propriétés ; poutres stratifiées.
- Modèle de plaques stratifiées avec prise en compte du cisaillement transverse ; théorie des plaques sandwich.

Partie TP :

- Calcul d'homogénéisation sur différentes micro-structures.
- Analyse de composite stratifiés : calcul de différents empilements et étude de l'influence des séquences sur la réponse mécanique. Calculs éléments finis sous Castem, Abaqus.

Pré-requis. Mécanique des milieux continus de 3^e année (LU3ME004, LU3ME006) et de 4^e année (MU4MEM01). Comportement de structures élastiques (plaques, poutres) de 4^e année (MU4MES03).

Références bibliographiques.

- J.-M. Berthelot, Matériaux Composites, Éditions Technique & Documentation, 1999.
- J.N. Reddy, Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells, CRC Press, 2004.
- D. Hull, T. W. Clyne, An introduction to composite materials, Cambridge University Press, 1981.

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopiés de cours, sujets de travaux dirigés et annales corrigés. Logiciels en salles de TP et en salle libre service. Documentations des logiciels (Castem, Abaqus). Exemples des années précédentes.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Propriétés macroscopiques de matériaux composites stratifiés, homogénéisation, lois des mélanges.
- Comportement anisotrope.
- Modèles classiques de plaques stratifiées et plaques sandwich.

Compétences développées dans l'unité.

- Calcul de comportement effectif équivalent de matériaux.
- Simulation numérique et analyse de comportement de stratifié.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 26 heures réparties en 10 h de cours, 10 heures de TD et 6 heures de TP sur machine. Travail personnel attendu : 30 h – 40 h.

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen de 2 h et d'un oral (présentation projet/TP).

Responsables. Mme A. Vincenti, M. D.Kondo.

Bifurcations et instabilités

Niveau CMI4 - **Semestre** S8 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU4MEF08 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications

Présentation pédagogique.

Les instabilités sont omniprésentes en mécanique des fluides : l'écoulement de l'air dans la couche limite autour d'une aile d'avion se déstabilise par la croissance d'ondes longitudinales et donne naissance à la turbulence. Le jet d'eau qui s'écoule d'un robinet se déstabilise en gouttelettes sous l'effet de la force de tension de surface, le sillage d'un cylindre se déstabilise pour donner naissance à une allée de tourbillons alternés. Lors de ce cours, nous introduisons les notions théoriques et les outils techniques qui nous permettent de décrire qualitativement et quantitativement ces phénomènes d'instabilité.

Le cours s'appuie largement sur des séances de travaux pratiques numériques afin de mettre tout de suite en pratique les connaissances de l'étudiant et de se familiariser avec les outils de la recherche en mécanique des fluides.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Panorama général des phénomènes d'instabilité. Notion de mode propre. Exemple en approximation de la lubrification avec l'instabilité d'un fluide lourd au dessus d'un fluide léger (Rayleigh-Taylor). Notion de relation de dispersion, de courbe neutre. Analyse harmonique d'équations modèles 1D : convection diffusion, équation des ondes, équation de réaction/diffusion, équation de Saint-Venant. Etude de stabilité sur des systèmes scalaires : attracteur de Lorenz. Instabilité de la couche de Mélange (Kelvin-Helmholtz). Formalisme de la stabilité en problème aux valeurs propres, représentation matricielle des systèmes dynamiques. Les méthodes numériques pour l'étude de la stabilité: discrétisation des équations, résolutions matricielles, valeurs propres/vecteur propres. Marche en temps des équations de la stabilité.

Pré-requis. Concepts de base de la mécanique des fluides de CMI3, notions de schémas numériques de CMI4

Références bibliographiques. Sur la mécanique des fluides générale : • 'Hydrodynamique Physique' de Guyon, Hulin & Petit (CNRS Editions) Sur les instabilités: • 'Instabilités hydrodynamiques' de François Charru (CNRS Editions)

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours, notebooks Python, pages Basilisk.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Bilans de matière et quantité de mouvement. Conditions limites.
- Notions sur la stabilité

Compétences développées dans l'unité.

- Résoudre des systèmes d'équations et en déduire la stabilité.
- Programmer et comparer les solutions numériques et analytiques.
- Rédiger un rapport de projet

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiels totales : 32 h réparties en 16 h de CM, 8 h TD et 8 h TP. Travail personnel attendu : 30 - 40 h.

Évaluation. Examen écrit (/80) projet (/20)

Responsables. Pierre-Yves Lagrée

Méthodes numériques pour la mécanique

Niveau CMI4 - Semestre S8 - Crédits 3 ECTS - Code MU4MEM02– Mention Master de Mécanique

Présentation pédagogique.

L'objectif de cette unité d'enseignement est de compléter la formation en méthodes numériques de l'étudiant dans le domaine d'expertise de son parcours type de master. L'unité comporte une partie applicative sous forme de travaux pratiques guidés et une partie de mise en situation avec un projet réalisé en binôme et en autonomie.

A titre d'exemple, dans le parcours Mécanique des Solides : matériaux et structures, l'accent est mis sur les schémas itératifs de discrétisation temporelle pour des problèmes évolutifs du premier et second ordre en temps et le couplage avec une discrétisation par éléments finis.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Introduction : Position du problème d'intégration temporelle pour des problèmes paraboliques (équation de la chaleur) et hyperboliques (dynamiques des structures).
- Cas parabolique: systèmes du premier ordre.
 - Introduction d'un schéma aux différences finies. Exemple à 1 ddl, Euler avant.
 - Stabilité d'un schéma: définitions et exemple d'Euler avant scalaire.
 - Méthode du trapèze généralisée (θ -méthode): cas scalaire. Propriétés et conditions de convergence (exercice). Crank-Nicolson.
 - Méthode du trapèze généralisée: cas vectoriel. Implémentation. Méthodes implicites et explicites. Réduction au cas scalaire par projection sur base modale.
- Cas hyperbolique: systèmes du second ordre.
 - Méthodes de la famille de Newmark. Présentation et implémentation.
 - Conditions de stabilité
 - Erreurs d'amplitude et de périodicité
 - Résumé: Méthode de l'accélération moyenne, accélération linéaire et différence finies centrée.
 - Cas de la barre en traction discretisée aux éléments finis. Condition de Courant.
- Projet disciplinaire

Pré-requis. Cours d'analyse des structures par éléments finis (MU4MES01), méthodes numériques et calcul scientifique de 3^e et 4^e année (LU3ME005, MU4MEN01).

Références bibliographiques.

Pour le parcours Mécanique des Solides : matériaux et structures

- M. Bonnet et A. Frangi, Analyse des solides déformables par la méthode des éléments finis, Ellipses, 2007.
- T. Hughes, The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis, Dover, 1987.
- M. Géradin, D. J. Rixen, Théorie des vibrations: application à la dynamique des structures, Masson, 1996.

Ressources mises à disposition des étudiants. Logiciels en salles de TP et en salle libre service. Documentations des logiciels.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Méthodes numériques relatives à la spécialité disciplinaire.

Compétences développées dans l'unité.

- Développer l'autonomie face à la simulation numérique d'un problème de mécanique.
- Savoir implémenter des méthodes numériques et les apprécier en termes de stabilité, précision, convergence, ...
- Savoir présenter des méthodes et résultats numériques.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 28 h réparties en 8 h de cours et 20 h de TD/TP sur machine.

Travail personnel attendu : 50 h – 60 h

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen écrit sur machine de 1 heure (/25) et d'un projet (/75) réalisé en binôme évalué sur le rapport (par exemple sous forme Python notebook) et la restitution orale (5- 10 minutes par binôme).

Responsables. M. A. Fernandez, C. Maurini.

Parcours Systèmes Avancés et Robotique (SAR)

Modélisation et simulation robotique.

Niveau CMI4 - **Semestre** S8 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU4RBR05 – **Mention** Master Automatique et Robotique

Présentation pédagogique.

Cet enseignement a pour objectifs : (i) de former les étudiants aux méthodes de modélisation dynamique des systèmes robotiques, (ii) de leur donner les connaissances de base sur les architectures d'actionnement de ces systèmes, (iii) de les former à la simulation numérique des systèmes robotiques.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Partie Modélisation. Cinétique du solide rigide, torseur cinétique, énergie cinétique, matrice masse. Théorème généraux de la dynamique, principe fondamental de la dynamique, théorème de l'énergie cinétique, équation de Newton-Euler. Dynamique direct et Inverse, Algorithme récursif de Newton-Euler. Coordonnées généralisés, paramétrage. Équation de Lagrange pour paramètres indépendants, et chaîne arborescente. Écriture matricielle des équations de Lagrange. Frottement et flexibilité.

Partie Actionneurs. Moteurs électriques. Transmissions. Actionneurs hydrauliques, à alliages à effet de mémoire. Actionneurs piézoélectriques, élastomères diélectriques. Actionneurs polymères électro-actifs. Muscles.

Partie Simulation. Programmation Python pour le calcul numérique. Programmation impérative et gestion d'un projet de programmation. Résolution numérique des équations de mouvement, systèmes d'équations différentielles, ODE. Dynamique contrainte, résolution de systèmes DAE

Pré-requis. Cours d'Introduction à la robotique du CMI4-S1. Cours de Python du CMI4-S1

Ressources bibliographiques.

- W. Khalil, E. Dombre. Modélisation, identification et commande des robots. Hermes. 1999.
- M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar. Robot Dynamics and Control. Wiley. 2006.
- J. J. Craig. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Pearson. 2004.

Ressources mises à disposition des étudiants. Document de cours sur diapositives. Énoncés de TDs. Annales d'examens avec corrigés.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Structure mécanique et actionnement des robots manipulateurs sériels ;
- Modélisation dynamique de ces robots.
- Intégration numérique des équations de mouvement. Structure et développement de simulateurs.

Compétences développées dans l'unité.

- Écrire un modèle dynamique de robot manipulateur.
- Effectuer un choix et dimensionnement d'actionneur.
- Développer un simulateur de robot manipulateur.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 56 h réparties en 29 h cours, 3 séances de TD de 2 h, 7 séances de TP numériques de 3 h. Travail personnel attendu : 60 -80 h.

Évaluation.

L'évaluation se fait sur la base de notes d'examens écrits (/50) et d'une note de projet (/50).

Responsables. M. Faiz Ben Amar, Sinan Haliyo, et Vincent Hayward.

ROS et robotique expérimentale.

Niveau CMI4 - Semestre S2 - Crédits 6 ECTS - Code MU4RBR04 – Mention Master Automatique et Robotique

Présentation pédagogique.

ROS (for Robot Operating System) is collection of different software frameworks aiming at interfacing together all the constitutive parts of a traditional robotic system. On the basis of an efficient software architecture allowing a hardware abstraction layer together with a robust messaging system between processes, ROS provides an efficient way to build a complete robotic architecture able to deal with traditional robotic tasks like sensor-based control, navigation, etc. This teaching unit aims at mastering this ROS software in order to (i) build a realistic simulation of a simple two wheels robot endowed with sensorimotor capabilities in a dedicated simulator (gazebo), and (ii) to exploit the resulting code to interface with a real robot (Turtlebot 3 Burger) in some intelligent vehicle navigation scenario.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Phase 1: root concepts of ROS

- definition of the root concepts of ROS, and complementary elements on event-based programming and client-server communications
- programming of a simple ROS teleoperation node, on the basis on ROS tutorials
- application to the control of very simple simulated robot (turtlesim) and of a real robot (Turtlebot 3 burger)

Phase 2 : simulation of a realistic two wheels robot

- introduction to the geometrical definition of a simple robot (URDF)
- exploitation of the description with gazebo to gather sensorimotor data from a camera and a laser distance sensor
- exploitation of the laser data to trigger an “emergency stop” behavior in a ROS node
- elements of image processing with openCV to program a line following algorithm
- tests of the approach with the simulated robot and the real robot.

Phase 3 : exploitation of the development for navigation of an intelligent vehicle

- project aiming at fusionning all the previous developments in order to make a Turtlebot 3 burger autonomously navigate in a dedicated arena made of lines to follow and of obstacles to avoid.

Pré-requis. Python programming, basic signal processing algorithms, notions in automatic control

Ressources mises à disposition des étudiants. Tutoriels en lignes.

Compétences développées dans l'unité.

- master all the root concepts of the ROS software (nodes, messages, topics, services, etc.)
- write a standard subscriber and publisher node in Python
- understand and exploit a simulated robot description (written in URDF) in a physical simulator
- extract from the simulation some motor and sensory data (from a laser distance sensor and a camera) to achieve a reactive navigation in a simulated environment (for instance, emergency stop behavior, line following, etc.)
- interface with a real robot, and to adapt all the written code to real data in order to make the robot autonomously navigate on a small dedicated arena.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiellees totales : 51 h réparties en 7 h cours, 11 séances de TP numériques de 4 h.

Travail personnel attendu : 60 – 80 h.

Évaluation.

The two first phases will be evaluated through surveys and progress assessment of the project. In the end, an individual and practical evaluation will be conducted on the proposed intelligent vehicle system.

Responsables. M. S. Argentieri, F. Vérité, et L. Saint Bauzel

Conception – Dessin Assistés par Ordinateur CAO-DAO.

Niveau CMI4 - **Semestre** S8 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU4RBR02– **Mention** Master Robotique et Automatique

Présentation pédagogique.

Cet enseignement a pour objectif de former les étudiants à la démarche industrielle de création de systèmes mécaniques assistés par ordinateur. On s'intéresse en particulier aux formes, aux fonctions des éléments et aux liaisons conçues par l'utilisation de composants courants du commerce. Ce module doit permettre de choisir (sans dimensionner) et assembler correctement un composant dans un mécanisme dont on comprend le fonctionnement.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Bases du dessin industriel : représentation normalisée des systèmes mécaniques (vues planes, coupes et sections, représentation normalisée des éléments de mécanique de construction).
- Connaissances des composants standards de base tels que roulements, éléments d'assemblage, engrenages,
- Assemblages de pièces : Tolérances dimensionnelles, ajustement...
- TP de DAO (initiation au dessin industriel à l'aide du logiciel de CAO SolidWorks®).
- Interfaçage avec des logiciels de simulation comme ADAMS par exemple.

Pré-requis. mécanique des solides

Bibliographie. A. Chevalier. Guide du dessinateur industriel. Hachette. 2003.

Ressources mises à disposition des étudiants. Tutoriels.

Compétences développées dans l'unité.

- Acquérir des bases du dessin industriel, notions des fonctions des éléments constructifs pour la réalisation des liaisons mécaniques, Assemblage de pièces.
- Lire et interpréter un plan 2D (mise en plan avec ses spécifications) en prenant en compte sa nomenclature.
- Réaliser une pièce simple en volumique 3D et sa mise en plan 2D à l'aide de l'outil XAO SolidWorks.
- Assembler un mécanisme mécanique pour réaliser une maquette numérique robuste prête à la simulation en partant de sa modélisation cinématique (schéma cinématique) ou architecturale.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiellees totales : 30 h réparties en 6 h de cours de 2 h, 6 séances de TP de 2 h et d'un projet de 8 h.

Travail personnel attendu : 30 -40 h.

Évaluation.

L'évaluation se fait sur la base de deux notes de TP (/50) et d'une de projet (/50), l'ensemble étant en contrôle continu.

Responsables. M. J.-P. Ferbeyre, Mme V. Maudru.

Programmation Objet C++

Niveau CMI4 - **Semestre** S8 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU4RBI02 – **Mention** Master Automatique et Robotique

Présentation pédagogique.

Cet enseignement a pour objectif d'appliquer les connaissances déjà acquises en programmation orientée objet en utilisant le langage C++ comme outil. Les fondamentaux du langage sont introduits (syntaxe C++, objets et héritage) et mis en contexte sur des exemples applicatifs simples.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- C1 - De la syntaxe C à la syntaxe C++, flux standards d'entrée/sortie, surcharge des fonctions, type référence, opérateurs d'allocation mémoire.
- C2 - Classes, instances, attributs et méthodes, encapsulation, constructeurs et destructeurs, accesseurs.
- C3 - Surcharge des opérateurs, héritage.
- C4 - Conversion de type, fonctions virtuelles, polymorphisme.
- TD1 - Étude d'exemples de surcharges de fonction, premières définitions de classes et d'instances de ces classes.
- TD2 - Constructeurs/destructeurs et allocation dynamique sur un exemple : la classe « Complex ».
- TD3 - Héritage : analyse de la portée des méthodes et attributs de classe au sein d'une hiérarchie de classes.
- TP1 - Prise en main d'un environnement de développement C++, exercices sur le passage d'arguments par adresse et par référence. Travail sur un cas concret : implémentation d'une classe « Polynome ».
- TP2 - Encapsulation : implémentation d'une classe « Pile de caractères » et de ses méthodes. Gestion dynamique de la mémoire.
- TP3 - Héritage et surcharge de l'opérateur d'affectation. Notions de « containers ». Application à la gestion d'un annuaire.
- TP4 - Polymorphisme : étude concrète des ligatures dynamiques sur un exemple de gestion de piles de type LIFO/FIFO.

Pré-requis. Connaissance du langage C et d'un langage de programmation orienté objet, typiquement Java ou Python.

Ressources mises à disposition des étudiants. Transparents du cours. Polycopié numérique permettant l'apprentissage en autonomie sur des études de cas.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Méthodologie de la programmation orientée objet sur un langage compilé fortement typé.

Compétences développées dans l'unité.

- Résoudre un problème de programmation selon l'approche orientée objet en C++.
- Solutions à apporter pour la conception de programmes de plus grande envergure (conception d'une hiérarchie de classes en C++, utilisation de bibliothèques tiers, compilation séparée, etc.).
- Réaliser un code efficace et robuste.
- Appréhension des notions orientées objet en C++ qui permettent d'assurer la portabilité du code.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 30 h réparties en 4 séances de 2 h de cours, 3 séances de TD de 2 h, 4 séances de TP numériques de 4 h.

Travail personnel attendu : 30 -40 h.

Évaluation.

L'évaluation se fait sur la base d'une note d'écrit (/50) et d'une note de TP (/50).

Responsables. M. Bruno Gas

Machine Learning.

Niveau CMI4 - **Semestre** S8 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU4RBI05- **Mention** Master Automatique et Robotique

Présentation pédagogique.

Cet enseignement a pour objectif de former les étudiants à l'apprentissage statistique, aussi bien du point de vue des concepts (partitionnement des bases de données, généralisation, méthode supervisée ou non, méthode générative ou discriminative, ...) que des méthodes (Kppv, classification bayésienne, estimation des densités de probabilités, arbre de décision, SVM, régression, réseau de neurones, etc).

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

C1 – Introduction, codage, réduction de dimension

C2 – Terminologie et méthodologie (Performance d'un classifieur, Méthode supervisée vs non supervisée, générative vs discriminative, classification par les kppv, arbre de décision)

C3 – Méthodes bayésiennes, estimation des densités de probabilité

C4 – Classification non supervisée + cc

C5 – HMM

C6 – Méthodes à noyaux

C7 – Réseaux de neurones

C8 – Réseaux de neurones + cc

TP1 (2 h) – Prise en main de Scikit-learn et construction d'un modèle élémentaire

TP2 (2 h) – Analyse en composante principale kppv + reconstruction

TP3 (2 h) – Évaluation d'un classifieur

TP4 (2 h) – Méthodes bayésienne

TP5 (2 h) – Forêt d'arbres aléatoires

TP6 (2 h) – SVM

TP7 (3 h) – Réseau de neurones

Exam de TP (1 h)

Pré-requis. Cet enseignement requiert des connaissances de base sur les probabilités ainsi que la connaissance du langage de programmation python.

Ressources mises à disposition des étudiants. Transparents du cours.

Références bibliographiques

- R. Duda, P. Hart, D. Stork, "Pattern Classification". Wiley Sciences, 2nd edition, 2000.
- C. M. Bishop, "Pattern Recognition and machine learning", Springer, 2006

Compétences développées dans l'unité.

- Acquérir les méthodes d'apprentissage statistique.
- Appréhender un problème d'apprentissage en choisissant la méthode la plus adaptée à sa résolution.
- Mettre en œuvre de méthodes de résolution des problèmes d'apprentissage.
- Analyser et interpréter des résultats.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 29 h réparties en 14 h cours, 5 séances de TP numériques de 3 h.

Travail personnel attendu : 30 – 40 h.

Évaluation. 2 notes d'écrits (/75) + 1 note de TP (/25).

Responsables. Mme C. Achard.