

Syllabus Coursus Master Ingénierie, Mécanique. Sorbonne Université CMI5

Mécanique des fluides : fondements et applications (MF2A)

Liste of Teaching Units

Semestre 9

Core Units

- Technoscience, ethic and society
- Dynamique et modélisation de la turbulence

Thématique Fluids Mechanics

- Multiscale Hydrodynamic Phenomena
- Numerical methods for fluid mechanics
- Drops, Bubbles and co
- Diffusion, advection and the dynamo effect
- Introduction to hydrodynamical instabilities
- Flows and acoustics in fluid media
- Separated flow/ compressive Flow

Thématique Modélisation et Simulation en Hydrodynamique

- Mécanique des milieux continus fluides
- Milieux poreux et suspensions
- Écoulements multiphasiques
- Méthodes numériques pour les écoulements incompressibles
- Écoulements et transferts en milieu naturel
- Vortices in hydrodynamics
- Projet numérique

Thématique Aérodynamique et Aéroacoustique

- Acoustique Aérienne
- Aérodynamique fondamentale
- Méthodes numériques pour les écoulements compressibles
- Quantification des incertitudes en CFD
- Modélisation et simulation en aéroélasticité
- Options : 2 Unités à 3 ECTS au choix dans les autres thématiques
- Projet numérique
-

Semestre 10

- Certification langue anglaise
- Projet d'approfondissement
- Stage de fin d'étude

Intitulé Unité d'Enseignement – Cycle Master – CMI5 – Semestre S9		Code	CM	TD	TP	AMS	Heures Présence	Travail I Perso	ECTS	
CMI5 S9	Technoscience, ethic and society	MU5EEG03	16	8		24	24	40-60	6 *	
	Parcours Mécanique des fluides, fondements et applications (MF2A)									
	Dynamique et modélisation de la turbulence	MU5MEF22	30	22	8		30	60-80	6	
	Enseignements électifs	Thématique Fluids Mechanics								
		Multiscale Hydrodynamic Phenomena	MU5MEF15	15	15			30	30-40	3
		Numerical methods for fluid mechanics	MU5MEF19	15	15			30	30-40	3
		Drops, Bubbles and co	MU5MEF17	15	15			30	30-40	3
		Diffusion, advection and the dynamo effect	MU5MEF18	15	15			30	30-40	3
		Introduction to hydrodynamical instabilities	MU5MEF19	28	2			30	30-40	3
		Flows and acoustics in fluid media	MU5MEF21	30	30			60	60-80	6
		Separated flow/ compressive Flow	MU5MEF24	15	15			30	30-40	3
		Thématique Modélisation et Simulation en Hydrodynamique								
		Mécanique des milieux continus fluides	MU5MEF00	20		10		30	30-40	3
		Milieux poreux et suspensions	MU5MEF23	15	15			30	30-40	3
		Écoulements multiphasiques	MU5MEF02	40	10	10		30	60-80	6
		Méthodes numériques pour les écoulements incompressibles	MU5MEF04	20		12		32	30-40	3
		Écoulements et transferts en milieu naturel	MU5MEF05	20	10			30	30-40	3
		Vortices in hydrodynamics	MU5MEF06	15			10	30	30-40	3
		Projet numérique	MU5MEF32	4				4	60-80	3
		Thématique Aérodynamique et Aéroacoustique								
		Acoustique Aérienne	MU5MEF07	20	10			30	30-40	3
		Aérodynamique fondamentale	MU5MEF08	19,5	19,5		4	30	30-40	3
		Méthodes numériques pour les écoulements compressibles	MU5MEF04	20	12			32	30-40	3
	Quantification des incertitudes en CFD	MU5MEF39	14	14	6		30	30-40	3	
Modélisation et simulation en aéroélasticité	MU5MEF10	12	10	8		30	30-40	3		
Options : 2 Unités à 3 ECTS au choix dans les autres thématiques							60-80	6		
Projet numérique	MU5MEF32	4				4	60-80	3		
Total Tronc commun : 6 + 6* ECTS - Total thématique 24 ECTS - Total CMI5 S9 MF2A = 30 ECTS + 6*										

Intitulé Unité d'Enseignement – Cycle Master – Niveau 5 ^e A – Semestre S10		Code	CM	TD	TP	AMS	Heures Présence	Travail Perso	ECTS
CMI5	Certification TOIC /TOEFL	MU4LVANT				30		30-40	3*
S10	Projet d'approfondissement	MU5EEG04				40		50-60	3*
	Stage de fin d'études	MU5MES03					800	80-100	30
Total CMI5 - S10 30 ECTS + 6 *									

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

Semestre 9

Technosciences, Ethic and Society

Niveau CMI5 - Semestre S9 - Crédits 6 ECTS - Code MU5EEG03 – Mention Master

Présentation pédagogique.

L'objectif de ce cours est d'amener les étudiants à réfléchir sur les dimensions sociales et éthiques du métier d'ingénieur. Il s'intéresse aux relations complexes entre société et techniques et notamment au rôle des techniques en tant que porteuses de valeurs. Se reposant sur ces analyses, le cours explore ensuite les questions et dilemmes éthiques que les ingénieurs peuvent rencontrer dans l'exercice de leur travail. Une attention particulière est portée à l'examen de cas classiques en éthique de l'ingénierie, comme ceux de Three Mile Island et du pont du Québec. À l'issue de ce cours, les étudiants seront capables d'identifier les problèmes éthiques soulevés par les pratiques professionnelles. Ils feront aussi preuve de réflexivité sur leur future profession. Le cours est enseigné en anglais.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Introduction
- Déterminisme technique et construction sociale. Lire : T. Pinch et W. Bijker, *The Social Construction of Facts and Artifacts ?* Exposé : (aussi) Robert Heilbroner, *Do Machines Make History ?*
- Dispositifs, systèmes, et leur pouvoir d'action sur la société. Lire : B. Latour, *Where are the Missing Masses ? The Sociology of a Few Mundane Artifacts*. Exposé : (aussi) T. Hughes, *Technological Momentum*.
- Techniques et valeurs. Lire : J. Wetmore, *A. Technology : Reinforcing Values, Building Community*. Exposé : (aussi) Langdon Winner, *Do Artifacts Have Politics ?* et R. Weber, *Manufacturing Gender in Commercial and Military Cockpit Design*.
- Complexité et incertitude. Apporter : Proposition de mémoire Lire : D. Vinck, *Ingénieurs au quotidien*. Exposé : (aussi) Jameson Wetmore, *Engineering Uncertainty*.
- Ingénierie et expérimentation. Lire, exposé: M. Martin et R. Schinzinger, *Introduction to Engineering Ethics*, pp. 77-103.
- Les désastres techniques. Lire et exposé : S.K.A. Pfafteicher, *Lessons amid the Rubble*, pp. 36-61.
- Ingénierie et sécurité. Lire et exposé : Mike Martin et Roland Schinzinger, *Ethics in Engineering*, p. 117-145.
- Ingénierie et environnement. Lire, exposé: Mike Martin et Roland Schinzinger, *Ethics in Engineering*, pp. 219-242.
- Nanotechnologies, génétique et robotique. Lire: Bill Joy, *Why the Future Doesn't Need Us*. Exposé : Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering, and Technology, *Nanotechnology : Shaping the World Atom by Atom*.

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

Références bibliographiques. Bowen R. 2012. *Engineering Innovation in Health Care : Technology, Ethics and Persons*. HRGE, pp. 204-221. Collins, Harry & Trevor Pinch. 2002. *The Golem at Large : What You Should Know about Technology*. Cambridge University Press. Didier. Ch. 2008. *Penser l'éthique des ingénieurs*. Paris, PUF. Didier, C.. 2008. *Les ingénieurs et l'éthique : pour un regard sociologique*. Hermes Science publications. Heilbroner, Robert. 1967. *Do Machines Make History? Technology and Culture*, pp. 335-345. Hughes, T. 1994. *Technological Momentum*, in Marx, Leo & Merritt Roe Smith, *Does Technology Drive History? The Dilemma of Technological Determinism*. Cambridge: MIT Press, pp. 101-113. Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering, and Technology, *Nanotechnology: Shaping the World Atom by Atom*, in Johnson, Deborah et Jameson Wetmore. *Technology and Society: Building Our Sociotechnical Future*. MIT Press Johnson, D. & Jameson W.. 2008. *STS and Ethics: Implications for Engineering Ethics*, in Hackett, Edward, Olga Amsterdamska, M. Lynch et J. Wajcman, *The Handbook of Science and Technology Studies*. Cambridge, MIT Press, pp. 567-582. Joy, Bill. Avril 2000. *Why the Future Doesn't Need Us*, *Wired*, pp. 238-262. Latour, B. 1992. *Where Are the Missing Masses? The Sociology of a Few Mundane Artifacts* in Wiebe Bijker et John Law, *Shaping Technology/Building Society: Studies in Socio-technical Change*. Cambridge, MIT Press, pp. 225-258. Martin, Mike & Roland Schinzinger. 2005. *Ethics in Engineering*. McGraw-Hill. Martin, M. & Roland S.. 2010. *Introduction to Engineering Ethics*. New York : McGraw- Hill. Pfattaicher, S. K. A. 2010. *Lessons Amid the Rubble*. Johns Hopkins University Press. Pinch, Trevor & Wiebe Bijker. 1987. *The Social Construction of Facts and Artifacts* in Wiebe Bijker, Thomas H., Trevor P., *The Social*

Construction of Technological Systems. Cambridge, MIT Press, pp. 17-50. Vinck, D. 1999. Ingénieurs au quotidien : ethnographie de l'activité de conception et d'innovation. Presses universitaires de Grenoble. Weber R.. 1997. Manufacturing Gender in Commercial and Military Cockpit Design, Science, Technology, & Human Values, pp. 235-253. Jameson. 2008. Engineering with Uncertainty: Monitoring Air Bag Performance, Science and Engineering Ethics, pp. 201-218. Jameson. 2009. Amish Technology: Reinforcing Values, Building Community in Johnson, D. et Jameson W.. Technology and Society: Building Our Sociotechnical Future. Cambridge: MIT Press. -Winner, Langdon. 1986. Do Artifacts Have Politics? The Whale and the Reactor: a Search for Limits in an Age of High Technology. University of Chicago Press, pp. 19-39.

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

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Connaissance des dimensions sociales et éthiques du métier d'ingénieur.

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.

Heures présentiels totales : 24 heures réparties en 16 h de cours, 8 h de TD. Travail personnel 40-60 h.

Évaluation. Participation aux séances : 20 %, Exposé : 20 %, Mémoire : 40 %, Soutenance du mémoire : 20 %.

Responsables. C. Lecuyer

Dynamique et modélisation de la turbulence

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU5MEF02 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

L'objectif de cette UE est de donner aux étudiants les bases nécessaires pour comprendre les phénomènes turbulents qui apparaissent dans de nombreuses applications relevant des secteurs d'activité visés par la spécialité du master (partie I), ainsi qu'une revue des techniques de modélisation des écoulements turbulents en vue de la prévision de leur dynamique par la simulation numérique (partie II).

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Partie I : Introduction à la turbulence : définition et équations associées. Description statistique des écoulements turbulents. Moyenne de Reynolds et équations moyennées. Turbulence isotrope : définition, théorie de Kolmogorov, théories et solutions auto-semblables. Turbulence cisailée. Ecoulements confinés. Couche limite turbulente : dynamique, génération de la traînée turbulente.

Partie II : Simulation et modélisation des écoulements turbulents : simulation directe (DNS), modélisation statistique (RANS) et simulation des grandes échelles (LES). Notion de fermeture et classification, présentation des modèles usuels d'ordre un (de 0 à 2 équations) et d'ordre deux (RSM). Traitement des parois et des conditions aux limites. Notions essentielles sur la construction des maillages adaptées aux différents modèles et aux différentes contraintes numériques associées.

Pré-requis. Bases en mécanique des fluides

Références bibliographiques.

- Pope, S.B., Turbulent flows, Cambridge University Press, 2000
- Tennekes-Lumley A first introduction to turbulence The MIT press 1972

Ressources mises à disposition des étudiants. Notes de cours

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Modélisation de la turbulence.

Compétences développées dans l'unité.

- Comprendre la turbulence.
- Savoir mettre en place une modélisation numérique de la turbulence (choix des maillage, des modèles).

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 60 h réparties en 30 h CM, 22 h de TD et 8 h de TP.

Travail personnel attendu : 60 – 80 h.

Évaluation. Examens : examen 1 (50 %) et examen 2 (50 %).

Responsables. A. Antkowiak

Thématique

Fluids Mechanics

Multiscale Hydrodynamic Phenomena

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF15 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

To master the analytical tools to solve problems, mainly arising in fluid mechanics, in which widely different scales are present. To provide an advanced knowledge in incompressible fluid mechanics, through the study of analytic solutions and classical asym.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

The method of matched asymptotic expansions is introduced, in which the ratio of scales appears as a small parameter in the equations. Examples: simple ordinary differential equations, and fluid flows with boundary layers . Low Reynolds numbers, Stokes equations, dissipation theorems, dynamics of falling bodies, Oseen approximation. High Reynolds numbers: special solutions, self similar jet and wake solutions.

Pré-requis. Basic notions of fluid mechanics

Références bibliographiques.

- Radványi K Zeytounian, Modélisation asymptotique en mécanique des fluides newtoniens, Berlin ; Heidelberg ; Paris : Springer-Verlag, cop. 1994.

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Méthode analytiques de résolution.

Compétences développées dans l'unité.

- Maîtriser les outils analytiques pour résoudre les problèmes.
- Application à des cas simples des développements asymptotiques.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 30 h (15 h CM et 15 h TD).

Travail personnel attendu : 30-40 h.

Évaluation. Examen écrit final.

Responsables. S. Zaleski & P.Y. Lagrée

Numerical methods for fluid mechanics

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF16 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

L'objectif du cours est d'amener le public à un haut niveau de compréhension de la dynamique numérique des fluides avec des mailles non structurées ajustées au corps. Le cours se concentrera principalement sur les méthodes des volumes finis et des éléments finis pour les équations de Navier-Stokes, incompressibles et compressibles avec ou sans modèles de turbulence. La génération de maillages sera également abordée. Le contenu de logiciels bien connus comme Fluent sera également analysé. Des illustrations et des exercices numériques seront réalisés avec notre logiciel open source interne freefem++.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Les équations de Stokes et les difficultés expliquées sur une grille uniforme de différences finies. Formulations variationnelles pour les équations de Navier-Stokes incompressibles. Génération de maillage et adaptation. Un solveur d'approximation par éléments finis de convection-diffusion et de projection de pression. Une méthode de volume fini pour les équations de Navier-Stokes compressibles. Difficultés et solutions pour le modèle de turbulence k-epsilon ; lois de paroi et forme faible des conditions aux limites.

Pré-requis. Notions de base des EDP, connaissance d'un langage de programmation appréciée.

Références bibliographiques.

- <https://freefem.org/>

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Approche variationnelle des équations de Stokes
- Volumes finis et différences finies.
- Forme faible des conditions aux limites.

Compétences développées dans l'unité.

- Programmation sur FreeFem++ des équations de Navier Stokes dans le cas étudié.
- Écrire les différentes équations et conditions aux limites.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 30 h (15 h CM et 15 h TD).
Travail personnel attendu : 30-40 h.

Évaluation. Examen écrit final.

Responsables. F. Hecht & O. Pironneau

Drops, bubbles

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF17 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

Les objectifs du cours sont les suivants :

- se familiariser avec les phénomènes de tension de surface qui jouent un rôle dans de nombreuses situations d'intérêt pratique, comme la détergence, le revêtement, les impacts de gouttes, la microfluidique, etc.
- manipuler des lois d'échelle simples, mais souvent subtiles, afin d'aborder des problèmes complexes.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Il consiste en :

- soit un projet de recherche expérimentale sur la physique de la matière molle ou les interfaces mobiles,
- soit un cours sur les phénomènes de la matière molle (conférences traditionnelles et projet court).

Les thèmes du cours sont les suivants :

- Gouttes et bulles
- Mouillage : mouillage idéal, mouillage complexe Processus de revêtement, impacts
- Instabilités interfaciales
- Feuilles et cloches liquides
- Agents de surface et autres additifs

Pré-requis. Aucun.

Références bibliographiques.

- Zaleski S. 2001, Science and Fluid Dynamics should have more open sources , direct publication on the web.
- Gilou Agbaglah, Sébastien Delaux, Daniel Fuster, Jérôme Hoepffner, Christophe Josserand, Stéphane Popinet, Pascal Ray, Ruben Scardovelli and Stéphane Zaleski 2011: Parallel simulation of multiphase flows using octree adaptivity and the volume-of-fluid method, C. R. Acad. Sci. Paris, online, doi: 10.1016/j.crme.2010.12.006. PDF of preliminary version.

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Phénomènes physiques en mécanique des bulles
- Approches par lois d'échelles

Compétences développées dans l'unité.

- Manipuler des lois d'échelles.
- Comprendre les phénomènes de surfaces.
- Réaliser des expériences et les interpréter.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 30 h (15 h CM et 15 h TD).

Travail personnel attendu : 30-40 h.

Évaluation. Examen écrit final.

Responsables. D. Queré & C. Baroud

Diffusion, advection and the dynamo effect

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF18 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

Le cours a deux objectifs :

- d'une part, nous étudions au niveau macroscopique les propriétés de transport dans les fluides. Nous commençons par les processus de diffusion et poursuivons par des problèmes de complexité croissante : advection-diffusion d'un scalaire passif puis d'un vecteur passif par un écoulement laminaire ou turbulent.
- d'autre part, nous étudierons la magnétohydrodynamique et la génération de champ magnétique par l'écoulement d'un liquide conducteur de l'électricité (dit effet dynamo) et étudierons en particulier les régimes de saturation où le champ magnétique n'est plus un vecteur passif. Quelques effets des fluctuations turbulentes sur la dynamique du champ magnétique seront présentés (intermittence on-off et renversements du champ magnétique).

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Équation de diffusion. Solutions auto-similaires.
- Advection d'un scalaire passif. Effet de la géométrie de l'écoulement. Diffusivité de Taylor.
- Advection d'un vecteur passif. Approximation de la magnétohydrodynamique.
- Rétroaction du champ sur l'écoulement. Ondes d'Alfvén. Génération du champ magnétique par l'écoulement d'un fluide conducteur de l'électricité. Effets de champ moyen en MHD
- Énergie magnétique et énergie cinétique, puissance Joules et dissipation visqueuse.
- Champ magnétique d'objets astrophysiques.
- Effets des fluctuations turbulentes sur l'instabilité dynamo: intermittence on-off et renversements du champ magnétique.

Pré-requis. Notions de base de mécanique des fluides. Introduction aux instabilités hydrodynamiques.

Références bibliographiques.

- G I Barenblatt, "Scaling, Self similarity and Intermediate Asymptotics", Cambridge Text in Applied Math.
- H.K. Moffat "Magnetic field generation in electrically conducting fluid"

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Connaissances associées aux différents phénomènes (advection, magnéto-hydro-dynamique) et les modélisations associées.
- Phénomènes de dissipation.

Compétences développées dans l'unité.

- Choisir la modélisation pour les phénomènes de transport.
- Analyse des effets de la turbulence.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 30 h (15 h CM et 15 h TD).

Travail personnel attendu : 30-40 h.

Évaluation. Examen écrit final.

Responsables. F. Petrelis

Introduction to hydrodynamic instabilities

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF19 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

L'objectif du cours est de présenter une introduction aux mécanismes physiques d'instabilité hydrodynamique et aux techniques les plus utilisées pour l'analyse de ces instabilités. Ces instabilités sont présentes dans la plupart des écoulements d'intérêt pour les scientifiques et dans les applications industrielles.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Le cours est divisé en quatre parties. Dans la première partie trois exemples de mécanismes physiques d'instabilité et de scénarios de transition à la turbulence sont introduits: ceux observés en convection thermique (instabilité de Rayleigh-Bénard); les instabilités centrifuges (écoulement de Taylor-Couette); - les instabilités de cisaillement dans les couches de mélange (instabilité de Kelvin-Helmholtz). Les différentes définitions et types d'instabilité sont discutées (instabilités locales et globales, etc.). Dans la deuxième partie on développe les techniques d'analyse de stabilité linéaire (en modes normaux) sur deux des exemples physiques discutés dans la première partie, notamment l'instabilité de Rayleigh-Bénard et celle de Kelvin-Helmholtz. Les effets de confinement sont discutés sur des équations modèles. La troisième partie du cours porte sur les analyses faiblement non-linéaires et introduit les équations d'amplitude. On introduit la méthode des échelles multiples et on l'applique à la dérivation des équations d'amplitude pour des systèmes fortement confinés (équation de Landau) et faiblement confinés (équation de Ginzburg-Landau). On discute les bifurcations élémentaires pour les systèmes fortement confinés. La dernière partie du cours est dédiée aux instabilités secondaires. Les instabilités de compression/dilatation (Eckhaus) et zig-zag sont discutées dans le contexte de la convection thermique. La théorie de Floquet est introduite et les différents types de déstabilisation d'un cycle limite sont discutés.

Pré-requis. Méthodes mathématiques élémentaires. Notions de base en mécanique des fluides.

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Instabilités hydrodynamiques.
- Équations de Landau et de Ginzburg Landau.
- Analyse de stabilité.

Compétences développées dans l'unité.

- Mettre en œuvre des techniques d'analyse de stabilité.
- Application à des cas fortement confinés

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 30 h (28 h CM et 2 h TD).

Travail personnel attendu : 30-40 h.

Évaluation. Devoirs maison individuels (exercices) non notés + 2-3 projets numériques (en groupe, notés toutes les deux semaines) + examen écrit final. Examen de rattrapage : oral.

Responsables. C. Cossu

Acoustics in fluid media

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU5MEF21 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

Description du cours (15 h) : Les principes physiques de l'acoustique dans les milieux fluides sont présentés en mettant l'accent sur les ondes planes et guidées, le rayonnement sonore, les résonateurs et les oscillations auto-entretenues. Les concepts théoriques sont illustrés par des exemples de divers instruments de musique et de l'acoustique des conduits. Une conférence est consacrée aux mesures et à l'analyse des signaux acoustiques.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

1. Équations de base de l'acoustique. Ondes planes et guidées. Sources sonores.
2. Résonateurs et oscillations auto-entretenues
3. Mesures et analyse des signaux acoustiques
4. Application aux instruments de musique et à l'acoustique des conduits

Pré-requis. Mécanique des milieux continus (CMI3, CMI4).

Références bibliographiques.

- Antoine Chaigne, Acoustique des instruments de musique, 2e édition revue et augmentée, octobre 2013.

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours, sujets de TD,

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Propagation des ondes, rayonnement sonore.

Compétences développées dans l'unité.

- Analyse de signaux sonores générés par des instruments de musique.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiellees totales : 60 h. T

ravail personnel attendu : 60-80 h.

Évaluation. Examen écrit.

Responsables. A. Chaigne

Separated flow/ compressive Flow

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF ?? Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

Notions théoriques et expérimentales sur les écoulements autour de corps en situation de décollements massifs de couche limite. Ces notions s'appliquent directement aux écoulements monophasiques autour de véhicules terrestres (automobiles, trains...) ou diphasiques autour de tous véhicules hydrodynamiques dans les régimes de supercavitation (torpilles, foils,...). La compréhension de l'origine des efforts aérodynamiques est à la base des stratégies en matière de contrôles des écoulements et s'inscrit dans le contexte actuel de réductions des coûts énergétiques dans les transports.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Le cours commence par rappeler ce qu'est le phénomène de séparation. Il est défini puis discuté en fonction du nombre de Reynolds; on verra que la séparation n'est pas propre aux effets inertiels. On se place ensuite dans la physique des écoulements à grand nombre de Reynolds, pour lesquels la notion de couche limite est centrale. Dans ce cadre où les équations de Navier Stokes se simplifient, la dynamique de la couche limite se développant sur un corps est étudiée, montrant ainsi le rôle majeur du gradient de pression. Cependant cette approche classique mène à une singularité dans la solution; ce qui la rend totalement inefficace pour décrire le décollement. La description complète au voisinage d'un décollement sera donnée par la théorie dites du triple pont. Après cette base théorique, on découvrira la complexité des écoulements réels autour de cylindres de sections variées. L'écoulement moyen et la dynamique du sillage seront commentés en fonction du nombre de Reynolds. On comprendra le rôle majeur de la nature turbulente ou laminaire de la couche limite à l'aval du décollement et comment elle peut affecter les efforts moyens et la dynamique du sillage. On traite ensuite théoriquement de l'écoulement séparé autour d'une plaque après avoir préalablement présenté la théorie des écoulements potentiels à surfaces libres. Le désaccord avec l'expérience dévoile le problème théorique de la taille finie de la zone de recirculation. Malgré ce problème de taille, la théorie s'adapte encore mieux aux écoulements cavitants, pour lesquels une séance de cours en laboratoire est prévue autour du tunnel de cavitation de l'Unité de Mécanique de l'ENSTA.

Pré-requis. Bases élémentaires de la théorie des écoulements potentiels. Notions sur les Instabilités de cisaillement. Couche limite de Prandtl.

Références bibliographiques.

- http://wwwy.ensta.fr/~cadot/separated%20flow%20pour%20internet/separated_flows.html

Ressources mises à disposition des étudiants. Notes de cours

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Modélisation écoulements turbulents (isotrope ou non).
- Couche limite en turbulence.

Compétences développées dans l'unité.

- Manipuler les différentes équations de la turbulence.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 15 h réparties en 10 h CM, 5 h de TD. Travail personnel attendu : 10 - 15 h.

Évaluation. Examen oral

Responsables. S. Chibbaro

Thématique

Modélisation et Simulation en Hydrodynamique

Modélisation des milieux continus fluides

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF00

Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

Cet enseignement a pour but de donner aux étudiants de solides bases pour aborder des thèmes de recherche extrêmement variés, fondamentaux ou appliqués, tant au cours de leur stage de Master que dans leur orientation post-Master. Ce cours donne une présentation générale des lois de bilan et des méthodes pour construire des lois de comportement. L'ensemble est illustré par de nombreux exemples et permet aux étudiants d'acquérir des connaissances fondamentales pour la modélisation des milieux continus fluides.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Description cinématique des milieux continus, transport convectif, déformations ; Formulation générale des lois de bilan. Milieux continus classiques, mélanges, milieux avec micro-structures ; Inégalité de Clausius-Duhem ; Fermeture des lois de bilan à l'aide des lois de comportement et détermination des équations d'évolution. Méthodes générales pour construire des lois de comportement ; Hypothèse de l'état local associé. Forces et flux généralisés. Thermodynamique des processus irréversibles ; Notion d'objectivité. Exemples : milieux fluides, granulaires, polymères, ...

Pré-requis. Cours de Mécanique « Fluides et solides » de CMI4 ou cours de Mécanique des milieux continus équivalent

Références bibliographiques.

- P. Germain et P. Muller, Introduction à la mécanique des milieux continus, Masson, Paris, 1994
- J. Coirier, Mécanique des milieux continus – concepts de base, Dunod, Paris, 1997
- S.R. de Groot et P. Mazur, Non equilibrium thermodynamics, Dover Publications, 1984

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Description de la cinématique et des efforts intérieurs d'un fluide.
- Lois d'état et d'évolution.
- Thermodynamique des processus irréversibles.

Compétences développées dans l'unité.

- Écrire un modèle de comportement complet appliqué à un fluide en évolution.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 30 h réparties en 20 h CM et 10 h de TD.

Travail personnel attendu : 30 – 40 h.

Évaluation. Examen en deux parties (/50) et (/50)

Responsables. C. Croizet

Milieux poreux et suspensions

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF23 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

Les milieux hétérogènes sont des milieux physiques composés de deux constituants ou plus (matériaux, fluides), comme un massif rocheux fracturé, un tas de sable, un matériau céramique (milieux poreux), une suspension de pigments dans une peinture... De tels milieux sont caractérisés par deux échelles : l'échelle microscopique des hétérogénéités (fracture, grain de sable, particule en suspension) et l'échelle macroscopique sur laquelle on veut étudier le milieu. L'objectif du cours est de décrire les techniques permettant de prendre en compte les caractéristiques microscopiques dans la modélisation globale macroscopique du milieu, pour construire les lois de comportement des milieux complexes multi-échelles.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Le cours est structuré en deux parties :

- Milieux poreux : Exemples, caractéristiques géométriques. Techniques de modélisation macroscopique : méthodes statistiques de prise de moyenne, méthode de l'homogénéisation avec développements multi-échelles pour des milieux périodiques. Écoulements monophasiques : lois de filtration (Darcy, Brinkman, Forcheimer) ; modèles de perméabilité. Écoulements diphasiques non miscibles, application aux roches pétrolifères. Écoulements diphasiques miscibles, application aux polluants (dispersion de Taylor, coefficients de diffusion effective). Écoulement à l'interface d'un poreux (expérience de Beavers & Joseph).
- Dynamique des suspensions : Notions de base en microhydrodynamique (écoulement de Stokes, mouvement d'une sphère, Stokeslet, Rotlet, Stresslet, interactions hydrodynamiques, interactions de doublet de sphères, interactions de lubrification, forces inter-particulaires, mouvement Brownien). Modélisation macroscopique des suspensions (techniques statistiques, lois de bilan, tenseur des contraintes). Sédimentation des suspensions (vitesse de sédimentation d'une sphère, d'un doublet de sphères, vitesse de sédimentation moyenne d'une suspension diluée, approximation pour les suspensions non-diluées, effet du mouvement brownien, des forces attractives, fluide porteur non-Newtonien). Rhéologie des suspensions (suspension diluée de sphères rigides: viscosité d'Einstein, approximation pour suspensions non-diluées, suspensions de bâtonnets, suspensions de particules déformables)

Pré-requis. Mécanique des milieux continus, mécanique des fluides, calcul tensoriel

Références bibliographiques.

- Bear J. Dynamics of fluids in porous media, Elsevier, 1972.
- E. Sanchez-Palencia, Non homogeneous media and vibration theory, Lecture Notes in Physics 127, Springer, Berlin, 1980
- Guyon E., Hulin, J.-P. & Petit L., Hydrodynamique physique, EDP/CNRS, 2001
- D. Barthes-Biesel, Microhydrodynamique et fluides complexes, Ellipses, Ed. Ecole Polytechnique, 2011
- E. Guazzelli and J.F. Morris, A Physical Introduction to Suspension Dynamics, Cambridge, University Press, 2011

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Méthodes de passage micro macro (moyenne, homogénéisation...).
- Modèles pour l'hydro-dynamique.

Compétences développées dans l'unité.

- Effectuer des passages micro macro pour calculer des propriétés effectives.
- Appliquer des modèles de dynamique de suspensions.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 30 h réparties en 15 h CM et 15 h de TD. Travail personnel attendu : 30 -40 h.

Évaluation. Examen en deux parties (/50) et (/50)

Responsables. Mme A. Mongruel et D. Baltean-Carles

Écoulements multiphasiques : dynamique des bulles et des gouttes

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU5MEF02 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

On observe dans la nature et dans l'industrie beaucoup d'écoulements à surface libre : à grande échelle la surface de la mer soumise à l'action du vent et des courants sous-marins, les cataractes des rivières de montagne, et à plus petite échelle l'eau qui coule du robinet, les gouttes de pluies... Pour ces petits objets (vides particulièrement, la force de tension de surface joue un rôle déterminant en venant sculpter les interfaces et conférer par exemple aux gouttes de pluie et aux petites bulles leur forme sphérique.

Pour étudier et comprendre ces écoulements, en plus de la mécanique des fluides classique, il nous faut les outils conceptuels et techniques qui vont nous permettre de décrire le mouvement de la surface, et décrire les forces qui s'y appliquent. L'objectif de ce cours est de se doter des outils pour comprendre et caractériser les écoulements diphasiques, ainsi que se familiariser avec plusieurs paradigmes de ce type d'écoulement.

Le cours s'appuiera également sur des séances de travaux pratiques : démonstrations et manipulations expérimentales, résolution numérique d'équations typiques des écoulements avec interfaces, et utilisation des logiciels open-source de résolution des équations de Navier-Stokes avec interfaces Gerris et Basilisk, qui permettront de calculer et de visualiser les dynamiques et morphologies d'écoulements à surface libre. L'étudiant peut ainsi mettre en pratique immédiatement ses connaissances et manipuler les outils qui sont ceux des chercheurs dans le domaine.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Panorama général des phénomènes liés aux surfaces libres. Description mathématique du mouvement d'une ligne/d'une surface. Origine microscopique de la tension de surface. Saut de pression à l'interface lié à la courbure et à la tension de surface. Angle de contact / phénomènes de mouillage. Hydrostatique et interfaces : le ménisque, équilibre entre tension de surface et gravité. Hydrodynamique et interfaces : jets et nappes liquides. Désintégration de jets liquides. Oscillations de gouttes et de bulles. Interfaces et instabilités : instabilités de Rayleigh-Plateau et de Rayleigh-Taylor. Phénomènes de singularités liés à la tension de surface : solution autosimilaire du détachement d'une goutte et dynamique post-rupture. Méthodes numériques pour le traitement des interfaces : méthodes de marqueurs, level set, volume of fluid. Méthodes de résolution des équations 1D avec courbure. Utilisation des logiciels Gerris et Basilisk. Notions sur l'ébullition.

Pré-requis. Bases solides en mécanique des fluides et en mécanique des milieux continus indispensables. Une connaissance élémentaire des propriétés microscopiques de la matière est bienvenue.

Références bibliographiques.

Sur la mécanique des fluides générale :

- 'An Introduction to Fluid Dynamics' de G.K. Batchelor (Cambridge University Press)
- 'Hydrodynamique Physique' de Guyon, Hulin & Petit (CNRS Editions)

Sur les phénomènes capillaires :

- 'Gouttes, Bulles, Perles & Ondes' de de Gennes, Brochart-Wyart et Quéré (Belin)

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Description mathématique des phénomènes à surfaces libres.
- Modèles pour les oscillations et instabilités.

Compétences développées dans l'unité.

- Observer et mesurer les phénomènes lors de TP avec analyse d'images.
- Programmer les modèles dans des versions adaptées aux observations.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 60 h réparties en 40 h CM, 10 h de TD et 10 h de TP.

Travail personnel attendu : 60-80 h.

Évaluation. Examen écrit final (/60) et un projet (/40)

Responsables. S. Zaleski

Méthodes numériques pour les écoulements incompressibles

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF04 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

Les objectifs du cours sont de donner aux étudiants les fondements théoriques nécessaires pour comprendre et résoudre les difficultés spécifiques de la simulation des écoulements incompressibles. Les étudiants seront encouragés à programmer certaines parties de code numérique illustrant la théorie et à évaluer la validité des résultats obtenus. Les concepts présentés seront illustrés en TP à l'aide du logiciel matlab.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

8 sessions de 4 heures : 1- Incompressibilité – Classification des EDP – Discrétisation 2- Consistance, stabilité et convergence de schémas numériques. Analyse de Fourier. Interpolation et approximation. 3- (TP1) Analyse de Fourier 4- Régularité de la solution. Comparaison entre l'approche volumes finis, éléments finis, méthodes spectrales. Méthodes spectrales pour les équations elliptiques. 5- (TP2) Stabilité et convergence des schémas numériques. 6- Méthodes itératives. Problème de Stokes. 7- (TP3) Méthodes itératives. Problème de Stokes. 8- Résolution de la pression (opérateur d'Uzawa, méthodes de projection, matrice d'influence)

Pré-requis. Cours de CMI4 course sur les méthodes numériques– Connaissance de matlab utile, mais non obligatoire

Références bibliographiques.

- Canuto, Hussaini, Quarteroni, Zang, « Spectral Methods : Fundamentals in single domains », 2010, Springer
- Hirsch « Numerical Computation of internal and external flows », 2007, Elsevier

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Description mathématique des phénomènes à surfaces libres.
- Modèles pour les oscillations et instabilités.

Compétences développées dans l'unité.

- Observer et mesurer les phénomènes lors de TP avec analyse d'images.
- Programmer les modèles dans des versions adaptées aux observations.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiels totales : 32 h réparties en 20 h CM et 12 h de TP.

Travail personnel attendu : 30 – 40 h.

Évaluation. Examen en contrôle continu (/60) et TP (/40)

Responsables. S. Zaleski

Écoulements et transferts en milieux naturels

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF05

Mention Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications

Présentation pédagogique.

Le cours concerne les écoulements complexes et les transferts thermiques caractéristiques d'un grand nombre de phénomènes naturels (océan, atmosphère, glaciers, dunes). Cet enseignement à caractère fondamental a pour objectif de fournir les bases physiques permettant l'étude de ces phénomènes.

Le cours sera divisé en deux parties. Dans une première partie, l'accent sera mis sur la convection naturelle. On présentera les équations et les paramètres essentiels permettant de décrire les problèmes de convection d'origine thermique (couche limite de convection naturelle, panaches). Dans une seconde partie, on étudiera suivant les années, soit les écoulements en milieux granulaires (dunes, avalanches de roches, coulées de boues ...), soit les ondes induites par la stratification en densité observée en milieu océanique ou lacustre.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Concernant la convection, les analyses de couches limites en milieu fluide sont appliquées au cas de la convection forcée et naturelle en régime laminaire. On montre également comment obtenir des solutions analytiques dans des configurations géométriques simples. On étudie les effets de confinement. On introduit la notion de panache et de solution auto-similaire.

Pour les écoulements granulaires, on présente comment des écoulements gravitaires de cailloux, de boues ou de sédiments peuvent être modélisés par des fluides non newtoniens (avec souvent des méthodes auto-similaires). Enfin concernant les écoulements fluides stratifiés, on met en évidence la notion d'onde interne, de turbulence en stratifié, de courants de gravité.

Pré-requis.

Mécanique des milieux continus, Introduction à la mécanique des fluides, initiation aux transferts de chaleur.

Références bibliographiques.

- Bejan, Convection Heat Transfer}, Mac Graw Hill, 1985
- Gebhart, Y. Jaluria P. Mahajan and B. Sammakia, Buoyancy-induced Flows and Transport, Hemisphere publishing corp., 1988
- D.J. Tritton, Physical Fluid Dynamics, Oxford Science Publications, 1988
- J.F. Sacadura, Initiation aux transferts thermiques, CAST, Editions Tec & Doc, 1980
- Andreotti Y Forterre O Pouliquen Les milieux granulaires, EDP Sciences, 2011

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Bilans de matière et quantité de mouvement. Conditions limites.

Compétences développées dans l'unité.

- Analyse phénoménologique d'écoulements.
- Modélisation d'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 analytique et analyse critique des résultats.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 30 h réparties en 20 h de CM et 10 h TD.

Travail personnel attendu : 30 - 40 h.

Évaluation. Deux examens écrits

Responsables. M. P.-Y. Lagrée et Mme S. Mergui

Vortex en hydro-dynamique

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF06 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

Familiariser les étudiants avec un des concepts centraux de la mécanique des fluides : la vorticité et les vortex. On montrera par de nombreux exemples la présence de structures cohérentes de type tourbillons dans des écoulements très divers de nature fondamentale (turbulence), géophysique et environnementale, ou appliquée (aéronautique en particulier). Ce cours introduit les outils physiques et analytiques nécessaires à la compréhension de la notion de vortex, de leur dynamique et de leur caractérisation. Ce cours s'adresse également aux doctorants.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Vorticité : définitions, exemples, origine, loi de Biot-Savart, théorème de Kelvin, lois de conservation de Helmholtz. Approche bidimensionnelle : formation, vortex ponctuels, taches de vorticité, ondes de Kelvin, fusion, dynamique proche paroi, dipôles. Tourbillons tridimensionnels : quelques solutions de Navier- Stokes, filaments de vorticité, formation, instabilités, reconnexion. Applications en aérodynamique. Vortex et couche limite, vortex et surface libre, vortex et mélange, tourbillons géophysiques, vortex et singularité.

Pré-requis. Notions de base de mécanique des fluides incompressibles (équation de Navier-Stokes).

Références bibliographiques.

- Hydrodynamique Physique, Guyon, Hulin et Petit, Editions du CNRS (2012).
- Elementary fluid dynamics, Acheson, Clarendon Press, Oxford (1990).

Ressources mises à disposition des étudiants. Notes de cours.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Modélisation de la vorticité en mécanique des fluides.

Compétences développées dans l'unité.

- Appliquer les concepts de la vorticité à des écoulements aéro-dynamique.
- Étude des écoulements proches des parois.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 30 h réparties en 15 h CM et 15 h de projet.

Travail personnel attendu : 30 – 40 h.

Évaluation. Examen écrit (50 %), étude d'article (50 %).

Responsables. S. Chibbaro

Projet numérique

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF32 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

Ce projet a pour objectif la mise en pratique de toutes les notions vues en cours sur la base d'une étude de cas. Les étudiants devront principalement confronter des méthodes analytiques à des solutions numériques et ce après une étude bibliographique qui leur permettra d'effectuer un choix raisonné des méthodes à utiliser.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Le contenu est associé au sujet qui couvre (plus ou moins) l'ensemble du programme.

Pré-requis. Les cours de master.

Références bibliographiques. Dépendent du sujet et doivent être cherchées par les étudiants.

Ressources mises à disposition des étudiants. Notices des logiciels, outils de recherche bibliographique.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Complément de formation spécifique au sujet travaillé.

Compétences développées dans l'unité.

- Appliquer les concepts vus en cours à des cas pratiques.
- Choisir les méthodes numériques adaptées.
- Programmer, utiliser des codes de calculs.
- Rédiger et présenter un rapport de stage.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 4 h de présentation du projet.

Travail personnel attendu : 60 - 80 h.

Évaluation. Rapport de projet écrit (50 %), soutenance orale (50 %).

Responsables. A. Antowiak

Thématique

Aérodynamique et Aéroacoustique

Acoustique Aérienne

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF07 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

- acquérir/consolider les bases en acoustique (en milieu fluide) ;
- aborder différents problèmes d'acoustique aérienne (diffraction, réfraction, modèles de propagation, effets du milieu (hétérogénéités en température, en vent, ...)) ;
- faire le lien entre des problèmes industriels et les notions fondamentales (pollution sonore, acoustique des transports terrestre et aérien ...).

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- bases de l'acoustique (équation des ondes, solutions classiques, réflexion/transmission, énergie acoustique) ;
- équation des ondes dans un milieu avec écoulement ;
- acoustique géométrique ;
- guide d'ondes ;
- notions d'acoustique non linéaire ;
- théorème de Kirchhoff ;
- sources acoustiques ;
- bases de l'aéroacoustique ;
- bases de la vibro-acoustique ;

Pré-requis. Equations de bilan en mécanique des fluides

Références bibliographiques.

- Pierce, Acoustics, an introduction to Its Physical Principles and Applications, Acoustical Society of America
- D. Blackstock, Fundamentals of Physical Acoustics, J. Wiley & sons
- F. Coulouvrat & R. Marchiano, Propagation Atmosphérique (Note de cours)

Ressources mises à disposition des étudiants. Notes de cours

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Modélisation de l'acoustique (non linéaire, vibro-acoustique, acoustique aérienne).

Compétences développées dans l'unité.

- Consolider les bases en acoustique (en milieu fluide).
- Savoir faire le lien entre des problèmes industriels et les notions scientifiques.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiellees totales : 30 h réparties en 20 h CM, 10 h de TD. Travail personnel attendu : 30-40 h.

Évaluation. Examen écrit.

Responsables. Arnaud Antkowiak

Aérodynamique fondamentale

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** – MU5MEF08

Mention Master science pour l'ingénieur mention mécanique, parcours Mécanique des fluides et Applications

Présentation pédagogique.

L'UE est une introduction à l'aérodynamique incompressible et compressible des aéronefs. L'accent est mis sur la détermination des écoulements autour des profils d'aile et des ailes d'envergure finie, via les coefficients aérodynamiques, la distribution de la pression et la description des chocs. L'UE donne les notions fondamentales nécessaires à la conception et à la R&D dans les domaines aéronautique ou automobile.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Rappels de mécanique du vol, coefficients aérodynamiques. Aérodynamique externe incompressible : écoulements autour des corps profilés, effets visqueux, décollement, transition, polaire de profil ; théorie des profils minces ; initiation au logiciel Xfoil ; ailes d'envergure finie, écoulement induit, traînée induite. Aérodynamique compressible : ondes de choc et faisceaux de détente sur des profils supersoniques ; étude du fonctionnement d'entrées d'air et de tuyères en régime transsonique. TP : 1/ profil d'aile en soufflerie (coefficients aérodynamiques, distribution de pression, décollement de couche limite) ; 2/ simulation numérique compressible du même profil et comparaison. Projet : dimensionnement d'une aile. Utilisation de Xfoil pour l'étude du profil, et codage (sous Matlab par exemple) d'un outil numérique pour traiter l'aile d'envergure finie.

Prérequis. Bases de mécanique des fluides (CMI3, CMI4).

Références bibliographiques.

- FAURE, Th. 2008 Dynamique des fluides appliquée. Applications à l'aérodynamique. Dunod, Paris.
- ANDERSON, Jr, J.D. 2001 Fundamentals of aerodynamics. 3rd edition. McGraw Hill, Columbus.
- BERTIN & CUMMINGS 2008 Aerodynamics for engineers. 5th edition. Prentice Hall.

Ressources mises à disposition des étudiants

Polycopiés de cours et de TD.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Écoulements compressibles.
- Distribution de la pression et des chocs.

Compétences développées dans l'unité.

- Applications de la théorie lors du projet.
- Codage en matlab du programme.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiels totales : 43 h réparties en 13 séances de 1,5 h CM et 13 séances de 1,5 h de TD.

Un projet de 4 h est également prévu.

Travail personnel attendu : 30 - 40 h.

Évaluation.

L'évaluation se fait sur la base d'un examen écrit de deux heures

Responsables. Mme P. Cinella

Méthodes numériques pour les écoulements incompressibles

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF04 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

Les objectifs du cours sont de donner aux étudiants les fondements théoriques nécessaires pour comprendre et résoudre les difficultés spécifiques de la simulation des écoulements incompressibles. Les étudiants seront encouragés à programmer certaines parties de code numérique illustrant la théorie et à évaluer la validité des résultats obtenus. Les concepts présentés seront illustrés en TP à l'aide du logiciel matlab.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

8 sessions de 4 heures : 1- Incompressibilité – Classification des EDP – Discrétisation 2- Consistance, stabilité et convergence de schémas numériques. Analyse de Fourier. Interpolation et approximation. 3- (TP1) Analyse de Fourier 4- Régularité de la solution. Comparaison entre l'approche volumes finis, éléments finis, méthodes spectrales. Méthodes spectrales pour les équations elliptiques. 5- (TP2) Stabilité et convergence des schémas numériques. 6- Méthodes itératives. Problème de Stokes. 7- (TP3) Méthodes itératives. Problème de Stokes. 8- Résolution de la pression (opérateur d'Uzawa, méthodes de projection, matrice d'influence)

Pré-requis. Cours de CMI4 course sur les méthodes numériques– Connaissance de matlab utile, mais non obligatoire

Références bibliographiques.

- Canuto, Hussaini, Quarteroni, Zang, « Spectral Methods : Fundamentals in single domains », 2010, Springer
- Hirsch « Numerical Computation of internal and external flows », 2007, Elsevier

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié et supports de cours.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Description mathématique des phénomènes à surfaces libres.
- Modèles pour les oscillations et instabilités.

Compétences développées dans l'unité.

- Observer et mesurer les phénomènes lors de TP avec analyse d'images.
- Programmer les modèles dans des versions adaptées aux observations.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 32 h réparties en 20 h CM et 12 h de TP.
Travail personnel attendu : 30 – 40 h.

Évaluation. Examen en contrôle continu (/60) et TP (/40)

Responsables. S. Zaleski

Quantification des incertitudes en CFD

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF39 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

L'objectif de ce cours est de se familiariser avec les concepts/outils de quantification des incertitudes et la modélisation stochastique/statistique des problèmes d'ingénierie et plus particulièrement dans le cadre de la mécanique des fluides numériques (CFD). Différentes méthodes stochastiques s'appuyant sur la théorie des probabilités seront abordées pour venir enrichir la prédiction numérique déterministe classique du système mécanique. Ces techniques permettent notamment un meilleur contrôle de l'erreur numérique, l'obtention « barres d'erreur », l'identification des paramètres influents cad l'étude de la sensibilité du système, la propagation des incertitudes, l'analyse de risque.

Les modèles stochastiques et méthodes numériques présentés seront implémentés pour des exemples concrets d'écoulements fluides lors de TP sur ordinateur avec le logiciel Matlab.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Le cours est organisé comme suit :

- Introduction à la quantification des incertitudes en mécanique numérique
- Rappels de probabilités/statistiques
- Introduction aux méthodes de simulation stochastiques
- Formalisme et dérivation des représentations spectrales stochastiques
- Méthodes de résolution numériques
- Optimisation robuste
- Applications : illustration sur des exemples concrets d'écoulements fluides revisités dans un contexte incertain

Pré-requis. Maîtrise de notions de base en probabilités et statistiques facilite la compréhension et l'acquisition des concepts de cette UE.

Références bibliographiques.

- Stochastic finite elements, Ghanem & Spanos, Dover 2003
- Numerical methods for stochastic computations : a spectral methods approach, Xiu, Princeton University 2010
- Stochastic Simulation: Algorithms and Analysis, Asmussen & Glynn, Springer 2007

Ressources mises à disposition des étudiants. Notes de cours

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Modélisation des incertitudes et de leur propagation.

Compétences développées dans l'unité.

- Identifier les paramètres influents.
- Implanter et un modèle stochastique dans Matlab.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 34 h réparties en 14 h CM, 14 h de TD et 6 h de TP.

Travail personnel attendu : 30-40 h.

Évaluation. Compte-rendu de TP Matlab (20 % + 30 %) + 1 examen final écrit (50 %)

Responsables. A. Antkowiak

Modélisation et simulation en aéroélasticité

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF10 **Mention** Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

L'objectif de cette U.E est de présenter les phénomènes physiques et les principes fondamentaux régissant l'apparition d'instabilités aéroélastiques lorsqu'une structure souple, telle qu'une voilure d'avion ou une éolienne, est soumise à des excitations aérodynamiques. Ces phénomènes peuvent entraîner, en fonction des situations, une usure prématurée de la structure par fatigue ou sa ruine immédiate. La modélisation du couplage entre le fluide et la structure devient alors indispensable pour déterminer avec précision les conditions critiques d'apparition de ces instabilités ainsi que leur nature.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Partie 1 : Modélisation des instabilités aéroélastiques

- Classification générale des interactions fluide-structure, triangle des forces de Collar
- Phénomènes de divergence, flottement, méthode V-g.
- Eléments d'aérodynamique instationnaire (fonctions de Theodorsen, Sears)
- Réponse d'une structure souple aux rafales atmosphériques et à la turbulence
- Aéroélasticité nonlinéaire: bifurcations de Hopf, cycles limites, chaos

Partie 2: Simulation numérique pour les interactions fluide-structure

- Méthodes numériques de type éléments finis pour les calculs aéro-mécaniques. Application au calcul des modes propres mécaniques et aéro-élastiques, calcul de la déformation de la structure sous chargements aérodynamique stationnaire, détermination de la réponse dynamique
- Techniques numériques pour le couplage fluide-structure (approches découplée et monolithique, méthode par troncature modale, déformation de maillage, formulation ALE, pas de temps dual)

Travaux Pratiques sous Matlab

Simulation numérique du flottement d'une structure élastique dans un écoulement supersonique : Détermination de la frontière d'instabilité et calcul des cycles limites d'oscillations.

Pré-requis.

Connaissances générales en aérodynamique et dynamique des structures. Notions élémentaires en simulation numérique d'écoulement et en calcul des structures.

Références bibliographiques.

- P. Hémon, « Vibrations des structures couplées avec le vent », Ed. de l'école Polytechnique, 2006
- E.H. Dowell « A modern Course in Aeroelasticity », Kluwer Academic Publishers, 3rd Ed. 1995

Ressources mises à disposition des étudiants. Notes de cours

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Modélisation des incertitudes et de leur propagation.

Compétences développées dans l'unité.

- Identifier les paramètres influents.
- Implémenter un modèle stochastique dans Matlab.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 30 h réparties en 12h CM, 10 h de TD et 8 h de TP.

Travail personnel attendu : 30-40 h.

Évaluation. Compte-rendu de TP Matlab (20 %) + 1 examen final écrit (80 %)

Responsables. M. J.C. Chassaing et Mme A. Vincenti

Projet numérique

Niveau CMI5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5MEF32 Master de Mécanique - Mécanique des fluides et applications.

Présentation pédagogique.

Ce projet a pour objectif la mise en pratique de toutes les notions vues en cours sur la base d'une étude de cas. Les étudiants devront principalement confronter des méthodes analytiques à des solutions numériques et ce après une étude bibliographique qui leur permettra d'effectuer un choix raisonné des méthodes à utiliser.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Le contenu est associé au sujet qui couvre (plus ou moins) l'ensemble du programme.

Pré-requis. Les cours de master.

Références bibliographiques. Dépendent du sujet et doivent être cherchées par les étudiants.

Ressources mises à disposition des étudiants. Notices des logiciels, outils de recherche bibliographique.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Complément de formation spécifique au sujet travaillé.

Compétences développées dans l'unité.

- Appliquer les concepts vus en cours à des cas pratiques.
- Choisir les méthodes numériques adaptées.
- Programmer, utiliser des codes de calculs.
- Rédiger et présenter un rapport de stage.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiellees totales : 4 h de présentation du projet.

Travail personnel attendu : 60 - 80 h.

Évaluation. Rapport de projet écrit (50 %), soutenance orale (50 %).

Responsables. A. Antowiak

Semestre 10

Projet d'approfondissement

Niveau CMI5 - **Semestre** S10 - **Crédits** 3 ECTS - **Code** MU5EEG04 – **Mention** Master Mécanique

Présentation pédagogique.

Ce projet d'approfondissement vient en complément de la spécialisation et peut prendre différentes formes. Il peut représenter le suivi d'une unité optionnelle de spécialité supplémentaire au semestre S9 pour élargir le socle de connaissances ou bien valoriser une partie bibliographique du stage qui aurait été significative, ou encore être associé à une production scientifique par exemple dans le cadre du stage (présentation dans un colloque scientifique, soumission d'une publication). Il peut également valoriser un investissement associatif important ou encore traduire la validation d'un enseignement sous forme de MOOC (par exemple, un enseignement partagé sur la plate forme European Virtual Exchange du réseau d'universités partenaires de Sorbonne Université Alliance 4eu+ : Université Charles de Prague (République Tchèque), d'Heidelberg (Allemagne) et de Varsovie (Pologne), universités de Milan (Italie) et de Copenhague (Danemark)) . Ce projet est généralement mené de façon individuelle.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Dépendant de la forme du projet

Pré-requis minimum. Les connaissances acquises dans l'ensemble des unités d'enseignement depuis le CMI1.

Références bibliographiques. Fonction du sujet de projet.

Ressources mises à disposition des étudiants. Fonction du sujet de projet et de son environnement.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité

- Fonction du sujet de projet.

Compétences développées dans l'unité.

- Prendre du recul sur son parcours de formation.
- Savoir gérer un projet personnel avec engagement, le défendre avec conviction.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Travail personnel attendu : 30 - 40 h environ (et souvent plus).

Évaluation. Évaluation généralement sous la forme d'une note du rapport écrit, de soutenance orale et d'implication.

Responsables. Y. Berthaud, H. Dumontet.

Stage de fin d'études

Niveau CMI5 - **Semestre** S10 - **Crédits** 30 ECTS - **Code** MU5MES03 - **Mention** Master Mécanique

Présentation pédagogique.

Ce stage de fin d'études se déroule sur 24 semaines en fin de la formation. L'objectif est de permettre à l'étudiant d'acquérir un comportement d'ingénieur, notamment l'autonomie et la capacité à travailler en équipe avec efficacité dans l'entreprise, en s'appuyant sur les connaissances acquises durant sa formation et les compétences développées dans les activités de mise en situation (projets, et précédents stages). Il consolide la spécialisation et valide ces acquis.

Ce stage peut se dérouler en France ou à l'étranger, en entreprise (généralement des départements de Recherche et Développement de grands groupes industriels) ou laboratoire de recherche (à condition que l'étudiant ait alors une expérience significative de stage en entreprise). Il conduit à la rédaction d'un rapport et d'une soutenance en français ou en anglais. La soutenance est effectuée devant un jury mixte composé de membres de l'équipe pédagogique et d'extérieurs dont l'encadrant en entreprise dans le cas d'un stage en entreprise.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Les responsables de parcours valident la cohérence du sujet, son adéquation avec la spécialité de la formation, avec le projet professionnel de l'étudiant et ses résultats académiques. Ce stage fait l'objet d'une convention de stage signée par l'entreprise / laboratoire, l'université et l'étudiant.

Pré-requis minimum. L'ensemble des connaissances et compétences développées depuis le début du cursus.

Ressources mises à disposition des étudiants.

- Liste et descriptif des sujets de stage antérieurs. Offres de stage.
- Procédures de validation, directives de rédaction, conventions stage.
- Ressources bibliographiques en fonction du sujet.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Propres à chaque stage selon le sujet 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 œuvre ses connaissances et les appliquer à un sujet ouvert 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, prendre confiance dans l'insertion professionnelle.
- Savoir communiquer sur son travail à l'écrit et oral.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel. 24 semaines de stage à temps plein entre mars et fin août.

Évaluation. Rapport de stage (/35, une cinquantaine de pages hors annexes), évaluation des tuteurs (/30), soutenance orale (/35, 25 minutes d'exposé, 25 minutes de questions).

Responsables. Responsables des parcours, M. Y. Berthaud et Mme H. Dumontet (responsables du CMI).