

Syllabus Coursus Master Ingénierie, Mécanique.

Sorbonne Université CMI5

Parcours Énergétique et Environnement (EE)

Liste of Teaching Units

Semestre 9

Core Units

- Technoscience, ethic and society
- Défis énergétiques du 21^e siècle

Thématique Outils et méthodes pour les bâtiments zéro énergie (OMEBA)

- Modélisation des écoulements turbulents
- Aspects physique, numériques, réglementation de la modélisation dans le bâtiment.
- Confort thermique à haute efficacité énergétique.
- Transferts radiatifs et convectifs : modélisation et simulation.

Thématique Aérodynamique et Impact Environnemental (AERIEN)

- Modélisation des écoulements turbulents
- Simulation numérique pour l'ingénierie énergétique
- Aéro-acoustique et énergétique des moteurs aéronautiques
- Transferts radiatifs et convectifs : modélisation et simulation.

Thématique Combustion, limitation des émissions, nouvelles énergies (CLEANER)

- Carburants pour la transition énergétique
- Modélisation aéro-thermochimique, applications à la propulsion
- Aéro-acoustique et énergétique des moteurs aéronautiques
- Stockage Batterie et propulsion électrique

Semestre 10

- Certification
- Projet d'approfondissement
- Stage de fin d'études

Intitulé Unité d'Enseignement – Cycle Master – CMI5 – 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 Energétique et Environnement (EE)									
	Défis énergétiques du 21e siècle	MU5MEE01	28	30			58	60-80	6	
	de thématique Enseignements électifs	Thématique Outils et méthodes pour les bâtiments zéro énergie (OMEBA)								
		Modélisation des écoulements turbulents	MU5MEE05	22	22	12		56	80-90	6
		Aspects physique, numériques, réglementation bâtiment.	MU5MEE07	31	16			47	50-70	6
		Confort thermique à haute efficacité énergétique.	MU5MEE08	32	10	24		66	50-70	6
		Transferts radiatifs et convectifs : modélisation et simulation.	MU5MEE04	35	17	6		58	80-90	6
		Thématique Aérodynamique et Impact Environnemental (AERIEN)								
		Modélisation des écoulements turbulents	MU5MEE05	22	22	12		56	80-90	6
		Simulation numérique pour l'ingénierie énergétique	MU5MEE02	8		48		56	60-80	6
		Aéro-acoustique et énergétique des moteurs aéronautiques	MU5MEE09	36	16	4		56	60-80	6
		Transferts radiatifs et convectifs : modélisation et simulation.	MU5MEE04	35	17	6		58	80-90	6
		Thématique Combustion, limitation des émissions, nouvelles énergies (CLEANER)								
		Carburants pour la transition énergétique	MU5MEE03	42		18		60	80-90	6
		Modélisation aérothermochimique, applications à la propulsion	MU5MEE06	24		43		67	80-90	6
		Aéro-acoustique et énergétique des moteurs aéronautiques	MU5MEE09	38	16	4		58	60-80	6
		Stockage Batterie et propulsion électrique	MU5MEE12	18	18			36	40-60	6
		Total Tronc commun 6+ 6* ECTS - Total thématique 24 ECTS - Total CMI 5 - S9 EE = 30 ECTS + 6*								
Intitulé Unité d'Enseignement – Cycle Master – Niveau 5° A – S10		Code	CM	TD	TP	AMS	Heures Présence	Travail I Perso	ECTS	
CMI5 S10		Certification TOIC /TOEFL	MU4LVANT				30		30-40	3*
	Projet d'approfondissement	MU5EEG04				40		50-60	3*	
	Stage de fin d'études	MU5MES03					800	80-100	30	
Total CMI 5 - S10 30 ECTS + 6 *										

*Un

ités 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 CM5 - 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^{ère} 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. Pfafteicher, 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*

Mise à jour 01/03/2020

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 présentielles 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

Défis énergétiques du 21^e siècle

Niveau CMI 5 - Semestre S9 - Crédits 6 ECTS - Code MU5MEE01

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

Présentation pédagogique.

Le cours est divisé en deux parties. Une première partie fait un rappel des concepts de modélisation de la conversion d'énergie tant sur le plan de bilan énergétique qu'exergétique. Il s'agit d'étudier et analyser les systèmes énergétiques. L'accent sera mis sur de très nombreuses illustrations dans des secteurs applicatifs variés. Les études proposées insisteront sur les innovations et les nouveaux systèmes qui tendent vers une utilisation rationnelle de l'énergie.

En parallèle, un cycle de conférences sera proposé afin de compléter les connaissances dans le domaine de la conversion d'énergie mais aussi ceux des aspects connexes liés à l'économie de l'énergie, à l'évolution du climat, le développement durable, sur les évolutions des vecteurs énergétiques, à leurs stockages et leurs disponibilités.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Étude et analyse des systèmes énergétiques. Le but de cette partie est de présenter les principes de la conversion énergétique pour les ressources énergétiques conventionnelles et renouvelables et d'expliquer les paramètres les plus importants qui définissent l'efficacité de la conversion énergétique, les implications des ressources et l'économie des technologies de conversion énergétique. Après un rappel des principes de modélisation, de nombreux systèmes de conversion d'énergie seront analysés et une phase d'optimisation sera proposée.

Programme :

Vue d'ensemble des enjeux énergétiques

Principes thermodynamiques applicables aux systèmes de conversion d'énergie, révision des cycles thermodynamiques, pompes à chaleur et cycles de réfrigération, cogénération

Écriture du bilan de l'énergie et de l'exergie pour un volume de contrôle

Les vecteurs d'énergie renouvelable, leurs principes physiques et les équations essentielles: Solaire (photovoltaïque et thermo-collecteurs / concentrateurs), géothermique, biomasse (a.o. gazéification, biogaz, biocarburants liquides), hydraulique, éolienne

Applications :

Exergie d'un générateur de vapeur, Cycle Centrale turbine à gaz combinée, Éolienne Bilan énergétique et exergétique, Géothermie et chauffage urbain, Véhicule à air comprimé, Terminal méthanier, Liquéfaction d'un gaz, Réservoir solaire, Moteur à combustion interne, Piles à combustible et l'hydrogène comme vecteur d'énergie, Énergies thermiques des mers, Systèmes thermiques solaires, Moteurs à apport de chaleur externe : Production combinée de chaleur et d'électricité, Cogénération et trigénération (cogénération froide ou chaude)

Cycle de conférence

L'idée propagée lors de ces conférences est d'exploiter les énergies dans une vision « durable ». Des ruptures sont nécessaires, des changements de comportement aussi, afin de permettre une plus grande maîtrise de la consommation énergétique mondiale au regard de son type de production. Une présentation des défis auxquels nous sommes confrontés (climat, développement, ressources), des scénarios pour l'avenir énergétique de la planète sont proposés et analysés. Les contraintes fortes que sont la menace du réchauffement climatique et l'accès aux ressources énergétiques conduisent à envisager un scénario de transition vers une société consommant moins d'énergies fossiles (charbon et hydrocarbures). Dans cette hypothèse, il s'agit d'examiner les ruptures énergétiques possibles : secteurs majeurs où faire des efforts ? Aller vers des ruptures scientifiques et techniques (dans les domaines des énergies renouvelables, du stockage de l'électricité, du nucléaire, etc.) et comment accélérer le processus.

La liste des conférences suivantes n'est pas exhaustive mais donne une palette thématique de ce qui est habituellement présenté.

- Changement climatique, hier, aujourd'hui, demain. Analyse climatologique régionale, régime de temps et variabilités (éolien, solaire). Combustion industrielle. Combustion dans les turbines à gaz terrestres, maîtrise des émissions et combustibles alternatifs Valorisation. Biocarburants : filières et impacts. La filière Hydrogène – applications, considérations environnementales et économiques, perspectives. Carburants alternatifs aéronautiques. Valorisation énergétique des déchets. Les défis du transport aérien. Propulsion terrestre et biocarburants.

- Optimisation des systèmes de climatisation. Énergétique et Eco conception des bâtiments. La production pétrolière en mer profonde. Couplage et stockage de l'énergie électrique. Solaire concentré, émergence d'une filière à haut potentiel. Solaire, conception d'un bâtiment basse consommation, comment améliorer les performances énergétiques dès la conception. Gestion en réseau de l'énergie et smartgrid.

Pré-requis.

Connaissance des systèmes énergétiques et des fondements de la thermodynamique niveau master.

Références bibliographiques.

- Moran M. J. and Shapiro, H. N., Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 3rd edition, John Wiley & Sons, 1998.
- Kotas, T. J., The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Reprint Edition, Krieger, Malabar, FL, 1995.
- Wood, B. D., Applications of Thermodynamics, Waveland Press Inc., Prospect Heights, Illinois, 1982.
- L. Borel, Thermodynamique Et Énergétique, presses polytechniques et universitaires Romande

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.

Planches des conférenciers.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

Culture générale, conférences très variées sur l'énergie, le climat, le stockage, les transports.

Présentation des défis auxquels nous sommes confrontés (climat, développement, ressources)

Quantifier l'efficacité et les principales sources d'émission des processus de conversion d'énergie

Expliquer l'efficacité et les principales sources d'émission des processus de conversion d'énergie

Modèle de systèmes de conversion d'énergie et de procédés industriels

Elaborer des scénarios de conversion énergétique élaborés

Décrire les principes et les limites des principales technologies de conversion d'énergie

Comparer les systèmes de conversion d'énergie

Compétences développées dans l'unité.

- Ecrire des bilans énergétiques et exergétiques de systèmes quelconques
- Concept d'optimisation
- Écrire un rapport scientifique ou technique.
- Accéder et évaluer les sources d'information appropriées.
- Identifier les différents rôles qui sont impliqués dans les équipes qui fonctionnent bien et assumer différents rôles, y compris les rôles de leadership.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 58 h réparties en 20 h de conférences, 8h de cours, 30h de TD.

Travail personnel attendu : 60-80 h

Évaluation.

Évaluation sur la base d'un rapport donnant une vue scientifique précise d'un des thèmes traités lors des conférences et d'un examen écrit de trois heures

Répartition pondération du contrôle des connaissances : Écrit 80% - C.C 20 %

Responsables. M. P. Guibert, M A. Matynia

Thématique
Outils et méthodes pour les bâtiments zéro
énergie
(OMEBA)

Modélisation des écoulements turbulents

Niveau CMI 5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU5MEE05

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

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, ainsi qu'une initiation à la modélisation des écoulements turbulents en vue de la prévision de leur dynamique par la simulation numérique. Enfin, une initiation à l'utilisation des grands codes de calcul pour la recherche et l'ingénierie sera dispensée.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Objets et méthodes de la CFD. Mécanismes advection/diffusion dans Navier-Stokes. Maillages structurés et non structurés.
- Interpolation (1D) et approximation (2D, 3D) polynômiale. Erreur et ordre de précision. Volumes-finis, discrétisation spatiale d'ordre élevé, problème de reconstruction. Remarques sur la généralisation DG et h-p.
- Reconstruction LSQ en maillage non structuré (méthode générale et exemples concrets).
- Flux aux interfaces des cellules (problème de Riemann et exemples : incompressible, compressible).
- Équation advection-diffusion (solution analytique, approximation numérique et erreur spectrale). Précision spectrale et intégration temporelle (explicite, implicite, stabilité). Analyse de stabilité linéaire de schémas numériques connus : effet de l'ordre spatial.
- Solution du système discret : DNS explicite, RANS/PANS implicite (préconditionné Krylov solvers). Résolution de gros systèmes non linéaires : un problème ouvert. Description écoulements turbulents. Échelles caractéristiques de la turbulence.
- Équations de Navier-Stokes compressibles instantanées. Moyenne d'ensemble. Décompositions de Reynolds et de Favre. Écoulements turbulents compressibles. Équations de Naviers-stokes moyennées.
- Équations de transport aux tensions de Reynolds en écoulements incompressible et compressible.
- Modélisation statistique de la turbulence. Classification et description des différentes approches. Équation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente.
- Modélisation à 2 équations de transport du type k-ε en écoulement compressible. Écoulement turbulent dans un canal plan. Modélisation aux tensions de Reynolds. Effets bas-Reynolds et de paroi. Modèle de turbulence k-ε dans un canal plan.
- Modélisation de la corrélation triple de vitesse. Application au canal plan établi. Tenseur d'anisotropie du tenseur de Reynolds. Notion de réalisabilité. Position du problème physique (crise de trainée transsonique d'aile d'avion) et utilisation du logiciel (aerodynamics).
- Maillage, conditions aux limites, choix de modèle de turbulence, calculs. Comparaison avec les mesures, analyse physique des résultats, analyse critique du modèle (NASA turbmodels website).

Pré-requis. Mécanique des fluides. Équations de Navier Stokes. Écoulements incompressibles et compressibles. Formes conservative et non conservative. Notations indicielles.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Analyse d'un écoulement turbulent compressible.
- Détermination de schémas numériques avancés.
- Compréhension modèles de turbulence compressibles.

Compétences développées dans l'unité.

- Exploiter une base de données.
- Analyser des résultats obtenus avec les modèles de turbulence.
- Utiliser un logiciel de simulation numérique avancé.
- Analyser, critiquer des résultats et rédiger d'un rapport scientifique.
- Travailler en équipe.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 56 h réparties en 22 h de C, 22 h de TD et 12 h de projet.

Travail personnel attendu : 80-90 h.

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen de 3 heures (60 %) et d'un oral de projet (40 %).

Responsables. Mme I. Vallet, M. G. Gerolymos et M. B. François

Aspects physiques, numériques et réglementaires de la modélisation des bâtiments

Niveau CMI 5 - Semestre S9 - Crédits 6 ECTS - Code MU5MEE07

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

Présentation pédagogique.

Ce cours a pour objectif de donner aux étudiants une vision d'ensemble du domaine de la modélisation/simulation thermique des bâtiments. Après une introduction au contexte de la filière, une première partie du cours se concentre sur les aspects bioclimatiques du bâti et le choix des systèmes, dans un cadre de simulation réglementaire.

La seconde partie aborde les aspects physiques et numériques de la modélisation de l'enveloppe et des systèmes.

Via des projets numériques, le cours se concentre sur l'application de la simulation dynamique détaillée à la conception, à l'évaluation de stratégies de contrôle dans les bâtiments, de systèmes de production d'énergie intégré.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Partie modélisation. Éléments du système bâtiment : parois, zones d'air, occupants, sollicitations extérieures, comportement, régulation. Démarche de modélisation : phénomènes internes, interactions thermiques et massiques, discrétisation spatiale, forme du système d'équations, discrétisation temporelle, simulation. Conduction dans les parois. Transport d'enthalpie entre zones et dans les boucles fluides.

Matériaux à changement de phase. Capteur solaire, échanges internes par convection et rayonnement. Échanges et sollicitations externes. Comportement des occupants.

Partie réglementation thermique. Paysage réglementaire autour de la performance énergétique des bâtiments : directive européenne EPBD, Grenelle de l'Environnement, Réglementations thermiques, DPE, labels de certification.

Présentation de la réglementation thermique pour les bâtiments neufs (RT 2012 RT 2020) : les grands principes, les exigences, les phénomènes pris en compte, les aspects conventionnels, les règles Th-Bât, la méthode de calcul (Th-BCE 2012).

TP : Modélisation d'un studio, exemple comprenant toutes les notions et entités vues dans le cours.

TP : Modél. d'un capteur solaire, simulation de stratégies de régulation, mise en évidence d'un modèle simple.

TP : Modél. d'un studio avec chauffage solaire comprenant un stock utilisant des matériaux à changement de phase.

TP : calculs réglementaires.

Pré-requis. Transferts thermiques.

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.

- Démarche de modélisation thermique dynamique.
- Enjeux énergétiques dans le secteur du bâtiment
- Réglementation thermique des bâtiments
- Notions sur le confort thermique
- Méthodologie d'analyse physique des phénomènes
- Démarche de modélisation thermique dynamique
- Notions de méthodes numériques
- Logiciels d'application

Compétences développées dans l'unité.

- Réglementation thermique des bâtiments.
- Méthodologie d'analyse physique des phénomènes.
- Rédaction de rapports de synthèse. Travail en équipe.
- Analyse critique de résultats. Prise d'initiative et sens pratique.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 47 h réparties en 31 h de CM, 16 h de TP.

Travail personnel attendu : 50 – 70 h .

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base des compte rendus de TP (50 %) et d'une présentation orale (50 %).

Responsables. P. Joubert ; A. Novel NOVEL; A. Sergent ; S. Riou

Confort thermique à haute efficacité énergétique

Niveau CMI 5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU5MEE08

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

Présentation pédagogique.

Après un rappel des principes de la thermodynamique et une introduction aux méthodes d'analyse systémiques et d'intégration énergétique (en particulier la méthode du pincement), le cours s'attache à présenter les principales technologies utilisées pour le confort thermique dans les bâtiments. Les cycles à compression de vapeur pour la production de chaud et de froid sont présentés et modélisés. L'analyse exergetique sera appliquée à l'étude des sources d'irréversibilités de ces systèmes et surtout les étudiants sont formés à utiliser cette technique pour choisir les fluides de travail et l'architecture thermodynamique des cycles (glissement de température, cycles transcritiques, cycles multi-étagés). Le cours aborde également la problématique des fluides frigorigènes et l'encadrement de leur usage par la législation. L'air humide, est une composante essentielle du confort ; climatiser consiste à modifier l'équilibre d'air humide à l'intérieur. Les diverses transformations possibles sont utilisées par les systèmes à roue dessiccante pour souffler de l'air aux conditions voulues. L'analyse thermo- dynamique du cycle permet d'évaluer sa consommation énergétique. L'apport de chaleur par capteurs solaires est possible. La sorption, principe actif des roues dessiccantes, peut aussi être utilisée en cycle fermé, pour lequel la technologie la plus développée est la sorption liquide. Une fois ces machines décrites, leur analyse thermodynamique permet d'évaluer leurs performances et d'envisager des cycles à haute performance.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Plusieurs séances de travaux pratiques sont organisées sur des dispositifs tels que :

- Pompe à chaleur réversible avec vitesse variable sur compresseur, ventilateurs et pompes
- Plateforme expérimentale de stockage de froid
- Maquette aéraulique d'étude du refroidissement adiabatique d'air par évaporation d'eau

Une seconde partie du cours s'attache à la modélisation d'un bâtiment et ses scenarii d'utilisation, aux calculs des besoins thermiques d'un bâtiment, interprétation des résultats et la recherche. Systèmes frigorifiques et Pompes à chaleur, Efficacité des cycles. Introduction de la notion d'exergie, analyse énergétique. Air humide - humidification - climatisation par évaporation directe et par évaporation indirecte - calcul des performances, adsorption d'eau - déshumidification par roue dessiccante - climatisation par cycle de Pennington.

- Les phénomènes physiques et les modèles mathématiques en thermique du bâtiment. TD sur la présentation d'Alcyone et la saisie d'un bâtiment multizones. TD sur la présentation de Pléiades, le calcul des besoins thermiques d'un bâtiment, l'interprétation des résultats et la recherche d'alternatives permettant de réduire les besoins énergétiques.
- L'ACV dans le bâtiment : les normes, les méthodes, les étapes. TD sur la présentation de NovaEquer, la saisie du bâtiment étudié sur Pléiades, la simulation et l'interprétation des résultats.
- Stockage d'énergie pour la production de froid. TP Groupe de production de froid, stockage de froid, Refroidissement adiabatique.

Pré-requis. Thermodynamique avancée. Notions de base échangeurs de chaleur (bilans, efficacité). Thermique.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Thermodynamique de la réfrigération / climatisation.
- Traitement de l'air humide
- Centrale de traitement d'air
- Cycle frigorifique par compression de vapeur ou absorption

Compétences développées dans l'unité.

- Réaliser une analyse systémique d'un ensemble de besoins énergétiques.
- Mettre en évidence le besoin de stockage d'énergie dans le bâtiment.
- Comprendre et analyser une centrale de traitement d'air.
- Analyser un cycle frigorifique par compression de vapeur ou absorption.
- Savoir calculer les évolutions de l'air humide dans une centrale de traitement d'air.
- Savoir lire le diagramme de l'air humide.
- Savoir utiliser des logiciels scientifiques avancés.
- Savoir manipuler des expériences complexes (capteurs, conditionneurs, acquisition de données, plan d'expérience).

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 66 h réparties en 32 h de C, 10 h de TD et 24 h de TP. Travail personnel attendu : 50 – 70 h

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen de 2 h (40 %) des CR de TP (20 %) et de CC (40 %).

Responsables. M. D. Leducq, M. Pons, M. Cohen et F. Trinquet.

Transferts radiatifs et convectifs : modélisation et simulation

Niveau CMI5 - **Semestre** S3 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU5MEE04

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

Présentation pédagogique.

Le but de l'UE est de proposer aux étudiants les outils théoriques indispensables à la modélisation des transferts thermiques. Les différents modes de transferts thermiques sont exposés et l'accent est mis sur les applications aux systèmes complexes. L'étudiant est ainsi amené à procéder de lui-même à une analyse progressive de tels systèmes, ce afin de modéliser, de façon rigoureuse et judicieuse, les différents transferts thermiques mis en jeu. Une mise en pratique des enseignements sera effectuée tout au long du module sous forme de projets sur machines de calcul.

Mots-clés : Transfert Convectifs. Intensification des transferts. Transferts radiatifs. Rayonnement des corps opaques. Rayonnement des gaz, rayonnement des produits de combustion. Equation du Transfert Radiatif. Sensibilité aux propriétés radiatives des milieux semi-transparents.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Contexte économique et sociétal ; rappels de convection forcée :

- Convection naturelle. Ventilation naturelle, Effet du confinement. Panaches laminaires et turbulents
- TP : modélisation de la convection naturelle en cavité.
- TP : modélisation du couplage convection et rayonnement.
- TP : modélisation d'une cheminée.
- Projet numérique : application à un cas industriel ou bâtiment.

Rappels sur les transferts radiatifs entre corps opaques :

- Physique des milieux semi-transparents. Équation du Transfert Radiatif.
- Méthode de résolution numérique de l'Équation du Transfert Radiatif (ordonnées discrètes).
- Niveaux de modélisation des transferts radiatifs au sein des codes CFD.
- TP : Evaluation des propriétés radiatives au sein d'un milieu semi- transparent (flamme).
- TP : Résolution de l'Équation du Transfert Radiatif au sein d'un milieu semi-transparent (flamme).

Pré-requis. Mécanique des fluides Transferts thermiques : bases.

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié du cours en pdf et planches présentées en amphithéâtre. Sujets de TD, corrigés, annales des examens avec corrigés et commentaires, documents complémentaires.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Modélisation des transferts convectifs et radiatifs.
- Simulation numérique du couplage mécanique des fluides et thermique.
- Simulation numérique des transferts radiatifs au sein des milieux semi- transparents

Compétences développées dans l'unité.

- Utiliser un logiciel CFD, matlab.
- Résoudre numériquement des équations de conservation.
- Rédiger un rapport.
- Travailler en équipe.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 58 h réparties en 35 h de CM, 17 h de TP et 6 h de projet.

Travail personnel attendu : 80-90 h

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen de 3 heures (65 %) de TP (15 %) et d'un oral de projet (20 %).

Responsables. Mme A. Sergent ; G. Legros

Thématique Aérodynamique et Impact Environnemental (AERIEN)

Modélisation des écoulements turbulents

Niveau CMI 5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU5MEE05

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

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, ainsi qu'une initiation à la modélisation des écoulements turbulents en vue de la prévision de leur dynamique par la simulation numérique. Enfin, une initiation à l'utilisation des grands codes de calcul pour la recherche et l'ingénierie sera dispensée.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Objets et méthodes de la CFD. Mécanismes advection/diffusion dans Navier-Stokes. Maillages structurés et non structurés.
- Interpolation (1D) et approximation (2D, 3D) polynômiale. Erreur et ordre de précision. Volumes-finis, discrétisation spatiale d'ordre élevé, problème de reconstruction. Remarques sur la généralisation DG et h-p.
- Reconstruction LSQ en maillage non structuré (méthode générale et exemples concrets).
- Flux aux interfaces des cellules (problème de Riemann et exemples : incompressible, compressible).
- Équation advection-diffusion (solution analytique, approximation numérique et erreur spectrale). Précision spectrale et intégration temporelle (explicite, implicite, stabilité). Analyse de stabilité linéaire de schémas numériques connus : effet de l'ordre spatial.
- Solution du système discret : DNS explicite, RANS/PANS implicite (préconditionné Krylov solvers). Résolution de gros systèmes non linéaires : un problème ouvert. Description écoulements turbulents. Échelles caractéristiques de la turbulence.
- Équations de Navier-Stokes compressibles instantanées. Moyenne d'ensemble. Décompositions de Reynolds et de Favre. Écoulements turbulents compressibles. Équations de Naviers-stokes moyennées.
- Équations de transport aux tensions de Reynolds en écoulements incompressible et compressible.
- Modélisation statistique de la turbulence. Classification et description des différentes approches. Équation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente.
- Modélisation à 2 équations de transport du type k-ε en écoulement compressible. Écoulement turbulent dans un canal plan. Modélisation aux tensions de Reynolds. Effets bas-Reynolds et de paroi. Modèle de turbulence k-ε dans un canal plan.
- Modélisation de la corrélation triple de vitesse. Application au canal plan établi. Tenseur d'anisotropie du tenseur de Reynolds. Notion de réalisabilité. Position du problème physique (crise de trainée transsonique d'aile d'avion) et utilisation du logiciel (aerodynamics).
- Maillage, conditions aux limites, choix de modèle de turbulence, calculs. Comparaison avec les mesures, analyse physique des résultats, analyse critique du modèle (NASA turbmodels website).

Pré-requis. Mécanique des fluides. Équations de Navier Stokes. Écoulements incompressibles et compressibles. Formes conservative et non conservative. Notations indicielles.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Analyse d'un écoulement turbulent compressible.
- Détermination de schémas numériques avancés.
- Compréhension modèles de turbulence compressibles.

Compétences développées dans l'unité.

- Exploiter une base de données.
- Analyser des résultats obtenus avec les modèles de turbulence.
- Utiliser un logiciel de simulation numérique avancé.
- Analyser, critiquer des résultats et rédiger d'un rapport scientifique.
- Travailler en équipe.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 56 h réparties en 22 h de C, 22 h de TD et 12 h de projet.

Travail personnel attendu : 80-90 h.

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen de 3 heures (60 %) et d'un oral de projet (40 %).

Responsables. Mme I. Vallet, M. G. Gerolymos et M. B. François

Simulation numérique pour l'ingénierie énergétique

Mise à jour 01/03/2020

Niveau CMI 5 - Semestre S9 - Crédits 6 ECTS - Code MU5MEE02

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

Présentation pédagogique.

L'objectif de ce cours est d'aborder la simulation numérique en énergétique d'un point de vue pratique, avec la majeure partie de l'enseignement dispensée sous forme de travaux pratiques. Les étapes les plus importantes de la mise en œuvre d'une simulation numérique seront ainsi abordées de manière concrète :

- Détermination du domaine de calcul. Maillage.
- Sélection des modèles physiques et des méthodes numériques.
- Suivi de la simulation. Visualisation, post-traitement et interprétation des résultats.

Au cours de ces séances, les logiciels CEDRE (développé par l'ONERA, utilisé dans le domaine de l'aéronautique et spatial par Safran, ASL, MBDA,...) et StarCCM+ (logiciel commercial développé par CD-Adapco, largement utilisé dans l'industrie) seront utilisés.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Atelier 1 : SIMULATION NUMÉRIQUE EN ÉNERGETIQUE AVEC CÈDRE

Mise en évidence des spécificités de la simulation numérique en énergétique (écoulements multi-fluides, multi-espèces, réactifs, lois de diffusion complexes, couplages,...). Grandes étapes de la réalisation d'une simulation numérique et présentation du code CEDRE (développé par l'ONERA, utilisé par Safran, ArianeGroup, MBDA et Airbus).

Panorama des approches de modélisation/simulation de la turbulence les plus répandues (RANS, LES, méthodes hybrides RANS/LES, DNS)

Notions fondamentales pour l'intégration temporelle (implicite/explicite, stabilité, précision,...)

Exemples de simulations numériques en énergétique (chambres de combustion aéronautiques, moteurs fusée, stato et superstatoréacteurs)"

Bases de la simulation numérique des écoulements non réactifs.

- Prise en main du mailleur GMSH (<http://gmsh.info>) et réalisation d'un maillage de marche descendante (configuration ""Backward Facing Step"", ou ""BFS""). Mise en données d'une simulation numérique non-réactive de la configuration BFS avec le code CEDRE : choix des modèles physiques (turbulence,...) méthodes numériques, pas de temps, grandeurs archivées...
- Lancement de la simulation en parallèle (4 cœurs). Vérification de la convergence du calcul : analyse de la décroissance des résidus (champs et grandeurs intégrales), équilibrage des débits, visualisation et interprétation du champ de pas de temps local.
- Post-traitement des résultats avec l'outil de visualisation Paraview (<https://www.paraview.org>) : tracé des champs de vitesse, énergie cinétique turbulente, lignes de courant.

Bases de la simulation numérique des écoulements réactifs

- Rappels sur la modélisation de la combustion turbulente : mécanismes réactionnels, modèles à chimie infiniment rapide, diagramme de Borghi. Calculs d'équilibre à pression et enthalpie fixées mettant en évidence l'influence de la richesse et de la composition du mélange de gaz frais. Choix d'un jeu d'espèce pour réaliser la simulation numérique de la configuration BFS réactive.
- Validation d'un mécanisme réactionnel réduit pour la combustion CH₄/air à l'aide de la simulation d'une flamme prémélangée 1D librement propagative (basée sur le calcul de la vitesse de consommation de la flamme). Mise en donnée de la simulation numérique réactive de la configuration BFS avec CEDRE : choix des modèles physiques (turbulence, combustion, lois de diffusion...) et méthodes numériques (discrétisation spatiale et intégration temporelle), pas de temps, grandeurs archivées...
- Étude de l'interaction combustion/turbulence : tracer les champs de Damköhler et de Karlovitz, donner une vision synthétique de la manière dont se déroule l'interaction combustion/turbulence dans la configuration étudiée à l'aide d'un diagramme de Borghi".
- Exemple 1 Conception d'un moteur-fusée par simulation numérique. Objectif : simuler un prototype de moteur-fusée pour évaluer sa poussée, son rendement de combustion, son coût de conception et les pistes d'amélioration du prototype.
- Exemple 2 Simulation numérique de l'atomisation d'oxygène liquide dans les moteurs fusées. Objectif : mettre en œuvre différentes approches numériques pour simuler l'oxygène liquide et son atomisation dans un prototype de moteur-fusée, avec éléments de phénoménologie relatifs au fonctionnement des moteurs-fusées à ergols liquides en conditions d'injection subcritique.

ATELIER 2 : Étude de TURBOMACHINES

- Prise en main de l'outil de simulation starCCM+.
- Approche par la réalisation d'un tutoriel « simulation numérique de l'écoulement et du transfert thermique sur une plaque plane ».
- Définition des conditions limites, Réalisation du maillage, Définition du modèle physique, Mise en place du post traitement, Etude de la convergence en maillage".
- Exemple 1 : Dimensionnement d'une turbine à gaz. Étude thermodynamique du système, Optimisation des paramètres, Définition du cahier des charges des composants, Dimensionnement des composants à l'aide de ANSYS Vista CCD et RTD".
- Exemple 2 « Simulation numérique du compresseur et/ou de la turbine à l'aide StarCCM+ », Analyse des résultats, des champs de pression, vitesse et température. Étude du couplage turbine/compresseur".

Pré-requis. Bases solides en mécanique des fluides. Notions d'énergétique. Bases des méthodes numériques pour la mécanique des fluides (méthodes « volumes finis », schémas décentrés/centrés, implicite/explicite, CFL.

Références bibliographiques.

- L. Landeau et E. Lifchitz, Physique théorique tome 6, Mécanique des fluides
- An Introduction to Fluid Dynamics' de G.K. Batchelor (Cambridge University Press)
- R. Borghi et M. Destriau, La combustion et les flammes, éditions Ophrys
- T. Poinso, D. Veynante, Theoretical and numerical combustion
- C. Hirsch, Numerical computation of internal and external flows, Elsevier
- F. Toro, Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics, Springer

Ressources mises à disposition des étudiants. Documents présentés en cours. Annales.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Concepts fondamentaux pour la réalisation de la simulation numérique d'un écoulement réactif.
- Phénoménologie et éléments de modélisation de la combustion turbulente.
- Schémas numériques d'intégration temporelle (implicite/explicite, stabilité, précision).

Compétences développées dans l'unité.

- Utiliser les commandes UNIX de base. Réaliser un maillage à l'aide de GMSH (<http://gmsh.info>)
- Utiliser le code ONERA CEDRE pour la réalisation de simulations numériques en énergétique
- Visualiser une solution et réaliser des post-traitements avec Paraview (<https://www.paraview.org>)
- Apprendre à coder un solveur élémentaire pour la résolution d'EDP en Mécanique.
- Utiliser le code STAR CCM+
- Savoir rédiger un rapport technique
- Apprendre à travailler en équipe
- Accéder et évaluer les sources d'information appropriées.
- Identifier les différents rôles qui sont impliqués dans les équipes qui fonctionnent bien et assumer différents rôles, y compris les rôles de leadership.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiels totales : 8 h de cours, 48h de TP. 60-80 h de travail personnel.

Évaluation.

L'évaluation se fait sur la base de rapport de TP (30 %) de projet et présentation orale (20 %) et d'un examen de 3 heures (50 %).

Responsables. M. L. Dorey, M. Deligant

Aéroacoustique et énergétique des moteurs aéronautiques

Niveau CMI 5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU5MEE09

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

Présentation pédagogique.

Ce cours a pour objectif de donner aux étudiants une vision précise des défis qui se situent autour de la conception des moteurs aéronautiques. Le cours se décompose en trois parties, en commençant par la présentation d'un turboréacteur d'un point de vue système, ce qui permet une analyse rapide et paramétrique de ses performances. On se focalisera ensuite sur les problématiques aérodynamiques et aéro-acoustiques des moteurs aéronautiques. Enfin, on s'intéressera à la chambre de combustion du moteur, avec à la fois des éléments de technologie et la présentation d'approches très récentes permettant la prévision de ses caractéristiques essentielles (stabilité, émissions polluantes, ré-allumage en vol, transferts thermiques).

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Fonctionnement d'un moteur aéronautique d'un point de vue système. Enjeux de la conception d'une chambre de combustion aéronautique. Éléments théoriques nécessaires à la compréhension et la résolution des problèmes d'aérothermochimie se déroulant dans les moteurs aéronautiques.

- Réalisation de simulations numériques RANS de chambre de combustion aéronautique.
- Contexte propulsion aéronautique (constructeurs, évolution du trafic aérien, impact environnemental). Généralités sur les moteurs aéronautiques, définitions de base : poussées (nette/brute), rendements (propulsif, thermique), SFC (Specific Fuel Consumption), équations de Froude. Cycle thermodynamique de Turbine à Gaz (TAG) théorique et réel (notions de travaux, puissances et efficacité).
- Température Entrée Turbine (TET) comme enjeu de conception (influence sur les rendements, technologies et matériaux utilisés pour la conception des aubes de turbine).
- Grandes familles de moteurs (turbojet, turbofan, turbopropulseur). Rappel d'aérodynamique compressible : définition de l'état « total » et utilisation dans les cycles thermodynamiques. Étude système d'un turboréacteur simple et double flux (fan, étage compresseur, chambre de combustion, étages turbines haute et basse pression, tuyère).
- Projet numérique (réalisation d'un programme en Python 3, associé à un rapport écrit avec LaTeX).
- Présentation des caractéristiques de moteurs réels (CFM56, GE90, M88), mise en perspective avec les résultats des études systèmes. Évaluation des marges de progression de performance pour les moteurs actuels, Présentation de nouveaux concepts de moteurs : Open Rotor, moteurs à détonation tournante, utilisation d'échangeurs.
- Notions de base pour l'étude de la combustion Jet-Fuel/air. Rappels de thermodynamique multi-espèces, calcul de la température adiabatique de fin de combustion (en régimes pauvre et stoechiométrique).
- Modélisation simple d'une chambre de combustion aéronautique : le Réacteur Parfaitement Mélangé.
- Éléments de conception d'une chambre de combustion aéronautique réelle (systèmes RQL, LPP, chambres à « deux têtes », injecteurs TAPS de dernière génération).
- Simulation numérique monophasique et diphasique d'une chambre de combustion aéronautique de type TAPS avec le code CEDRE.

Contexte de l'aéroacoustique lié à l'environnement (depuis le début de l'aviation civile jusqu'aux avions supersoniques).

- Pollution sonore dans le transport aérien. Les perspectives d'amélioration. Notions de traitement de signal, caractéristiques physiques d'un signal, Directivité et spectre du bruit large bande, transformation de Fourier, Densité spectrale, Analyse de spectre acoustique de turbomachines à bi-composantes raie et large bande. Généralités sur les sources de bruit dans les turbomachines. Modèles et corrélations de prédiction du bruit des turbomachines.
- Bases de l'analogie aéroacoustique, Théorie de Lighthill. Formalisme de Ffowcs Williams & Hawkings.
- FW&H appliquée aux turbomachines, Rayonnement au champ lointain. Intégration de l'équation de FW&H avec prise en compte de la source monopolaire et dipolaire. Cinématique et dynamique de l'écoulement dans le cas d'une turbomachine axiale subsonique. Étude du rayonnement acoustique associé. Théorie aérodynamique instationnaire linéarisée d'un profil. Modélisation du bruit large bande : Bruit d'interaction avec la turbulence amont, Bruit de bord de fuite.

Projets : Étude des performances aérodynamiques d'une turbomachine à haute vitesse de type centrifuge ($Ma=0.8$) ; Caractérisation aéroacoustique et étude spectrale du comportement acoustique d'une turbomachine à haute vitesse.

Pré-requis. Bases de la mécanique des fluides Mécanique des milieux continus.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Fonctionnement d'un moteur aéronautique d'un point de vue système
- Enjeux de la conception d'une chambre de combustion aéronautique
- Éléments théoriques nécessaires à la compréhension et la résolution des problèmes d'aérothermochimie se déroulant dans les moteurs aéronautiques
- Réalisation de simulations numériques RANS de chambre de combustion aéronautique
- Culture générale aéronautique
- Sources de bruit dans le transport aérien
- Mécanismes de génération de bruit dans les turbomachines subsoniques
- Modèle de génération du bruit aérodynamique dans les machines tournantes
- Méthode de réduction du bruit aérodynamique

Compétences développées dans l'unité.

- Utiliser le langage de programmation Python
- Utiliser LaTeX pour rédiger un rapport
- Utiliser le code ONERA de simulation numérique pour l'énergétique CEDRE
- Savoir rédiger un rapport technique
- Apprendre à travailler en équipe
- Modélisation du bruit généré par une turbomachine
- Travailler sur des articles de revues scientifiques
- Effectuer des mesures aérodynamiques sur banc normalisé
- Effectuer et analyser des mesures acoustiques
- Analyser un spectre acoustique afin de réduire le bruit de la source

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 56 h réparties en 36 h de CM, 16 h de TD et 4 h de TP.

Travail personnel attendu : 60 – 80 h

Évaluation.

L'évaluation se fait sur la base d'un examen de 2 h (60 %) des compte rendus de TP (20 %) et de TP (20 %).

Responsables. M. S. Kouidri

Transferts radiatifs et convectifs : modélisation et simulation

Niveau CMI 5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU5MEE04

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

Présentation pédagogique.

Le but de l'UE est de proposer aux étudiants les outils théoriques indispensables à la modélisation des transferts thermiques. Les différents modes de transferts thermiques sont exposés et l'accent est mis sur les applications aux systèmes complexes. L'étudiant est ainsi amené à procéder de lui-même à une analyse progressive de tels systèmes, ce afin de modéliser, de façon rigoureuse et judicieuse, les différents transferts thermiques mis en jeu. Une mise en pratique des enseignements sera effectuée tout au long du module sous forme de projets sur machines de calcul. Mots-clés : Transfert Convectifs. Intensification des transferts. Transferts radiatifs. Rayonnement des corps opaques. Rayonnement des gaz, rayonnement des produits de combustion. Equation du Transfert Radiatif. Sensibilité aux propriétés radiatives des milieux semi-transparents.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Contexte économique et sociétal ; rappels de convection forcée :

- Convection naturelle. Ventilation naturelle, Effet du confinement. Panaches laminaires et turbulents
- TP : modélisation de la convection naturelle en cavité.
- TP : modélisation du couplage convection et rayonnement.
- TP : modélisation d'une cheminée.
- Projet numérique : application à un cas industriel ou bâtiment.

Rappels sur les transferts radiatifs entre corps opaques :

- Physique des milieux semi-transparents. Équation du Transfert Radiatif.
- Méthode de résolution numérique de l'Équation du Transfert Radiatif (ordonnées discrètes).
- Niveaux de modélisation des transferts radiatifs au sein des codes CFD.
- TP : Evaluation des propriétés radiatives au sein d'un milieu semi-transparent (flamme).
- TP : Résolution de l'Équation du Transfert Radiatif au sein d'un milieu semi-transparent (flamme).

Pré-requis. Mécanique des fluides Transferts thermiques : bases.

Références bibliographiques.

Ressources mises à disposition des étudiants. Polycopié du cours en pdf et planches présentées en amphi. Sujets de TD, corrigés, annales des examens avec corrigés et commentaires, documents complémentaires.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Modélisation des transferts convectifs et radiatifs.
- Simulation numérique du couplage mécanique des fluides et thermique.
- Simulation numérique des transferts radiatifs au sein des milieux semi-transparents

Compétences développées dans l'unité.

- Utiliser un logiciel CFD, matlab.
- Résoudre numériquement des équations de conservation.
- Rédiger un rapport.
- Travailler en équipe.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 58 h réparties en 35 h de CM, 17 h de TP et 6 h de projet. 80-90 h de travail personnel.

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen de 3 heures (65 %) de TP (15 %) et d'un oral de projet (20 %).

Responsables. Mme A. Sergent ; G. Legros

Thématique
Combustion, limitation des émissions,
nouvelles énergies
(CLEANER)

Carburants pour la transition énergétique

Niveau CMI 5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU5MEE03

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

Présentation pédagogique.

Introduction aux carburants et combustibles : synthèse de carburant ; description des interactions carburants environnement. La veille technologique sur les carburants sera évoquée tout comme les carburants du futur, les nouvelles voies de synthèse. Les applications seront relatives à la dépollution liée aux carburants, à la synthèse de nouveaux carburants, de carburant solaire, et à l'analyse du cycle de vie de ces carburants.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Introduction aux carburants et combustibles : synthèse de carburant

- Interaction carburants environnement, cas de la propulsion aéronautique et terrestre.
- Veille technologique sur les carburants. Carburant du futur, nouvelles voies de synthèse. Carburant du futur, synthèses en rupture, cas du solaire concentré.

Applications

- Dépollution liée aux carburants.
- Synthèse de nouveaux carburants. Synthèse de carburants solaire. Analyse du cycle de Vie

Pré-requis. Thermodynamique et mécanique des fluides. Bases en physique et chimie. Énergétique. Combustion et polluants.

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.

- Comprendre la problématique de l'optimisation, carburant/mobilité.
- Efficacité énergétique, Transition énergétique.
- Énergie et carburants. Analyse de cycle de Vie.
- Limitation des émissions associées à la combustion.
- Instrumentation et mesure

Compétences développées dans l'unité.

- Savoir manipuler des expériences complexes (plan d'expérience...).
- Élaborer un cahier des charges. Piloter un projet.
- Savoir exploiter une base de données (manipulation de données, extraction de données pertinentes, fusion).
- Capacité de raisonner et de penser clairement. Sens de l'initiative.
- Travailler en interaction.
- Facilité à formuler des jugements de valeur et à prendre des décisions autonomes.
- Rédiger des rapports ou des documents techniques.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentielles totales : 58 h, 42 h de cours, 12 h de TP et 6 h de Projet.

Travail personnel attendu : 80-90 h

Évaluation. L'évaluation se fait sur la base d'un examen de 3 heures (30 %) de TP (30 %) et d'un oral de projet (30 %) et de CC (10 %).

Responsables. M. P. Da Costa, Mme M. E. Galvez, Mme A. Ben Amara, Mme S. Ognier

Modélisation aéro-thermochimique, applications aux propulsions terrestre et aéronautique

Niveau CMI 5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** –

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

Présentation pédagogique.

L'objectif du cours est de permettre dans le cadre d'une discipline communément appelée « Aérothermochimie », l'acquisition des bases théoriques liées à la modélisation et à la simulation des écoulements turbulents et réactifs.

Bien que suffisamment général pour être applicable à tout écoulement en combustion, cet enseignement réserve une place particulière aux propulsions aéronautiques et terrestres. La problématique spécifique d'optimisation énergétique de systèmes par le biais de modélisations de différents types inclue aussi la caractérisation des polluants chimiques qui en résultent, impactant négativement l'environnement.

Dans ce contexte, l'enseignement se focalise sur certains acquis liés au fonctionnement de deux types de machines thermiques, la première est une turbomachine propulsive de type aéronautique et la seconde le moteur à combustion interne pour les applications automobiles. De façon générale, on s'appuiera sur le rôle clé d'un de ces composants essentiels ; la chambre de combustion, de son fonctionnement optimal du point de vue de l'amélioration recherchée du cycle thermodynamique, pour atteindre les objectifs de réduction des émissions, gazeuses et particulaires, imposée par la réglementation en vigueur, notamment celle émanant de l'OACI à laquelle est soumise le secteur du transport aérien civil, et d'autre part les normes EURO6 pour le secteur automobile.

Les propriétés aérodynamiques seront traitées afin de bien comprendre les impacts engendrés sur les propriétés des flammes ou des régimes d'autoinflammation.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Partie 1 : Aérothermochimie et propulsion aéronautique

- Impact environnemental du secteur aérien : contexte général.
- Établissement des équations 3D de l'incompressible au multi-espèces réactif.
- Description statistique de la turbulence et des écoulements turbulents compressibles, multi espèce réactif.
- Combustion turbulente. Interaction combustion et turbulence.

Partie 2 : Approche par modélisation réduite dite multi zéro dimensionnelle sous forme de projet

- Modélisation 0D de la combustion dans une chambre de combustion de moteur.
- Impact environnemental du secteur automobile : contexte général.
- Modèle de transfert de masse, modèle de mélange de Curl.
- Modélisation de la phase de combustion, Sous modèle basé sur une loi phénoménologique, sur le développement de front de flamme.
- Modèle « Eddy Burn up », et ou de modèle de réacteur homogène.
- Modèle de turbulence à deux équations. Modèle k ϵ .
- Modèle d'échanges aux parois, rayonnement, convection, Modèles empiriques et semi-empiriques, Lois de paroi pour les transferts thermiques.
- Modèle de composition des gaz (dissociation). Modèle de formation des NOX.
- Étude paramétrique (plan d'expérience). Analyse et présentation des données.

Partie 3 : Travaux pratiques

- Essais sur banc moteur, analyse des performances et des émissions

Pré-requis. Équations de Navier-Stokes. Thermodynamique Générale. Chimie Générale. Calcul différentiel et intégral. Probabilités : Connaissances de base. Connaissance de Matlab.

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.

- Description approfondie de tout type de système propulsif.
- Équations de Navier-Stokes.

- Thermodynamique Générale. Chimie Générale et cinétique.
- Modélisation de la turbulence. Combustion turbulente : Modélisation des flammes types.

Compétences développées dans l'unité.

- Outils de programmation matlab. Écriture d'un code de calcul similaire à des codes publiés.
- Utiliser un logiciel de simulation numérique avancé.
- Mise en équation des modèles spécifiques aux processus de combustion.
- Analyser des résultats obtenus avec les modèles de turbulence.
- Analyser, critiquer des résultats et rédiger d'un rapport scientifique.
- Travailler en équipe.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiellees totales : 57 h réparties en 24 h de CM, 43 h de TP.
80-90 h de travail personnel.

Évaluation.

L'évaluation se fait sur la base des TP (30 %) et du projet (70 %).

Responsables. D. Gaffié, P. Guibert, J.F. Krawczynski, S. Pounkin

Aéroacoustique et énergétique des moteurs aéronautiques

Niveau CMI 5 - **Semestre** S9- **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU5MEE09

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

Présentation pédagogique.

Ce cours a pour objectif de donner aux étudiants une vision précise des défis qui se situent autour de la conception des moteurs aéronautiques. Le cours se décompose en trois parties, en commençant par la présentation d'un turboréacteur d'un point de vue système, ce qui permet une analyse rapide et paramétrique de ses performances. On se focalisera ensuite sur les problématiques aérodynamiques et aéro-acoustiques des moteurs aéronautiques. Enfin, on s'intéressera à la chambre de combustion du moteur, avec à la fois des éléments de technologie et la présentation d'approches très récentes permettant la prévision de ses caractéristiques essentielles (stabilité, émissions polluantes, ré-allumage en vol, transferts thermiques).

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

Fonctionnement d'un moteur aéronautique d'un point de vue système. Enjeux de la conception d'une chambre de combustion aéronautique. Éléments théoriques nécessaires à la compréhension et la résolution des problèmes d'aérothermochimie se déroulant dans les moteurs aéronautiques.

- Réalisation de simulations numériques RANS de chambre de combustion aéronautique.
- Contexte propulsion aéronautique (constructeurs, évolution du trafic aérien, impact environnemental). Généralités sur les moteurs aéronautiques, définitions de base : poussées (nette/brute), rendements (propulsif, thermique), SFC (Specific Fuel Consumption), équations de Froude. Cycle thermodynamique de Turbine à Gaz (TAG) théorique et réel (notions de travaux, puissances et efficacité).
- Température Entrée Turbine (TET) comme enjeu de conception (influence sur les rendements, technologies et matériaux utilisés pour la conception des aubes de turbine).
- Grandes familles de moteurs (turbojet, turbofan, turbopropulseur). Rappel d'aérodynamique compressible : définition de l'état « total » et utilisation dans les cycles thermodynamiques. Étude système d'un turboréacteur simple et double flux (fan, étage compresseur, chambre de combustion, étages turbines haute et basse pression, tuyère).
- Projet numérique (réalisation d'un programme en Python 3, associé à un rapport écrit avec LaTeX).
- Présentation des caractéristiques de moteurs réels (CFM56, GE90, M88), mise en perspective avec les résultats des études systèmes. Évaluation des marges de progression de performance pour les moteurs actuels, Présentation de nouveaux concepts de moteurs : Open Rotor, moteurs à détonation tournante, utilisation d'échangeurs.
- Notions de base pour l'étude de la combustion Jet-Fuel/air. Rappels de thermodynamique multi-espèces, calcul de la température adiabatique de fin de combustion (en régimes pauvre et stoechiométrique).
- Modélisation simple d'une chambre de combustion aéronautique : le Réacteur Parfaitement Mélangé.
- Éléments de conception d'une chambre de combustion aéronautique réelle (systèmes RQL, LPP, chambres à « deux têtes », injecteurs TAPS de dernière génération).
- Simulation numérique monophasique et diphasique d'une chambre de combustion aéronautique de type TAPS avec le code CEDRE.

Contexte de l'aéroacoustique lié à l'environnement (depuis le début de l'aviation civile jusqu'aux avions supersoniques).

- Pollution sonore dans le transport aérien. Les perspectives d'amélioration. Notions de traitement de signal, caractéristiques physiques d'un signal, Directivité et spectre du bruit large bande, transformation de Fourier, Densité spectrale, Analyse de spectre acoustique de turbomachines à bi-composantes raie et large bande. Généralités sur les sources de bruit dans les turbomachines. Modèles et corrélations de prédiction du bruit des turbomachines.
- Bases de l'analogie aéroacoustique, Théorie de Lighthill. Formalisme de Ffowcs Williams & Hawkings.
- FW&H appliquée aux turbomachines, Rayonnement au champ lointain. Intégration de l'équation de FW&H avec prise en compte de la source monopolaire et dipolaire. Cinématique et dynamique de l'écoulement dans le cas d'une turbomachine axiale subsonique. Étude du rayonnement acoustique associé. Théorie aérodynamique instationnaire linéarisée d'un profil. Modélisation du bruit large bande : Bruit d'interaction avec la turbulence amont, Bruit de bord de fuite.

Projets : Étude des performances aérodynamiques d'une turbomachine à haute vitesse de type centrifuge ($Ma=0.8$) ; Caractérisation aéroacoustique et étude spectrale du comportement acoustique d'une turbomachine à haute vitesse.

Pré-requis. Bases de la mécanique des fluides Mécanique des milieux continus.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Fonctionnement d'un moteur aéronautique d'un point de vue système
- Enjeux de la conception d'une chambre de combustion aéronautique
- Éléments théoriques nécessaires à la compréhension et la résolution des problèmes d'aérothermochimie se déroulant dans les moteurs aéronautiques
- Réalisation de simulations numériques RANS de chambre de combustion aéronautique
- Culture générale aéronautique
- Sources de bruit dans le transport aérien
- Mécanismes de génération de bruit dans les turbomachines subsoniques
- Modèle de génération du bruit aérodynamique dans les machines tournantes
- Méthode de réduction du bruit aérodynamique

Compétences développées dans l'unité.

- Utiliser le langage de programmation Python
- Utiliser LaTeX pour rédiger un rapport
- Utiliser le code ONERA de simulation numérique pour l'énergétique CEDRE
- Savoir rédiger un rapport technique
- Apprendre à travailler en équipe
- Modélisation du bruit généré par une turbomachine
- Travailler sur des articles de revues scientifiques
- Effectuer des mesures aérodynamiques sur banc normalisé
- Effectuer et analyser des mesures acoustiques
- Analyser un spectre acoustique afin de réduire le bruit de la source

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiellees totales : 56 h réparties en 36 h de CM, 16 h de TD et 4 h de TP.

Travail personnel attendu : 60-80 h.

Évaluation.

L'évaluation se fait sur la base d'un examen de 2 h (60 %) des compte rendus de TP (20 %) et de TP (20 %).

Responsables. M. S. Koudri et N. Bertier

Stockage de l'énergie électrique dans l'automobile et ses enjeux

Niveau CMI 5 - **Semestre** S9 - **Crédits** 6 ECTS - **Code** MU5MEE12

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

Présentation pédagogique.

Ce cours est un cours à fort contenu culturel. L'enseignant présentera le cahier des charges retenu dans l'industrie automobile principales en ce qui concerne le stockage de l'énergie. Les différentes technologies seront passées en revue en insistant sur les développements actuels.

Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Contexte énergétique global et problématique du stockage de l'énergie.
- Mobilité électrique : cahier des charges versus technologies de batteries actuelles.
- Nouvelles technologies de batteries pour le transport.
- Études de cas.
- Li-ion : mécanismes réactionnels à l'œuvre et leurs caractérisations.
- Études de cas.
- Vieillessement des batteries Li-ion : phénoménologie et premiers modèles comportementaux.
- Comportement électrothermique des batteries Li-ion : effet Joule versus effet entropique.
- Études de cas.
- Vieillessement des batteries Li-ion : modèles de vieillessement prédictifs.

Pré-requis. Cours de thermodynamique.

Ressources mises à disposition des étudiants. Les documents principaux seront donnés en cours.

Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Ce cours est de type applicatif. Les connaissances scientifiques ont été acquises en amont.

Compétences développées dans l'unité.

- Savoir choisir un type de batterie selon l'application visée, le contexte ...
- Analyser le vieillessement des batteries et le cycle de vie.

Volumes horaires présentiel et hors présentiel.

Heures présentiellees totales : 36 h réparties en 18 h de CM, 18 h de TD.

Travail personnel attendu : 40 – 60 h

Évaluation. Évaluation sur la base d'un examen écrit de trois heures.

Responsables. M. S. Franger

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).