



CentraleSupélec

OPTION ENERGIE

<http://www.option-energie.ecp.fr>

PARCOURS ENERGIE THERMIQUE : PROGRAMME PEDAGOGIQUE ET FICHES DE COURS

Le programme pédagogique du Parcours Energie Thermique (ET) est détaillé dans le tableau ci-dessous.

Les élèves-ingénieurs ECP rattachés à ce parcours peuvent, s'ils le souhaitent, être dispensés du cours « transferts thermiques appliqués ». Les conditions de dispense de ce cours sont précisées dans son descriptif (voir plus bas). Si ces conditions sont réunies, la dispense est automatiquement accordée ; en revanche, **tout élève-ingénieur ECP obtenant cette dispense doit obligatoirement suivre et valider un cours électif supplémentaire.**

Par ailleurs, le programme pédagogique du Parcours ET propose plusieurs choix : 4 cours parmi 6, et 1 projet numérique parmi 2. Mais certaines de ces activités au choix font partie du programme pédagogique du M2 « Sciences Thermiques » rattaché à la Mention « Energie » de l'Université Paris-Saclay¹ et associé au Parcours ET ; **le suivi de ces activités est donc obligatoire pour la validation du M2 en parallèle du parcours.**

PROGRAMME PEDAGOGIQUE DU PARCOURS ENERGIE THERMIQUE

(cliquer sur le nom de l'activité pour atteindre son descriptif)

Obligatoire	Combustion
Obligatoire	Mécanique des fluides appliquée
Obligatoire	Méthodes numériques
Obligatoire	Methodologie en transferts thermiques
Obligatoire	Outils informatiques de l'ingénieur
Dispense possible	Transferts thermiques appliqués
4 cours à choisir dans cette liste	Cycles moteurs et cryogénie
	Ecoulements diphasiques
	Milieux hors équilibre - Plasmas
	Rayonnement des gaz et des milieux denses
	Transferts turbulents
	Turbomachines

¹ Site web : <http://www.universite-paris-saclay.fr/fr/formation/master/m2-sciences-thermiques>

1 projet à choisir	Projet numérique « fluide »
	Projet numérique « thermique »
Obligatoire	Activité expérimentale : diagnostics et métrologie dans les écoulements

COMBUSTION

Coordonnateur(s) : Benoît Fiorina (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Benoît Fiorina (CentraleSupélec)

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 2.0

Descriptif :

- Etats initial et final, température adiabatique de fin de combustion.
- Combustion parfaite, équilibre chimique.
- Cinétique chimique, vitesse de réaction, réacteur parfaitement mélangé.
- Equations fondamentales pour les écoulements réactifs, propriétés de transport.
- Inflammation spontanée, théorie thermique de l'explosion (Semenov).
- Combustion en prémélange gazeux, onde de combustion, détonation, déflagration, vitesse de flamme laminaire.
- Flamme de diffusion laminaire, scalaire passif.
- Combustion diphasique, pulvérisation, combustion d'une goutte isolée, d'un brouillard.
- Combustion turbulente, moyennes de Reynolds et de Favre, diagramme de combustion, réacteur homogène, modèles de combustion turbulente.
- Formation des polluants, suies.

[Retour à la liste](#)

MECANIQUE DES FLUIDES APPLIQUEE

Coordonnateur(s) : Thierry Schuller (CentraleSupélec)

Intervenant(s) :

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 2.0

Descriptif :

[Retour à la liste](#)

METHODES NUMERIQUES

Coordonnateur(s) : Anouar Soufiani (CNRS)

Intervenant(s) : Anouar Soufiani (CNRS)

Durée : 18h hors contrôle

ECTS : 2.0

Descriptif :

Introduction au calcul scientifique ; équations de la mécanique des fluides avec transferts de chaleur ; classification des équations ; discrétisations en temps, problèmes de stabilité et de convergence.

Différences et volumes finis : outils d'analyse de stabilité linéaire ; stabilité des schémas de discrétisation des termes de convection ; problèmes paraboliques à plusieurs dimensions (stabilité des méthodes explicites, méthodes ADI) ; problèmes elliptiques à plusieurs dimensions (méthodes itératives, méthodes ADI) ; notions sur les problèmes hyperboliques. Traitement des non-linéarités (méthodes itératives, méthode de Newton, méthode de Briley-McDonald).

Traitement de la pression : fonction de courant et vorticité, méthodes itératives en variables primitives.

Domaines d'application : tous les domaines où existent des problèmes liés au transferts thermiques.

[Retour à la liste](#)

METHODOLOGIE EN TRANSFERTS THERMIQUES

Coordonnateur(s) : Laurent Soucasse (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : enseignants-chercheurs et industriels (un encadrant pour chaque groupe d'élèves)

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 2.0

Descriptif :

L'activité repose sur une équipe pédagogique regroupant des enseignants-chercheurs et des industriels. Le travail s'effectue en petits groupes de 4 à 5 élèves sur différentes études de cas au cours desquelles il s'agit de résoudre un problème de thermique dans des configurations d'intérêt pratique sur la base des connaissances acquises et avec l'aide des encadrants.

[Retour à la liste](#)

OUTILS INFORMATIQUES DE L'INGENIEUR

Coordonnateur(s) : Aymeric Vié (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Aymeric Vié (CentraleSupélec) + autres intervenants ?

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 2.0

Descriptif :

Initiation au système d'exploitation LINUX, au langage scientifique Fortran et à la plateforme MATLAB.

Notions abordées :

- Introduction à UNIX, LINUX
- Introduction au langage Fortran 90
- Aspects relatifs au calcul numérique (bibliothèques scientifiques, optimisation de la rapidité du code, ...)
- Introduction à la plateforme MATLAB

Le cours s'appuie sur de nombreux exemples et exercices. Le polycopié couvre également Fortran 77 pour la compatibilité des codes existants.

[Retour à la liste](#)

TRANSFERTS THERMIQUES APPLIQUES

Coordonnateur(s) : Jean Taine (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Jean Taine (CentraleSupélec)

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 2.0

Conditions de dispense : avoir suivi et validé avec une note de 13/20 ou plus le cours de S7 « transferts thermiques avancés » (EN1110 - Benoît Goyeau), et demander la dispense.

Descriptif :

Ce cours propose de modéliser les transferts de quantité de mouvement et d'énergie. Il approfondira et complètera les connaissances déjà acquises par les élèves-ingénieurs dans ces domaines. Les notions abordées seront les suivantes :

- Rappels sur les concepts de base de transferts thermiques.
- Théorèmes de transport. Equations de bilan de masse globale, de quantité de mouvement, et d'énergie. Cas de la convection forcée, de la convection naturelle et de la convection mixte.
- Couches limites mécanique et thermique (approximations des couches limites, calculs de couches limites par la méthode intégrale).
- Méthode générale de calcul des transferts radiatifs entre corps opaques à travers un milieu transparent.

[Retour à la liste](#)

CYCLES MOTEURS ET CRYOGENIE

Coordonnateur(s) : Alain Ravex (Cryoconsult)

Intervenant(s) : Alain Ravex (Cryoconsult)

Durée : 18h hors contrôle

ECTS : 1.0

Descriptif :

Rappels de thermodynamique : cycles ouverts, enthalpie, entropie, rendement isentropique, gaz parfaits, diagrammes thermodynamiques (Mollier, T-S). Transformation adiabatique irréversible d'un gaz parfait : rendement polytropique.

Cycles des machines : analyse thermodynamique d'une pompe hydraulique. Cycles à gaz (Brayton) ; étude du turboréacteur. Cycles à changement de phase (Rankine) ; étude des cycles à turbine à vapeur à compression et détente multiétagées avec soutirage ; machines frigorifiques. Moteurs à combustion interne. Ecoulement de fluides compressibles ; tuyères ; ondes de choc.

Cryogénie : propriétés des fluides cryogéniques, cryoréfrigérateurs (Gifford Mac-Mahon, Stirling, Joule-Thompson), liquéfacteurs (air, hydrogène, hélium). Propriétés mécaniques, électriques et thermiques des matériaux à basse température.

Domaines d'application : énergétique, machines thermiques, conversion de l'énergie thermique, réfrigération, cryogénie.

[Retour à la liste](#)

ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES

Coordonnateur(s) : Marc Massot (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Marc Massot (CentraleSupélec)

Durée : 18h hors contrôle

ECTS : 1.0

Descriptif :

Les écoulements diphasiques se rencontrent dans de nombreux systèmes allant des réacteurs nucléaires aux moteurs cryotechniques des lanceurs spatiaux en passant par certains réacteurs chimiques, les puits et les conduites utilisés pour l'extraction et le transport des produits pétroliers et les composants classiques de la thermique industrielle tels qu'évaporateurs ou condenseurs.

Les objectifs du cours sont les suivants :

- Savoir reconnaître et prédire les différentes configurations d'écoulements diphasiques liquide-gaz ou liquide-vapeur en conduite,
- Comprendre les techniques de mesures spécifiques aux écoulements diphasiques,
- Connaître les bases de la modélisation rationnelle de ces écoulements,
- Pouvoir effectuer des calculs de perte de pression dans un circuit thermohydraulique diphasique,
- Comprendre les mécanismes de transfert de chaleur en ébullition et en condensation,
- Aborder le problème des instabilités en conduite.

Le cours est destiné à des élèves-ingénieurs et à des élèves-chercheurs : un équilibre est recherché entre l'efficacité et la rigueur dans les différents sujets traités.

[Retour à la liste](#)

MILIEUX HORS EQUILIBRE - PLASMAS

Coordonnateur(s) : Christophe Laux (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Christophe Laux (CentraleSupélec), Marie-Yvonne Perrin (CNRS)

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 1.0

Descriptif :

L'objectif de ce cours est d'acquérir les notions de base permettant d'appréhender les milieux plasmas ainsi que les milieux hors équilibre qui interviennent dans de nombreuses applications aussi bien technologiques (démonstrateur de fusion ITER, combustion assistée par plasma, contrôle d'écoulements aérodynamiques, traitement de surfaces, rentrée atmosphérique, ...) que naturelles puisque les plasmas représentent plus de 99% de l'univers visible.

Programme de l'enseignement et concepts-clés abordés :

- Introduction aux plasmas, paramètres caractéristiques, phénomènes collisionnels et radiatifs
- Plasmas froids : types de décharges, description fluide, propriétés, applications industrielles
- Plasmas de rentrée atmosphérique
- Introduction aux plasmas de fusion

[Retour à la liste](#)

RAYONNEMENT DES GAZ ET DES MILIEUX DENSES

Coordonnateur(s) : Franck Enguehard (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Franck Enguehard (CentraleSupélec)

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 1.0

Descriptif :

Contenu de cet enseignement :

- Rappels de rayonnement des corps opaques : luminance, rayonnement de corps noir, grandeurs thermoradiatives (émissivité, absorptivité, réflectivités). Transferts entre corps opaques à travers des milieux transparents (aspects géométrique et spectral). Exercices d'application.
- Absorption, émission, diffusion volumiques ; auto-absorption ; épaisseur optique ; équation de transfert du rayonnement (différentes formulations) ; conditions aux limites ; flux radiatif et puissance radiative ; couplage avec le milieu matériel.
- Transfert radiatif sans diffusion en géométrie unidimensionnelle plane (solution analytique) : milieu homogène isotherme, milieu hétérogène et anisotherme.

- Limite du milieu optiquement épais ; conductivité radiative ; limite du milieu optiquement mince ; méthode d'évaluation de Hottel.
- Propriétés radiatives des gaz : phénomène de corrélation spectrale, modèle statistique à bandes étroites, autres modèles de propriétés radiatives des gaz. Propriétés radiatives des particules (théorie de Mie). Applications simples avec diffusion.
- Principe de réciprocité. Méthodes générales 3D de transfert (lancer de rayons, interpolation, Monte Carlo, ...).

Domaines d'application : sûreté nucléaire, industries gazière et des hautes températures (verre, acier, métallurgie, ...), propulsion aéronautique et aérospatiale, météorologie, climatologie, ...

[Retour à la liste](#)

TRANSFERTS TURBULENTS

Coordonnateur(s) : Ronan Vicquelin (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Ronan Vicquelin (CentraleSupélec)

Durée : 15h hors contrôle

ECTS : 1.0

Descriptif :

Il s'agit de modéliser les transferts de masse globale, de masses des différentes espèces, de quantité de mouvement et d'énergie sous toutes formes dans des fluides monophasiques hétérogènes, éventuellement turbulents et / ou réactifs.

- Processus de diffusion dans la limite des faibles nombres de Knudsen. Diffusion de la chaleur. Diffusion dans un mélange d'espèces. Echelles caractéristiques.
- Equations locales instationnaires de bilan pour un fluide monophasique hétérogène réactif (système matériel déformable, en mouvement).
- Equations statistiques de bilan ; le problème de la fermeture ; comparaison avec le cas de la diffusion moléculaire (aux faibles nombres de Knudsen).
- Echelles caractéristiques de turbulence (production, dissipation, ...).
- Structures d'écoulements turbulents simples en régimes établi (conduite) ou développé (plaque).
- Principes de base des différentes voies de modélisation de la turbulence : fermetures par diffusion turbulente, modèles RANS, simulation des grandes échelles, simulation numérique directe.

[Retour à la liste](#)

TURBOMACHINES

Coordonnateur(s) : Alexis Giaouque (Ecole Centrale Lyon)

Intervenant(s) : Alexis Giaouque (Ecole Centrale Lyon)

Durée : 18h hors contrôle

ECTS : 1.0

Descriptif :

Cet enseignement a essentiellement pour but de familiariser l'étudiant avec le fonctionnement et le calcul de l'écoulement dans une turbomachine. Après avoir situé la turbomachine dans l'ensemble du propulseur, on détaillera les principaux outils permettant de dessiner une turbomachine, c'est-à-dire de déterminer la géométrie d'un compresseur et d'une turbine répondant à un objectif de performance précis. A cet effet, les notions d'aérodynamique et de thermodynamique seront appliquées aux turbomachines afin d'établir les différentes modélisations de base et d'appréhender les différentes méthodes de calcul (1D, 2D ou 3D, Euler ou Navier-Stokes, stationnaire ou non) utilisables lors d'un dessin de machine.

Le cours abordera les points suivants :

- La turbine à gaz pour la production d'énergie et pour la propulsion aéronautique.
- Fonctions, domaine d'application et domaine d'utilisation des turbomachines.
- Application des formes intégrales des équations de la mécanique aux turbomachines.
- Analyse aérothermodynamique unidimensionnelle (transformations, rendements, ...).
- Analyse bidimensionnelle dans le plan circonférentiel (triangles de vitesse, équation d'Euler, aérodynamique de l'écoulement au passage des aubages, ...).
- Analyse bidimensionnelle dans le plan méridien (équilibre radial, lois de travail).
- Analyse de quelques écoulements secondaires 3D (couches limites, tourbillons, jeu, ...).
- Outils de conception : modèle quasi-3D d'écoulement sain, méthodes inverses.
- Spécificités des compresseurs centrifuges et des turbines.

Les séances de bureau d'étude auront pour but de réaliser la conception d'une machine pour un cahier des charges donné (performances, encombrement, ...).

[Retour à la liste](#)

Coordonnateur(s) : Aymeric Vié (CentraleSupélec)

Intervenant(s) : Aymeric Vié (CentraleSupélec) + autres intervenants

Durée : 21h contrôle inclus

ECTS : 2.0

Descriptif :

Cette activité traite de la simulation numérique d'écoulements au moyen d'outils de CFD (Computational Fluid Dynamics). Son objectif général est de comprendre le fonctionnement d'une suite logicielle de CFD, de la gestion de la géométrie à la simulation numérique en passant par le maillage, et d'apprendre à utiliser une version commerciale bien connue. Il s'agit en particulier de montrer que pour obtenir de bons résultats avec ce type d'outils, l'utilisateur doit toujours s'appuyer sur la physique des phénomènes et avoir une bonne connaissance des modèles mathématiques et des méthodes numériques utilisés.

La première séance de cours concernera la définition et la discrétisation du domaine de calcul. Après une présentation du mailleur commercial, des exercices de création et de maillage d'une géométrie simple seront proposés.

La deuxième séance de cours abordera la résolution numérique des équations de conservation (masse, quantité de mouvement, chaleur, ...) dans un domaine de calcul préalablement défini. Après une présentation du solveur commercial, une simulation numérique sera effectuée dans une géométrie simple.

Enfin, les dernières séances seront consacrées à la réalisation complète d'une étude numérique sous la forme d'un mini-projet. Ce travail permettra de mettre en évidence les capacités et les limitations des outils de CFD dans le cadre d'exemples bien connus expérimentalement (ou analytiquement) de transfert de quantité de mouvement ou de chaleur.

[Retour à la liste](#)

PROJET NUMERIQUE « THERMIQUE »

Coordonnateur(s) : Jean-Paul Chabard (EDF)

Intervenant(s) : Jean-Paul Chabard (EDF)

Durée : 21h contrôle inclus

ECTS : 2.0

Descriptif :

Méthodes d'éléments finis :

- Présentation des méthodes d'éléments finis pour l'équation de la conduction thermique : formulation variationnelle, prise en compte des conditions aux limites, les éléments finis de Lagrange, quelques résultats de convergence.

- Caractéristiques de la mise en œuvre des méthodes d'éléments finis : différentes matrices éléments finis, calcul élémentaire et assemblage, modes de stockage, méthodes de résolution (gradient conjugué préconditionné).
- Illustration par quelques exemples industriels de simulation numérique en mécanique des fluides avec transferts de chaleur.

Domaines d'application : tous les domaines où existent des problèmes liés au transferts thermiques.

[Retour à la liste](#)

ACTIVITE EXPERIMENTALE : DIAGNOSTICS ET METROLOGIE DANS LES ECOULEMENTS
--

Coordonnateur(s) : Laurent Zimmer (CNRS)

Intervenant(s) : Daniel Durox (CNRS), Deanna Lacoste (CNRS), Philippe Scoufflaire (CNRS), Laurent Zimmer (CNRS) + doctorants du laboratoire EM2C

Durée : 24h contrôle inclus

ECTS : 2.0

Descriptif :

Objectif :

Assurer un apprentissage des techniques expérimentales et des diagnostics optiques appliqués à la mesure dans les écoulements réactifs. La démarche méthodologique reste très proche de celle du chercheur ou du concepteur. Approche globale des techniques de diagnostic et de mesure, étude de la littérature sur le sujet, confrontation expérience / théorie, pratique de la rigueur expérimentale et parfois, constatation des limites de la théorie.

Forme :

Le module est construit autour d'un cours d'introduction permettant d'aborder les fondements physiques et théoriques des techniques expérimentales et des méthodes de diagnostic. Ce cours est suivi de 3 séances d'expérimentation en laboratoire.

Déroulement :

En laboratoire, on propose 9 bancs d'expérimentation, dont 3 seront traités par binômes. Chaque expérience sera suivie d'une séance de traitement des données et d'analyse sur ordinateur.

Contrôle :

L'activité du binôme est appréciée par l'intermédiaire d'une soutenance orale suivie d'une discussion.

Programme :

Introduction aux capteurs, aux techniques optiques de diagnostic et à leurs applications.

Le cours de techniques optiques de diagnostic introduit les notions de spectroscopie moléculaire pour caractériser les espèces constituant un milieu réactif comme une flamme. Les principes physiques de l'interaction rayonnement-matière permettent ensuite d'aborder les différentes techniques de diagnostic, basées ou non sur l'utilisation d'un laser sonde. Un cours sur les lasers est donné en introduction. Les techniques étudiées sont la spectroscopie d'émission spontanée des radicaux, la diffusion de Mie, la diffusion Rayleigh, la vélocimétrie laser Doppler, la vélocimétrie d'imagerie de particules, la fluorescence induite par laser, la diffusion Raman, l'interférométrie et l'holographie.

Les séances en laboratoire se réalisent autour de 7 bancs d'expérimentation : interférométrie, imagerie et tomographie, strioscopie, vélocimétrie laser Doppler (LDV), mesure des vitesses en petite soufflerie par fil chaud, spectroscopie des flammes, et étude d'écoulements en soufflerie.

A la fin des séances en laboratoire, deux séances sont prévues en salle de Laboratoire de Contrôle Digital pour le traitement des données et l'analyse des résultats.

[Retour à la liste](#)
