

2EL1410 - Transferts Thermiques

Responsables : **Gabi-Daniel STANCU**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS , FRANCAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30**

Année académique : **2024-2025**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **oui**

Présentation, objectifs généraux du cours :

Les transferts thermiques couvrent un domaine scientifique et technique très vaste. Le champ d'application de cette discipline se caractérise entre autres par des spectres d'échelles spatiales et temporelles considérables : du nanomètre (thématique des transferts thermiques à la nanoéchelle) aux distances interstellaires (astrophysique), de la femtoseconde (réponse thermique d'un système à une impulsion laser ultracourte) aux temps caractéristiques de la genèse de l'univers (évolution thermique des étoiles). Les transferts thermiques sont également en prise directe avec des sujets de société et des enjeux majeurs tels que l'énergie (optimisation énergétique des procédés industriels, isolation thermique des bâtiments,...), l'environnement (réchauffement climatique, effet de serre atmosphérique,...) ou encore les transports (optimisation des moteurs thermiques, piles à combustible et filière hydrogène, ...). Ils sont par essence une discipline où les phénomènes physiques à l'œuvre sont de natures très différentes, coexistent et sont couplés.

Ce cours approfondit et étend les notions de transfert thermique introduites dans les cours « Sciences des transferts » et « Modélisation et simulation de transferts thermiques instationnaires ». Par ailleurs, l'accent est porté ici sur l'acquisition des notions de base (via des exercices d'application immédiate - EAI) et des techniques de modélisation physique des transferts (via des problèmes de synthèse - PbS).

Intérêts de la discipline :

Concevoir, maîtriser et contrôler tout système ou procédé de tout secteur d'activité où apparaissent des transferts thermiques comme l'habitat résidentiel et tertiaire, les transports, l'industrie, la production d'énergie, etc. Certaines sciences de l'univers (météorologie, géophysique, ...) ainsi que les sciences de l'environnement reposent également en partie sur la maîtrise de ces transferts.

Objectif de l'enseignement :

Aborder les principaux modes de transfert thermique dans des cas simples. Cette formation à caractère scientifique est destinée à de futurs ingénieurs généralistes, a priori non spécialistes de la discipline.

C'est un enseignement de base en : conduction stationnaire et instationnaire ; rayonnement entre corps opaques à travers un milieu transparent, convection forcée et naturelle, laminaire et turbulente (approche phénoménologique).

Le traitement d'exercices et de problèmes lors de séances de Travaux Dirigés (TD) est l'occasion d'appliquer les connaissances introduites en cours et de développer des modèles simples de bilans. Il s'agit de résoudre des problèmes industriels, environnementaux ou météorologiques concrets

(démarche inductive). Certains exercices à caractère didactique introduisent, à partir d'exemples simples, des notions essentielles en transferts. Inversement, des problèmes de synthèse sont proposés en fin d'enseignement. Dans ceux-ci, la difficulté principale est de construire le fil conducteur de la solution (confrontation au flou et à l'incertain). Par ailleurs, de nombreux exercices d'application immédiate sont traités dans le livre de cours. Ils constituent un excellent entraînement.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence) :

SG6 et SG8

Prérequis :

Idéalement, avoir suivi les cours « Sciences des transferts » (cours de sciences pour l'ingénieur 1A, SG1 ou SG3) et « » (cours spécifique : Étude et modélisation des systèmes de conversion électromagnétique et transfert thermique instationnaire énergie 1A, ST2). Cependant, les étudiants qui n'auront pas suivi les deux cours ci-dessus pourront suivre cet électif mais ils devront, en amont des séances, travailler les cours qui sont disponibles sur les plateformes E-learning « E-SELF-LEARNING »

Plan détaillé du cours (contenu) :

- Cours LES BASES DES TRANSFERTS THERMIQUES : Conduction, convection rayonnement. Introduction du transfert conducto-convectif. Bilan d'énergie en régime stationnaire et sans mouvement. Analogie électrique.
o TD : (EAI) Mur entre deux fluides; Allure du profil de température dans un system 1D; (PbS) Isolation d'un conteneur cryogénique
- Cours AILETTE ET APPROXIMATION DE L'AILETTE
o TD (EAI) : Plaque chauffée; Refroidissement d'un circuit électronique; (PbS) Efficacité d'un radiateur domestique; Mesure de température d'un liquide par doigt de gant (devoir)
- Cours LES BASES DU RAYONNEMENT THERMIQUE : Notions de : corps opaque, milieu transparent, flux émis, absorbé, réfléchi, partant, incident et radiatif.
Conditions aux limites en présence d'échanges radiatifs. Notion de luminance monochromatique directionnelle. Première expression du flux radiatif. Notion et propriétés du rayonnement d'équilibre.
o TD (EAI) Calculs d'angles solides et de flux surfaciques incidents; Calculs d'intégrales spectrales de la loi de Planck (PbS) Principe de télédétection infrarouge
- Cours LES PROPRIÉTÉS RADIATIVES ET TRANSFERT RADIATIF : Caractérisation de la surface d'un corps opaque : notions d'émissivité, d'absorptivité et de réflectivité. Notions de : corps gris, corps noir et corps à propriétés radiatives isotropes. Modèles simples de transfert radiatif : (i) corps opaque convexe isotherme entouré par un corps noir isotherme ; (ii) corps opaque convexe isotherme de petites dimensions entouré par une enceinte opaque isotherme.
o TD (EAI) Rayonnement entre deux sphères; (PbS) Température d'une surface exposée au rayonnement solaire
- Cours METHODE GENERALE DE TRANSFERTS RADIATIFS ENTRE CORPS OPAQUES A TRAVERS UN MILIEU TRANSPARENT : Hypothèses de base de la méthode. Expression du flux partant et incident. Expression du flux total partant.
Notion de facteur de forme - propriétés. Equations pour une enceinte fermée constituée de surfaces grises. Généralisation aux surfaces non grises
o TD (EAI) Rayonnement « face à face » ; (PbS) Ecran radiatif - Mesure de température par thermocouple
- Cours CONDUCTION INSTATIONNAIRE ET PHYSIQUE DE LA DIFFUSION (1/2): Equation de bilan d'énergie et conditions aux limites. Notion de diffusivité thermique
Théorèmes généraux : théorème de superposition et théorème Π. Application à une géométrie semi-infinie (réponse aux temps courts) : problèmes de la température imposée, du flux imposé et du régime périodique forcé
o TD (EAI) Mise en équation d'un problème de conduction instationnaire 2D; Conduction instationnaire 1D - solution analytique dans le cas du flux imposé; (PbS) Inertie thermique d'un bâtiment (1/2)
- Cours CONDUCTION INSTATIONNAIRE ET PHYSIQUE DE LA DIFFUSION (2/2): Application à une

géométrie semi-infinie (réponse aux temps courts – suite) : problème de la mise en contact thermique de deux corps. Cas des milieux d'extension finie. Temps caractéristiques de conduction et de transfert conducto-convectif, nombre de Biot et retour sur l'approximation de l'ailette
o TD (EAI) Refroidissement d'une bille transparente; (PbS) Inertie thermique d'un bâtiment (2/2);
Traitement thermique de l'acier par laser

- Cours APPROCHE PHENOMENOLOGIQUE DE LA CONVECTION FORCEE EXTERNE : Flux de diffusion (à une paroi) et de convection (au loin). Notion de viscosité d'un fluide. Problème académique de la plaque plane à température imposée. Analyse dimensionnelle. Allure générale d'une corrélation de convection forcée externe. Introduction et significations physiques des groupements adimensionnés caractéristiques. Notion de similitude en convection. Critères de transition entre régimes laminaire et turbulent dans des configurations standard. Evolution du coefficient de transfert local le long d'une plaque ; effet de bord d'attaque.

o TD (EAI) Baie vitrée en convection forcée externe; (PbS) Conducteur, prudence – problème instationnaire

- Cours LES NOTIONS DE CONVECTION FORCEE INTERNE : Notions élémentaires sur les établissements des régimes (mécanique et thermique) et sur les régimes établis dans les conduites de section constante. Notion de température de mélange. Expression du nombre de Nusselt en régimes laminaire et turbulent pour des écoulements en conduite de section circulaire ; discussion physique des résultats. Cas des conduites de section non circulaire ; notion de diamètre hydraulique.

o TD (EAI) Calcul du coefficient de transfert dans un canal semi-circulaire; (PbS) L'hélium comme fluide caloporteur; Circulation d'eau dans un tube (devoir)

- Cours ANALYSE DIMENSIONNELLE EN CONVECTION NATURELLE : Phénomène – approximation de Boussinesq. Couches limites mécanique et thermique. Analyse dimensionnelle – similitude. Critère de transition entre régimes laminaire et turbulent. Expressions du coefficient de transfert. Spécificités de la convection naturelle interne. Caractère itératif d'un calcul de convection naturelle.

o TD (PbS) Etude thermique d'un double vitrage

o TD PROBLEMES DE SYNTHESE (PbS) Récupérateur d'énergie pour le résidentiel-tertiaire;

Climatisation d'un local dans un pays chaud et ensoleillé (devoir)

- EXAMEN FINAL

Déroulement, organisation du cours :

Le cours est proposé en SG6 (occurrence en anglais) et SG8 (occurrence en français) à travers 19 créneaux de 1h30 chacune, 3 éléments de préparation en distanciel (3 x 1h30) et une séance d'examen de 2h.

Organisation de l'évaluation :

Les deux premiers acquis d'apprentissage constituent le niveau de connaissance minimal attendu de la part de tout étudiant ayant suivi ce cours. Ils seront évalués en contrôle continu au fil de l'enseignement par de petits QCMs. Ces tests, non notés, permettront aux étudiants de s'autoévaluer et aux enseignants de mesurer le niveau de compréhension de certaines notions fondamentales et de détailler les points difficiles. Concernant l'activité de modélisation des systèmes thermiques, il s'agit là d'une compétence complexe à acquérir, à laquelle les étudiants s'initieront lors des séances de TD et qu'ils maîtriseront progressivement. La dernière séance de l'enseignement sera l'occasion de consolider tous les acquis de modélisation. Les acquis d'apprentissage seront évalués lors de l'examen final (2H) qui comportera deux parties. La première portera sur l'évaluation du niveau d'acquisition des deux premiers acquis d'apprentissage. Dans la deuxième on soumettra les étudiants à un problème de modélisation a priori complexe pour évaluer l'acquis de modélisation des systèmes thermiques.

La compétence C1.2 est validée si l'étudiant accomplit au moins 50% de la partie 2 de l'examen final. La compétence fondamentale C2.1 est validée si l'étudiant accomplit au moins 50% de la partie 1 de l'examen final. La note finale est la moyenne des notes des deux parties de l'examen.

Moyens :

- Equipe enseignante (noms des responsables) : Gabi Daniel Stancu, Benoit Goyeau
- Taille des TD (par défaut 35 élèves) : 35

- Plateformes « E-Self-Learning » en Français et en Anglais
- Outils logiciels et nombre de licences nécessaire : aucun
- Salles de TP (département et capacité d'accueil) : aucune

Acquis d'apprentissage visés dans le cours :

A l'issue de cet enseignement, les élèves :

- o Sauront identifier les différents modes de transfert thermique à l'œuvre dans une configuration donnée,
- o Sauront écrire et utiliser les bilans d'énergie appropriés sous leurs formes locale et globale et les équations de continuité aux interfaces, et pourront ainsi déterminer les champs de flux thermique et de température d'un système permettant ainsi de calculer les caractéristiques locales et globales nécessaires au dimensionnement du système,
- o Auront acquis une pratique de l'activité de modélisation des systèmes thermiques :
 - Lister de manière exhaustive les phénomènes de transfert thermique à l'œuvre dans une configuration donnée,
 - Utiliser l'analyse d'échelle pour : (i) faire des estimations d'ordres de grandeur permettant de discriminer les phénomènes prédominants de ceux qui peuvent être ignorés ; (ii) simplifier des problèmes a priori en géométries tridimensionnelles et/ou instationnaires vers des modèles avec des solutions analytiques,
 - Utiliser une approche inductive de résolution des problèmes : poser des hypothèses pertinemment justifiées qui seront validées a posteriori par les solutions résultantes,
 - Reformuler un problème multi-physiques et multi-échelles avec des phénomènes de couplage complexe, en une version simplifiée dans laquelle seuls les phénomènes prédominants auront été retenus,
 - Modéliser des systèmes thermiques complexes et utiliser les bilans fondamentaux pour résoudre des problèmes d'ingénieur.

Description des compétences acquises à l'issue du cours

:

- C1.2 « Choose the appropriate model (among several possible) for a given problem thanks to the right choices of modeling scale and simplifying assumptions »
- C2.1 « Deepen all knowledge in a chosen field, via the courses of the 2nd year»

Bibliographie :

- Livre en Anglais: « A first course in heat transfer » J. Taine, E. Iacona Editions Dunod 2011.
- Livre en Français : « Transferts Thermiques » Partie 1, J. Taine, F. Enguehard, E. Iacona, Dunod 2014
- Plateforme « E-Self-Learning » en Anglais : <http://e-mentor-en.ecp.fr/> cours présenté par G.D. Stancu
- Plateforme « E-Self-Learning » en Français : <http://e-mentor2.ecp.fr/> cours présenté par J. Taine