

Master 2
Dynamique des Fluides et Energétique

Bâtiment 625 - Université Paris-Saclay
91405 Orsay
Tel : 01 69 15 66 12
www.hebergement.universite-paris-saclay.fr/m2dfe



Descriptif des Unités d'Enseignement du
Master 2 « Dynamique des Fluides et Energétique »

(version du 21/07/2022)

1. Unités d'enseignement de semestre 3 – période A

Hydrodynamique avancée

Objectifs : Cette unité vise à donner une vision approfondie de l'hydrodynamique, notamment en ce qui concerne les couches limites, les écoulements en rotation, les écoulements de jets et de fluides non-newtoniens, ainsi que sur les ondes.

Contenu : - Couches limites (Equations de Prandtl, solutions de Blasius et de Falkner-Skan) - Ecoulements en rotation (écoulement géostrophique, écoulement de von Karman, effets de la viscosité) - Ecoulements de fluides non-newtoniens (fluides à seuils, rhéofluidifiants et rhéopaississants) - Ecoulements de jets (modèles auto-similaires et origines virtuelles) - Ondes (internes, inertielles, etc)

Caroline Nore, Professeur Université Paris-Saclay

Philippe CM : 15h, TD : 15h

Turbulence

Objectifs : Les écoulements turbulents jouent un rôle clef dans un grand nombre d'applications de la mécanique des fluides et des transferts thermiques : aéronautique, écoulements industriels, géophysiques etc. De plus, la turbulence continue de poser un certain nombre de problèmes fondamentaux au physicien : dissipation anormale, singularités à temps fini etc. L'objectif de ce cours est double : (i) fournir aux étudiants les concepts de modélisation de la turbulence utiles à l'ingénieur, avec pour objectif l'obtention d'équations moyennées bien adaptée à la résolution numérique des écoulements turbulents ; (ii) comprendre la physique des transferts d'énergie, à travers le concept de cascade d'énergie en turbulence homogène.

Contenu : Dans un premier volet de ce cours on dérive les équations moyennées (équations RANS) de la turbulence et l'on introduit les modèles de type viscosité turbulente : longueur de mélange et modèles à 2 équation de type k-epsilon. Ce premier volet met l'accent sur la résolution (analytique ou numérique) de géométries simples d'écoulement : couche limite, jets,

sillages etc. Un second volet décrit l'approche de Simulation des Grandes Echelles (LES), avec l'accent sur la simulation d'écoulements aéronautiques et industriels, ainsi que les modèles hybrides de type LES-RANS. Enfin, un troisième volet aborde la physique de la cascade d'énergie en turbulence homogène : éléments de dynamique tourbillonnaire, théorie de Kolmogorov, auto-similarité, spectres et fonctions de structures, intermittence.

Sergio Chibbaro, Professeur Université Paris-Saclay

Sébastien Deck, Ingénieur de recherche, ONERA

CM : 15h, TD : 15h

Aérodynamique

Objectifs : Dans cette UE sont enseignées les notions théoriques de base de l'aérodynamique. Le cours met l'accent sur l'aérodynamique compressible - l'incompressible n'est toutefois pas ignoré - en accord avec les développements actuels du secteur aéronautique et spatial : avions de transport transsoniques et supersoniques futurs, avions de combat, missiles, drones et lanceurs spatiaux. Les séances sont articulées en un cours et des travaux dirigés portant sur des applications immédiates du cours. L'UE se termine par une visite des souffleries de recherche de l'Onera Meudon.

Contenu :

- Les enjeux actuels de l'aérodynamique dans le cadre du développement durable.
- Notions de base de l'aérodynamique : portance, traînée, moment et stabilité. La finesse aérodynamique et son importance pratique.
- Equations de la mécanique des fluides et paramètres de similitude. Nombre de Reynolds et problématique de la simulation en soufflerie.
- Ecoulements monodimensionnels stationnaires et non-visqueux. Théorème de la dynalpie. Poussée d'une nacelle propulsive et traînée d'un profil d'aile.
- Ondes de choc et lignes de glissement. Equations de Rankine-Hugoniot. Application aux jets et aux prises d'air supersoniques.
- Effets visqueux et décollement. Théorie de la couche limite.
- Théorie des caractéristiques et propriétés des écoulements supersoniques. Application à la définition des tuyères de lanceurs spatiaux. - Ecoulements monodimensionnels instationnaires et non-visqueux. Théorie du tube à choc.

Reynald Bur, Ingénieur de recherche, ONERA

CM : 15h, TD : 15h

Thermique

Objectifs : Souligner les liens étroits entre la physique et la thermique en choisissant d'illustrer les modes de transfert et leur couplage par des exemples simples et concrets.

Contenu :

- Rayonnement : Rappels corps noir, corps gris et équilibre thermique
- Rayonnement dans les milieux semi-transparentes
- Résistance thermique dans des problèmes faisant intervenir simultanément les trois modes de transfert
- Convection forcée externe : couche limite et méthode intégrale
- Convection forcée interne : longueur d'entrée ; applications aux échangeurs de chaleur
- Convection naturelle : approximation de Boussinesq
- Transfert de chaleur lors de changement de phase : condensation ; évaporation ; ébullition

Cyprien Morize, Maître de Conférences Université Paris-Saclay

CM : 15h, TD : 15h

Volumes Finis et résolution numérique de Navier-Stokes

Objectifs : Introduction à la méthode des Volumes Finis. Application de la méthode dans le cadre d'un projet de résolution numérique de l'équation de Navier-Stokes.

Contenu :

- Introduction aux volumes finis et principes de base
- Résolution par volumes finis: équation de Laplace, équation d'Helmholtz
- Problème de convection-diffusion (schémas Upwind, Power-Law, Quick)
- Calcul d'un écoulement de fluide par volumes finis (maillages décalés, couplage vitesse-pression : SIMPLE, PISO, projection)
- Implémentation d'un schéma de résolution de l'équation de Navier-Stokes dans un cas-test standard (cavité entraînée, cavité différentiellement chauffée)

Nicolas Grenier, Maître de Conférences Université Paris-Saclay

CM : 10h, TP : 10h, TD : 10h

Instabilités hydrodynamiques

Objectifs : Fournir les connaissances actuelles sur la stabilité d'écoulements génériques en mécanique des fluides. Cours fondamental et académique avec une claire orientation applicative en trois volets :

- approches très récentes dites non modales qui rendent compte de croissances transitoires. La compréhension physique des mécanismes sous-jacents est cruciale et permettra notamment d'aborder le reste du cours.
- état de l'art de la transition à la turbulence dans la géométrie des écoulements cisailés: transitions super-critiques et sous-critiques, coexistence de régimes laminaire et turbulent, émergence de motifs organisés.

- sillages de corps bi- et tridimensionnels: quels que soient les régimes laminaires ou turbulents, la théorie de la stabilité permet de comprendre la dynamique complexe des zones de recirculation et de lâchers tourbillonnaires. Présentation d'exemples concrets d'applications industrielles en vue de réduire la force de résistance à l'avancement des véhicules de transports.

Contenu :

La première partie fournit un bagage théorique sur les approches non modales ou non normales, qui offrent un cadre efficace pour appréhender les croissances d'énergie aux temps courts. Cette partie présentera également la théorie des ondes courtes localisées. Cette théorie simple et élégante, permet d'apporter une compréhension sur les mécanismes d'instabilité en lien avec la topologie de l'écoulement de base. Les éléments suivants seront abordés : opérateur adjoint, trajectoire, instabilités elliptiques, hyperboliques et centrifuges. Le cours sera supporté par des simulations numériques effectuées sur Matlab.

La seconde et la troisième partie sur les écoulements cisailés et sillages seront étayées par une série de démonstrations expérimentales sur les installations de l'Unité de Mécanique et à partir de simulations numériques récentes des écoulements de Taylor-Couette, Couette plan et Poiseuille. Nous aborderons les difficultés expérimentales et numériques rencontrées dans ce type d'étude ainsi que les différents outils qui peuvent être utilisés pour les caractériser. Les bifurcations dans la stabilité des sillages académiques de corps cylindriques et sphériques serviront de base à l'étude d'écoulements plus complexes associés à l'aérodynamique des véhicules de transports.

Wietze Herreman, Maître de Conférences Université Paris-Saclay

CM : 15h, TD : 15h

Logiciels de simulation CFD

Objectifs : Initiation à l'utilisation de 2 logiciels commerciaux de CFD (Computational Fluid Dynamique) : ANSYS Fluent et OpenFOAM, largement utilisés en recherche fondamentale et/ou appliquée ainsi que dans les départements de Recherche et Développement.

Un projet sera ensuite mené sur l'un des deux logiciels de CFD . Chaque projet donnera lieu à des rapports d'avancement, à la rédaction d'un rapport final ainsi qu'à une soutenance.

Contenu :

- Initiation à ANSYS Fluent

- Initiation à OpenFOAM

Nicolas Grenier, Maître de Conférences Université Paris-Saclay

CM : 6h, TP : 24h

2. Unités d'enseignement de semestre 3 – période B

Écoulements interfaciaux et fluides complexes

Objectifs : L'objectif de ce cours est d'aborder d'une part, la physique des interfaces et d'autre part les écoulements de fluides complexes. Dans les deux cas, nous aborderons les aspects microscopiques et leurs conséquences à l'échelle macroscopique en particulier sur les écoulements. Le cours couple la mécanique des fluides à la physique de la matière molle.

Contenu :

1) Interfaces:

-Définition microscopique de la tension de surface, interactions de Van der Waals, interactions électrostatiques et théorie DLVO

-Effet macroscopique de la tension de surface: minimisation de surface, instabilités, écoulements interfaciaux, effet Marangoni.

2) Fluides complexes:

-Introduction sur les fluides complexes: polymères, colloïdes, micelles, biofluides...

-Lois de comportements rhéologiques: rhéofluidifiants, rhéoépaississants, visco-élastiques

Frédérique Giorgiutti, Maître de Conférences Université Paris-Saclay

Emmanuelle Rio, Professeur Université Paris-Saclay

CM : 15h, TD : 15h

Techniques expérimentales avancées en mécanique des fluides

Objectifs : Cette UE a pour objectif de fournir aux étudiants des connaissances approfondies dans les techniques expérimentales pour la mécanique des fluides utilisées aujourd'hui en laboratoire et dans l'industrie : vélocimétrie par images de particules, vélocimétrie laser à effet Doppler, mais aussi sur le traitement des données ou l'utilisation de la cavitation pour l'étude de certains écoulements en canal hydraulique.

Contenu : Cette UE se partage en une série de présentations des techniques expérimentales en mécanique des fluides, ainsi qu'une série de travaux pratiques sur les installations expérimentales disponibles à l'ENSTA et à l'Université Paris-Saclay.

Frédéric Moisy, Professeur Université Paris-Saclay

CM : 16h, TP : 16h

Magnétohydrodynamique

Objectifs : Les objectifs de cette UE sont d'introduire les équations de la magnétohydrodynamique en passant en revue les équations décrivant un fluide conducteur de l'électricité et de s'intéresser à la génération de champ magnétique par un écoulement de fluide (effet dynamo) en géophysique et astrophysique ainsi qu'aux écoulements industriels influencés par les champs magnétiques.

Contenu :

- Des dynamos industrielles au champ magnétique des étoiles et planètes.
- Equations de la magnétohydrodynamique (MHD).
- Paramètres adimensionnels.
- Effet dynamo, conditions d'obtention de cet effet et exemples (champ magnétique intermittent de la Terre, champ magnétique périodique du Soleil, etc).
- Interaction écoulement-champ magnétique.

Caroline Nore, Professeur Université Paris-Saclay

Pantellini Filippo (Observatoire de Meudon)

CM : 15h, TD : 15h

Fluides et grains

Objectifs : Cet enseignement a pour but de donner les connaissances de base concernant les écoulements en milieux poreux et les écoulements de suspensions et de milieux granulaires, ainsi que de donner une vue des champs d'applications industrielles et environnementales

Contenu :

- Milieux poreux : Lois d'écoulement de Darcy, dispersion hydrodynamique, filtration, applications aux domaines industriels et environnementaux tels que l'hydrologie (gestion et protection des aquifères), l'extraction pétrolière, ou le stockage (géothermie, déchets, CO₂)
- Suspensions : Equation de Stokes et propriétés, interactions hydrodynamiques entre particules (Stokeslet, Rotlet, Stresslet) et applications à la migration, à la sédimentation, fluidisation et à la rhéologie
- Milieux granulaires : Interactions entre grains (cohésion, collision, friction), rhéologie et localisation d'écoulements, applications au stockage et transport de grains, aux avalanches, à l'érosion

Philippe Gondret, Professeur, Université Paris-Saclay

Talon Laurent, Chargé de recherche CNRS

Georges Gauthier, Maître de Conférences Université Paris-Saclay

CM : 20h, TD : 10h

Calcul Haute Performance

Objectifs : Ce cours est une introduction à la programmation parallèle appliquée au domaine scientifique. Les ressources de calcul nécessaire à la résolution de nombreux problèmes physiques nécessitent l'utilisation de machines de calcul dédiées composées d'un grand nombre d'unités de calcul mises en réseau. Ce cours présente les techniques logicielles utilisées pour dompter la puissance de calcul de ces super-ordinateurs applicables également à l'échelle des processeurs parallèles qui composent nos ordinateurs. Il mettra en avant les méthodes les plus utilisées en fonction du type d'architecture matérielle : méthode par passage de message (MPI) et programmation par directives (OpenMP).

Mathieu Lobet, CEA Maison de la Simulation

CM : 7h, TP : 8h

Apprentissage automatique (Machine Learning)

Objectifs : Ce cours propose une introduction à l'apprentissage automatique (Machine Learning). L'objectif est de maîtriser les enjeux à la fois théoriques et opérationnels afin de comprendre le potentiel de cette classe de méthodes, ainsi que leurs limites, dans le cadre de la Physique en général, et de la Mécanique des Fluides en particulier. A l'issue de ce module, les étudiants doivent pouvoir intégrer ce type de méthodes dans leur pratique. Le cours traitera la méthodologie et les aspects pratiques de calcul.

Lionel Mathelin, CNRS

CM : 9h, TP : 6h

Interactions fluide-structure

Objectifs : La dynamique des systèmes couplés fluide-structure prend une place sans cesse croissante dans les préoccupations des ingénieurs et chercheurs. Ce cours a pour but de fournir les éléments théoriques nécessaires à la modélisation physique et à la résolution de tels problèmes. Les principaux phénomènes physiques observés lorsque la dynamique d'un solide est couplée à la dynamique d'un fluide seront mis en évidence : phénomènes de masse et de raideur ajoutées, de couplage de modes, instabilités de flottement et de flambage... On retrouve ces phénomènes dans de nombreux problèmes industriels, tels que l'aéronautique, le génie civil, maritime, électronucléaire ou encore la biomécanique. Le cours sera illustré par des exemples puisés dans ces différents domaines. Nous introduirons et utiliserons différents outils pour la résolution de ces problèmes, tels que l'analyse dimensionnelle, l'analyse modale et différentes méthodes numériques.

Contenu :

1. Mise à niveau en dynamique des structures et analyse modale (2 séances)
2. Introduction aux phénomènes couplés fluide-structure / Équations fluide et solide / Adimensionnement des équations
3. Petits mouvements d'un solide au contact d'un fluide au repos, phénomènes de masse, de raideur ajoutées
4. Aéroélasticité, phénomènes de flottement et de flambage.

5. Effets de sillage et d'instationnarité de l'écoulement

Les séances de cours seront complétées par des séances de TD théoriques et des séances d'application numérique sous Matlab.

Paolo Vannucci, Professeur UVSQ

CM : 10h, TD : 20h

Energies éoliennes et marines

Objectifs : L'objectif de cette UE est de montrer aux étudiants comment les concepts de la mécanique des fluides sont utilisés en production d'énergie éolienne ou marine. Les principes et théories de base sont présentés. L'accent est mis sur les modélisations et les pratiques numériques utiles à la R&D. De nombreux cas pratiques sont commentés.

Contenu : cette partie présente les grands principes, éprouvés ou émergents, sur lesquels les machines de production d'énergie renouvelable sont conçus, avec un accent mis sur la modélisation en aérodynamique des rotors, sur la prédiction de l'énergie annuelle produite. Chapitres du cours : histoire de l'aérogénération, modélisation, fonctionnement des éoliennes et prévision de l'énergie produite, spécificités de l'éolien off-shore, hydroliennes, dispositifs houlo-moteurs, autres énergies marines. Une application CFD (simulation numérique) sera réalisée en fin de cours.

Ivan Delbende, Maître de Conférences Sorbonne Université

CM : 6h, TP : 4h, TD : 5h

Thermoaéraulique des bâtiments

Objectifs : L'objectif de cette UE est de montrer aux étudiants comment les concepts de la mécanique des fluides et de la thermique sont utilisés en thermoaéraulique des bâtiments. Les principes et théories de base sont présentés. L'accent est mis sur les modélisations et les pratiques numériques utiles à la R&D. De nombreux cas pratiques sont commentés.

Contenu : cette partie vise à mettre en évidence les grands principes de modélisation des écoulements d'air dans les bâtiments, dans une perspective de modélisation des écoulements de ventilation naturelle, prédiction des écoulements dans des espaces spécifiques (atrium, entrées/sorties d'air, source de chaleur locale, etc ...) ou encore d'optimisation des systèmes passifs HVAC. Chapitres du cours : ventilation naturelle, convection naturelle et effets non Boussinesq, écoulements internes, jets et panaches. Une application CFD (simulation numérique) sera réalisée en fin de cours.

Anne Sergent, Maître de Conférences Sorbonne Université

CM : 6h, TP : 4h, TD : 5h

Micro- bio- fluïdique

L'objectif du cours est de poser les bases théoriques et pratiques de la microfluidique. Notre cours propose d'aborder les lois de la physique à l'échelle de la puce en suivant le plan suivant :

- Introduction générale sur la microfluidique, ses enjeux et les nouveaux concepts (principes, exemples pris dans la littérature, le génie chimique, la physique colloïdale, la médecine, la biologie, la chimie)
- Cours de microfabrication (différentes techniques de microfabrication, principe de la photolithographie, définition de la « soft-lithographie », introduction à l'impression 3D)
- Hydrodynamique des petits systèmes (la microhydrodynamique, les microjets, les écoulements secondaires)
- Mélange (mélange diffusif, chaotique, mélangeurs microfluidiques),
- Transport de particules en suspension (filtration, séparation)
- Électrohydrodynamique (électroosmose, électrophorèse – migration de particules chargées)
Micro-rhéologie
- Microfluidique à gouttes (formation, déplacement, brisure et fusion de gouttes)
- Microtransferts thermiques
- Au-delà de la microfluidique... la nanofluidique : transport osmotique et membrane

L'objectif des travaux pratiques est d'avoir une première expérience de la conception et de la réalisation de puce : microfabrication, initiation à la lithographie sur film sec, expérience d'écoulement et visualisation sous microscope

Auradou Harold, Directeur de recherche CNRS

Florent Maloggi, CEA

CM : 12h, TP : 3h