

# 2EL1420 - Mécanique des fluides

Responsables : **Ronan VICQUELIN , Morgan CHABANON**

Type de cours : **Electif 2A**

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 :

Le cours de Mécanique des Fluides prolonge les notions, équations et compétences fondamentales établies lors du cours de Sciences des Transferts vers une maîtrise des diverses complexités des écoulements fluides, de leur dynamique et des systèmes et configurations reposant sur la mécanique des fluides. Le cours permet d'atteindre un niveau confirmé dans cette discipline et les applications concernées avant d'envisager des études plus avancées et spécialisées. Dans leur construction, le cours et les travaux dirigés prennent en compte les évolutions récentes de la discipline en combinant les approches expérimentale, numérique et théorique pour former aux pratiques des ingénieurs du domaine et aux enjeux à venir (analyse de données, modélisation, simulations, mesures...).

Le cours se compose de trois blocs. Le premier approfondit les notions fondamentales au travers d'outils théoriques, de traitement et de l'analyse de données expérimentales et numériques. Un deuxième bloc est dédié à l'analyse des écoulements compressibles dans différents régimes (subsonique, supersonique, ondes de choc), permettant ainsi d'aborder un vaste champ d'applications jusqu'alors non traité. Enfin, les étudiants sont invités à choisir le thème de leur troisième bloc afin de s'ouvrir brièvement à une spécialisation parmi : Aérodynamique, Ecoulements météorologique et climatique, Propulsion aéronautique et spatiale, Systèmes énergétiques, Environnement, Hypersonique ...

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

SG6 et SG8

## Prérequis :

Les notions et compétences essentielles liées à la mécanique des fluides vu dans le cours de Sciences des Transferts sont un prérequis.

- Analyse dimensionnelle
- Bilans locaux et macroscopiques de transport de masse, espèces, quantité de mouvement et énergie
- Evolution entre des différents champs (vitesse, pression, température) et leurs interactions
- Calcul d'efforts (locaux ou intégrés), puissances, rendements, pertes de charges
- Couche limite

Pour les quelques élèves qui n'ont pas suivi Sciences des Transferts mais qui souhaiteraient tout de même suivre le cours de Mécanique des Fluides : il est impératif de travailler ces concepts et applications-clé avant de rejoindre le cours. Contactez le responsable de cours le cas échéant pour

recupérer l'accès aux ressources mises à disposition pour rattraper.

## Plan détaillé du cours (contenu) :

Bloc n°1 : Mécanique des Fluides avancée (4 séances de 3h00)

- **Séance 1 : Equations fondamentales et Ecoulements potentiels**

Rappel des équations-bilan locales, calcul des grandeurs d'intérêt, analyse dimensionnelle. Propriétés des écoulements incompressibles. Solutions analytiques classiques : Couette, Poiseuille, Tourbillon. Ecoulements potentiels.

TD : Ecoulement autour d'une sphère.

- **Séance 2 : Solutions analytiques et profil exact de Couche Limite**

Méthodes de résolution analytique des équations (suite) : Fonction de courant, Autosimilarité. Application à la détermination du profil de couche Limite sur une plaque plane. Extension des écoulements potentiels. Notions sur les expériences et simulations numériques pour la caractérisation de champs de vitesse.

TD : Dispersion de polluants dans l'atmosphère ; Ecoulement devant un plan d'arrêt

- **Séance 3 : Bilans macroscopiques et conditions de saut aux interfaces**

Rappel sur les bilans macroscopiques et expressions de la poussée d'un turboréacteur et d'une fusée. Approfondissement : écriture de nouveaux bilans, bilan sur entrée/sortie non-homogène. Résolution d'un problème ouvert. Conditions de saut à travers une interface. Notions de tension superficielle.

TD : Etude du ressaut hydraulique

- **Séance 4 : Instabilités et Turbulence**

Types d'écoulements instationnaires. Ondes acoustiques et vagues. Exemples d'instabilités. Démarche pour l'analyse d'instabilités. Application Couche Limite et Transition turbulente. Description des écoulements turbulents (Cascade de Kolmogorov, approches DNS, RANS, LES). Problème de fermeture et Hypothèse de Boussinesq.

TD : Instabilités d'interfaces ; Ressources de calcul pour une simulation directe

Bloc n°2 : Ecoulements compressibles (4 séances de 3h00)

- **Séance 5 : Dynamique des gaz - écoulements isentropiques**

Écoulements isentropiques de gaz réels. Conditions d'arrêt isentropiques. Écoulements avec section de passage variable. Écoulements isentropiques de gaz parfaits. Equations fondamentales pour écoulements isentropiques de gaz parfaits.

TD : Calcul de grandeurs d'arrêt dans une tuyère convergente-divergente ; Etude d'une entrée d'air

- **Séance 6 : Conditions critiques et rendements isentropiques**

Conditions critiques isentropiques. Section critique et phénomène d'amorçage. Expression débit pour un écoulement compressible. Transformations réelles et Rendements isentropiques. Systèmes propulsifs.

TD : Analyse d'un turboréacteur à simple flux

- **Séance 7 : Ondes de choc**

Equations fondamentales pour les ondes de chocs droits. Expressions pour les gaz parfaits. Propriétés de l'écoulement au travers d'un choc droit. Perturbations faibles des écoulements supersoniques.

TD : Etude d'un statoréacteur élémentaire

- **Séance 8 : Chocs obliques et écoulement dans les tuyères**

Ondes de choc obliques. Régimes d'écoulement dans les tuyères convergentes-divergentes pour diverses valeurs du rapport de détente. Souffleries supersoniques.

TD : Entrée d'air d'un jet supersonique ; Soufflerie à basse densité

Bloc n°3 : Ouverture thématique (trois séances)

- **Au choix parmi plusieurs thématiques proposées**. Par exemple : Aérodynamique, Ecoulements météorologique et climatique, Propulsion aéronautique et spatiale, Systèmes énergétiques, Environnement, ... Les thèmes proposés en 2023-2024 étaient :
  - Aérodynamique
  - Propulsion Aéronautique
  - Propulsion Spatiale
  - Circulation atmosphérique
  - Environnement et Qualité de l'air
  - Hypersonique
  - Computational Fluid Dynamics

Ces thèmes sont variables d'une année à l'autre. Ils seront présentés dès la première séance pour l'année en cours.

## Déroulement, organisation du cours :

Un équilibre est recherché entre une présentation de la physique des phénomènes, la discussion des aspects qualitatifs, l'introduction des concepts, de la modélisation, de l'écriture des équations et de leur résolution. Le choix des problèmes traités résulte d'un compromis difficile entre l'importance respective des sujets et le temps réduit disponible. Sur le plan pédagogique, le cours s'appuie sur une utilisation de tous les moyens audiovisuels : développements complets au tableau, expériences en amphi, illustrations et démonstrations sur ordinateur, projections multiples, films de mécanique des fluides, des sessions de résolution de problèmes en Petites Classes (« problem solving workshops »). Les problèmes abordés en PC sont proposés comme travail personnel en dehors des séances.

Le cours est programmé sur 10 séances de 3h (cours magistral puis classes de TD) et une séance d'examen. L'activité comprend ainsi :

7 séances communes de cours en amphithéâtre, + 1 séance en vidéo  
7 séances de problem-solving workshop réparties en Petites Classes + 1 séance à travailler à distance. Les étudiants sont répartis en groupes homogènes dans des salles de 30-35 personnes et encadrés par des assistants,  
un contrôle continu sous la forme d'un test de connaissance à la 4ème et 6ème séances,  
3 séances en blocs thématiques  
un contrôle final écrit d'une durée de 2h.  
une évaluation des blocs thématiques

### Langues

Cours SG6 : Français + petite classe en anglais

Par défaut, l'ensemble des élèves suivent le cours en Français en amphithéâtre.

Avant le début du cours, un message est envoyé aux élèves pour leur permettre, s'ils le souhaitent,

de rejoindre une petite classe intégrée où tout le cours est réalisé en anglais.

### Cours SG8 : Anglais

Le cours de SG8 est proposé uniquement en anglais. L'offre en bloc thématique est réduite.

## Organisation de l'évaluation :

3 évaluations à travers les différents blocs :

### **Bloc 1 (20%) : questionnaires (2 x 15 min.) de connaissances**

Les contrôles des connaissances lors des séances n°4 et n°6 ont pour but la vérification des notions acquises durant le premier bloc du cours. L'étudiant obtient une **note CA sur 20**. La présence à ces tests est obligatoire. Toute absence justifiée amène à repasser un questionnaire-test en dehors des séances prévues. En cas d'absence non-justifiée auprès de l'équipe pédagogique, la note de 0 sur 20 est attribuée à CA.

### **Bloc 2 (50 %) : contrôle écrit surveillé lors du dernier créneau de cours**

Le contrôle écrit final est de 2h00. Dans l'absolu, l'ensemble des éléments du cours hors bloc thématique est au programme. En pratique, le sujet portera essentiellement sur le contenu du bloc n°2 lié aux écoulements compressibles. Le contrôle est réalisé avec tout document écrit autorisé. L'étudiant obtient une **note CF sur 20**.

### **Bloc 3 (30%) : évaluation bloc thématique**

**L'évaluation du bloc thématique porte sur un projet spécifique démarré en séance sur un sujet technique et scientifique lié à la thématique étudiée. La démarche et les résultats du projet sont rapportés au format spécifique demandé par le bloc (poster, présentation ou rapport). L'étudiant obtient une note CB sur 20 déterminée à partir de trois critères globaux déclinés dans chaque bloc:**

- CB.1 (4 points) : Forme, clarté et structure
- CB.2 (7 points) : Engagement personnel en séance, travail continu en séance et en dehors, investissement particulier
- CB.3 (9 points) : Qualité de l'étude, appréciation du travail, des résultats et analyses

La note finale correspond à l'arrondi de la note obtenue après application de la formule

$$NF = 0,5 \times CF + 0,3 \times CB + 0,2 \times CA$$

Une session bis est organisée plus tard dans l'année (juin les années précédentes). Dans ce cas, seule la note obtenue lors de ce contrôle de rattrapage est prise en compte. Les notes CA ou CB ne sont alors pas considérées.

Pour les élèves partant en S8 anticipé, leur absence à l'examen de session 1 est excusée et une dérogation au bloc thématique est accordée. La note finale est alors calculée comme  $0,65 \times CF + 0,35 \times CA$ , où CF est la note obtenue lors de l'examen de deuxième session.

## Moyens :

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours :

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

- Modéliser des systèmes complexes, étape nécessaire à leur dimensionnement et leur optimisation :
  - Faire des approximations et des estimations d'ordres de grandeur,
  - Simplifier un problème d'apparence compliquée
  - Utiliser les bilans fondamentaux pour résoudre des problèmes d'ingénieur.
- Caractériser un système mettant en jeu un écoulement fluide à l'aide de plusieurs éclairages : solutions analytiques simplifiées, résultats de simulations numériques, données expérimentales.
- Décliner ces compétences dans des écoulements complexes (instationnaires, compressibles)
- S'approprier un champ disciplinaire et/ou applicatif connexe à la mécanique des fluides, lui permettant de démontrer qu'il/elle sait s'adapter à un nouveau contexte avec une certaine autonomie grâce à son niveau de maîtrise.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours :

Core skills in CentraSupélec curriculum:

The course allows the students to validate the C1 and C2 skills in the engineering curriculum.

C1 is validated if  $CF \geq 10$ .

C2 is validated if  $NF \geq 10$  and  $CB \geq 12$ .

## Bibliographie :

Mécanique des Fluides, Tome I & II, S. Candel