**Intitulé de l’Unité d’Enseignement / Entité Constitutive (UE/EC) :**

**Code UE :** MU5MEF02

**Volumes horaires / étu :** 22h Cours 20h TD 16h Projet

**Nombre de crédits de l’UE/EC :** X ECTS

**Mention(s) de Master de l’UE :**  Mécanique  AR  E3A

**Parcours-type :** E3A : CIMES  Syscom  IPS

AR :  SAR  ISI

MECA :  MS2  MF2A  EE  CompMech  ACOU  EE APP

**Semestre où l’enseignement est proposé :**  S1  S2  S3  S4

**Langue d’enseignement :**  Français  Anglais

**Public concerné :**  Sorbonne Université  Autre (préciser) :

**Localisation :**  Campus PMC  Autre (préciser) :

**Objectifs de l’enseignement :**

L’objectif du cours est de présenter les outils théoriques utilisés pour étudier les écoulements multiphasiques dans le cadre d’une description continue de la matière. Dans un premier temps, les lois de bilan permettant de tenir compte de la présence de plusieurs phases seront établies et les approches numériques dédiées seront détaillées. Par la suite, des problèmes classiques, pour lesquels des solutions analytiques ou semi-analytiques ont été obtenues, illustreront les notions présentées et permettront de discuter l’influence de la tension de surface, des différences de densité, des contraintes visqueuses, du changement de phase ou de la compressibilité. Les cours théoriques seront accompagnées par des exercices d’application s’appuyant sur le logiciel open-source Basilisk, qui bénéficie des développements les plus récents dans le domaine de la simulation des écoulements multiphasiques. Les étudiants pourront consolider leurs connaissances à travers un projet numérique portant sur un problème tiré d’une situation réaliste (industrielle ou environnementale).

**Connaissances et compétences acquises par l’étudiant à l’issue de l’enseignement :**

À l’issue de cet enseignement, les étudiants seront capables de :

* identifier les paramètres sans dimensions qui interviennent dans un problème particulier ;
* formuler les conditions de saut pour la vitesse, la pression et le flux d’énergie à travers une interface ;
* modéliser mathématiquement un problème complexe
* maîtriser les notions permettant de décrire l’influence de la présence d’une interface sur un écoulement
* décrire les méthodes numériques spécifiques à la résolution de problèmes multiphasiques
* réaliser des simulations de problèmes complexes avec basilisk en étant conscient des limitations techniques

**Contenu de l’enseignement :**

Le cours (60h) s’articule autour de trois thèmes principaux et un projet réalisé par les étudiants sur toute la durée de l’enseignement. Chaque séance consacrée au projet (4h) sera décomposée en un cours (2h) suivi d’exercices d’applications (2h).

Thème 1 : modélisation mathématique des écoulements multiphasiques (6h cours + 6h TD)

Dans cette partie, nous revenons sur les équations de Navier-Stokes et établissons les lois de bilans sur une interface (masse, quantité de mouvement, énergie), les solutions d’équilibre (mécanique/thermodynamique). Le lien entre les notions de vorticité, d’interface et de turbulence sera discuté.

Thème 2 : Méthodes numériques pour les écoulements multiphasiques (6h cours + 6h TD)

Dans cette partie, nous présentons les caractéristiques principales des méthodes numériques dédiées à la simulation des écoulements multiphasiques. Les méthodes classiques pour la résolution des équations de Navier-Stokes, en incompressible et en compressible, les méthodes d’advection d’une interface, les modèles pour prendre en compte les discontinuités des champs de vitesse et de pression (approche à un fluide, approche multicomponent, intégrales de frontières) et la tension de surface seront détaillées

Thème 3 : Exemples fondamentaux d’écoulements multiphasiques (12h cours + 12 TD)

Dans cette partie, nous appliquons les notions développées dans les thèmes précédents pour obtenir la solution exacte et/ou simuler certains problèmes classiques des écoulements multiphasiques. Plus précisement :

Écoulements dus à la tension de surface :

* instabilités de Rayleigh-Plateau et fragmentation auto-similaire
* retractation du bourrelet de Taylor-Culick
* écoulements de coin (solution de Keller-Miksis)

Instabilités de Kelvin-Helmholtz en écoulements multiphasiques.

Écoulements multiphasiques internes (bulle de Taylor, bulle de Bretherton, écoulements stratifiés...)

Effet de la compressibilité sur les écoulements multiphasiques : solution de Rayleigh-Plesset, oscillation et croissance de bulles de gaz/vapeur dans certains cas limites (adiabatique, isotherme, systèmes liquide-vapeur purs).

Projet personnel (travail en autonomie + 12h TP + 4h présentations orales)

Chaque étudiant pourra appliquer les concepts exposés dans le cours à un problème concret attribué dès le démarrage de l’UE et à traiter individuellement (si les conditions ne le permettent pas, des binômes seront constitués). Trois séances de 4h, réparties sur toute la durée des enseignements, permettront d’accompagner la progression des projets. Deux présentations sont prévues, la première consacrée à la présentation des résultats préliminaires et des perspectives, la seconde servant à évaluer le travail.

**Prérequis :**

Bases solides en mécanique des fluides et en mécanique des milieux continus indispensables. Une

connaissance élémentaire des méthodes numériques (et en particulier de basilisk) et des propriétés microscopiques de la matière est bienvenue.

**Modalités de contrôle des connaissances (indicatives) :**

projet numérique (40%) - examen écrit (60%)

**Références bibliographiques :**

`An Introduction to Fluid Dynamics’ de G.K. Batchelor (Cambridge University Press)

‘[Direct Numerical Simulations of Gas-Liquid Multiphase Flows](https://www.abebooks.fr/servlet/BookDetailsPL?bi=30243863589&searchurl=an%3Dgretar%2Btryggvason%2Bruben%2Bscardovelli%2Bstephane%2Bzaleski%26sortby%3D17&cm_sp=snippet-_-srp1-_-title1)’ [Grétar Tryggvason, Ruben Scardovelli, Stéphane Zaleski](https://www.abebooks.fr/rechercher-livre/auteur/gr%E9tar-tryggvason-ruben-scardovelli-st%E9phane-zaleski?cm_sp=det-_-srp-_-author) Cambridge University Press

**Séquencement de l’enseignement (indicatif) :**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| semaine | C | TD | Projet | Contrôle |
| S1 | C1 (2h) | TD1 (2h) |  |  |
| S2 | C2 (2h) | TD2 (2h) |  |  |
| S3 |  |  | P1 (4h) |  |
| S4 | C3 (2h) | TD3 (2h) |  |  |
| S5 | C4 (2h) | TD4 (2h) |  |  |
| S6 | C5 (2h) | TD5 (2h) |  |  |
| S7 |  |  | P2 (4h) |  |
| S8 | C6 (2h) | TD6 (2h) |  |  |
| S9 | C7 (2h) |  |  | Présentation intermédiaire (2h) |
| S10 | C8 (2h) | TD7 (2h) |  |  |
| S11 | C9 (2h) | TD8 (2h) |  |  |
| S12 |  |  | P3 (4h) |  |
| S13 | C10 (2h) | TD9 (2h) |  |  |
| S14 | C11 (2h) | TD10 (2h) |  |  |
|  |  |  |  | Présentation Finale (2h) |
|  |  |  |  | Examen final (2h) |

**Date de la rédaction de la fiche d’UE :**11/05/2022

**Rédacteur :** Daniel Fuster et Eric Sultan