

# Simulation numérique haute fidélité pour les écoulements turbulents

Niveau M2 - Semestre S1 - Crédits 3 ECTS - Code MU5MEF13

## Présentation pédagogique.

Ce module vise à fournir une introduction à la simulation numérique haute fidélité des écoulements turbulents, avec un focus sur les équations de Navier-Stokes compressibles. La large gamme d'échelles spatiales et temporelles actives dans cette typologie d'écoulement implique des fortes contraintes en termes de modélisation physique et de résolution numérique, ce qui comporte des coûts de calcul importants. Dans la première partie on s'intéressera à la modélisation physique par simulation numérique directe (DNS), méthode de Boltzmann sur réseau (LBM) et simulation aux grandes échelles (LES), avec des notions de calcul massivement parallèle (HPC). Le cours fournira également une présentation des méthodes de discrétisation spatiale et intégration temporelle à haute précision nécessaires à bien mener ces calculs, en soulignant les effets de l'interaction entre modèle physique et méthode numérique. Les concepts seront illustrés par des applications numériques à l'aide d'un logiciel de calcul parallèle pour l'étude de configurations turbulentes à nombres de Reynolds et Mach élevés.

## Contenu de l'Unité d'Enseignement.

- Introduction au calcul haute performance (HPC)
- Rappels généraux sur les écoulements turbulents. Notions de moyenne et filtrage, stratégies et niveaux de modélisation de la turbulence
- Simulation aux grandes échelles (LES) : équations de Navier-Stokes filtrées, approche explicite et implicite, modélisation fonctionnelle et structurelle du tenseur de sous-maille, approche wall-modeled et wall-resolved, aspects numériques (interaction avec les erreurs numériques, choix du maillage, conditions aux limites).
- Méthodes Hybrides RANS/LES : classification générale, approches statistique, zonale et globale, avantages et limitations de quelques modèles célèbres (hybrid viscosity, SAS, VLES, PITM, PANS, DES, DDES)
- Méthode de Boltzmann sur réseau (LBM) : équation de Boltzmann, développement de Chapman-Enskog, opérateur BGK, discrétisation en espace et en temps, applications.
- Méthodes numériques pour l'intégration temporelle : méthodes à un pas, multi-pas, Runge-Kutta et implicites. Analyse de stabilité et exemples d'applications.
- Schémas spatiaux d'ordre élevé : schémas compacts, DRP, TVD, WENO. Formulation hybride et skew-symmetric. Stratégies de capture de choc.
- Application à configurations canoniques : turbulence homogène isotrope, canal plan, interaction choc / tourbillon.

**Pré-requis.** Mécanique des Fluides, bases de la simulation numérique des écoulements, dynamique de la turbulence.

## Références bibliographiques.

- E. Garnier, N. Adams et P. Sagaut, « Large Eddy Simulation for Compressible Flows », Springer (2009) ;
- C. Bailly et G. Comte-Bellot, « Turbulence », Springer (2015) ;
- S. B. Pope, « Turbulent Flows », Cambridge University Press (2000);
- P. Sagaut, S. Deck, M. Terracol, « Multiscale and multiresolution approaches in turbulence », Imperial College Press, 2<sup>nd</sup> Edition (2013);

**Ressources mises à disposition des étudiants.** Supports de cours, sujets de TD, notebooks Python, exercices d'entraînement, vidéos.

## Connaissances scientifiques développées dans l'unité.

- Notion de modèle de sous-maille
- Classification et hiérarchie des différentes techniques pour la simulation haute fidélité d'écoulements turbulents
- LES, hybrid RANS/LES, LBM : avantages et limitations
- Méthodes d'ordre élevé en temps et en espace pour la simulation d'écoulements multi échelles
- Interaction entre modèle de turbulence et schéma de discrétisation
- Notion de calcul parallèle

### **Compétences développées dans l'unité.**

- Comprendre les principes de base et connaître avantages et limitations des principaux modèles haute fidélité pour la simulation d'écoulements turbulents
- Mettre en place des calculs en choisissant les ingrédients numériques le plus adaptés (modèle physique, méthode numérique, maillage, conditions limites, ..)

### **Compétences méthodologiques et transversales**

- Mise en données d'une simulation numérique : définition du domaine de calcul, choix des conditions aux limites, génération du maillage, post-traitement et analyse des résultats
- Projet de groupe sur la simulation numérique d'un écoulement turbulent.

### **Volumes horaires présentiel et hors présentiel.**

Heures présentielles totales : 30 h réparties en 18 h de CM, 10 h TD/TP et 2 h contrôle des connaissances. Travail personnel attendu : 45 - 60 h.

**Évaluation.** Contrôle continu (/50) et examen écrit (/50)

**Responsables.** Luca Sciacovelli