

Modélisation stochastique et simulation de la turbulence

Clément MORHAIN, CMAP - Gif-sur-Yvette Marc MASSOT, CMAP - Palaiseau
Rémi ZAMANSKY, IMFT - Toulouse

Pour des écoulements turbulents, la résolution numérique directe des équations de Navier-Stokes fournit des données précieuses pour comprendre les mécanismes physiques à l'œuvre, mais reste limitée à des nombres de Reynolds modérés. La simulation d'ordre réduit de ces écoulements à l'aide de modèles stochastiques vise à reproduire les statistiques connues des écoulements turbulents, tout en promettant une réduction significative des coûts de calcul. Nous mettrons ici en perspectives les deux types d'approches sur lesquelles nous travaillons : structurelles, pour reconstruire des champs de vitesse grâce à la transformée de Fourier ou la décomposition en ondelettes ; ou purement stochastiques pour suivre l'évolution certaines variables le long des trajectoires de particules fluides.

Orateurs pressentis et sujets abordés :

- **Matthieu Chatelain** (*ENS Lyon*) présentera un modèle structurel basé sur la décomposition de Fourier [2], avec une évolution temporelle stochastique de ses coefficients. Le champ de vitesse gaussien fractionnaire à divergence nulle généré permet de reproduire les propriétés connues de la turbulence homogène et isotrope (THI) jusqu'aux statistiques d'ordre deux, à un nombre de Reynolds et une régularité temporelle donnés. Les prédictions exactes et numériques du modèle sont comparées à des simulations numériques directes des équations de Navier-Stokes.
- **Clément Morhain** (*CentraleSupélec & IPP*) présentera un modèle intermittent fondé sur une décomposition en ondelettes à divergence nulle. Alors que [3] reposait sur des coefficients d'ondelettes gaussiens, il s'agit ici de leur associer une loi non gaussienne grâce à un processus de cascade multiplicative. Cela permet d'obtenir un champ de vitesse multifractal dont les statistiques d'ordre élevé sont cohérentes avec celles de la THI intermittente.
- **Paul Maurer** (*ENPC*) fera le lien entre les mesures multifractales aléatoires permettant de modéliser le phénomène d'intermittence, et leur approximation par une somme de processus d'Ornstein-Uhlenbeck, bien moins coûteuse à simuler. Il analysera la sensibilité au noyau des processus de Volterra sous-jacents, et montrera que l'approximation faible de ces mesures intermittentes converge avec un taux exponentiel [1].
- **Ezequiel Castro Torre** (*IMFT*) travaille sur la modélisation stochastique de la turbulence. Dans la continuité de [4], il présentera ici un nouveau modèle lagrangien prédisant l'évolution de la vitesse, de l'accélération et du tenseur des gradients de vitesse le long des trajectoires de particules fluides. L'évolution conjointe de ces variables constitue une avancée significative pour la modélisation stochastique de la turbulence, dont le couplage repose sur des statistiques conditionnelles calculées directement à partir de simulations numériques finement résolues.

- [1] M. Bossy, K. Martinez, P. Maurer. *Weak rough kernel comparison via PPDEs for integrated Volterra processes*, 2025. doi :10.48550/arXiv.2501.07509.
- [2] M. Chatelain, J. Domingues Lemos, W. Ruffenach, M. Bourgoïn, C.-E. Bréhier, L. Chevillard, I. Sibgatullin, R. Volk. *A spatio-temporal random synthetic turbulent velocity field : The underlying gaussian structure*. *Journal of Fluid Mechanics*, **1030**, A23, 2026. doi :10.1017/jfm.2026.11261.
- [3] C. Morhain, R. Letournel, M. Massot, A. Vié. *Hybrid stochastic-structural reduced-order modelling of particle-laden turbulent flows based on wavelet reconstruction*. Under review, 2025.
- [4] R. Zamansky. *Acceleration scaling and stochastic dynamics of a fluid particle in turbulence*. *Physical Review Fluids*, **7(8)**, 2022. doi :10.1103/PhysRevFluids.7.084608.

Contact : clement.morhain@polytechnique.edu