

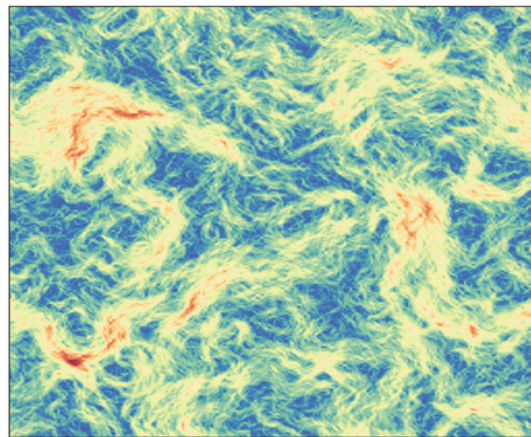
## Avis de soutenance

Madame Roxane Letournel

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés  
***Reduced-order modeling and simulation of turbulent disperse two-phase flows: new theoretical and modeling approaches for reproducing intermittency, segregation and two-way coupling***

dirigés par Madame Frédérique Laurent-Nègre et  
co-encadrés par Monsieur Aymeric Vié et Monsieur Marc Massot

Le **Judi 17 Février 2022 à 14h30**  
à CentraleSupélec, 3 rue Joliot-Curie 91192 Gif-sur-Yvette Cedex  
Théâtre Rousseau (Bâtiment Bouygues)



*Simulation cinématique de la turbulence à base d'ondelettes*

### Composition du jury :

Prof. Gianluca Iaccarino	Université de Stanford	Rapporteur
Prof. Alain Pumir	ENS Lyon	Rapporteur
Prof. Olivier Simonin	IMFT, INP Toulouse	Rapporteur
Prof. Mireille Bossy	INRIA Sophia Antipolis	Examinatrice
Prof. Mikhael Gorokhovski	LMFA, Ecole Centrale Lyon	Examinateur
Prof. Pauline Lafitte	MICS, CentraleSupélec	Examinatrice
Prof. Cristian Marchioli	Université de Udine	Examinateur
Dr. Frédérique Laurent-Nègre	EM2C, CentraleSupélec	Directrice de thèse
Prof. Raoul Robert	Université de Grenoble Alpes	Invité
Prof. Marc Massot	CMAP, Ecole Polytechnique	Co-encadrant
Dr. Aymeric Vié	EM2C, CentraleSupélec	Co-encadrant

**Title :** Reduced-order modeling and simulation of turbulent disperse two-phase flows: new theoretical and modeling approaches for reproducing intermittency, segregation and two-way coupling

**Keywords :** Disperse phase flows, intermittency, segregation, two-way coupling, stochastic models, kinematic simulation

**Abstract:** The ability to model, simulate, and predict turbulent disperse two-phase flows is crucial for various industrial and environmental issues, such as internal combustion engines, pollutant transports or clouds formation. However, if the resolution of all scales of turbulence by DNS (Direct Numerical Simulation) is possible in academic configurations, it becomes unrealistic for industrial applications. The use of Reduced-Order Simulation (ROS) allows, by filtering or averaging the equations, to take into account only the large scales of the flow and to make the simulation of real systems accessible. Although recent advances have made these models predictive for single-phase flows, they do not accurately account for the interaction with the disperse phase due to small-scale unresolved couplings.

In order to overcome this problem, the objective of this thesis is to identify the physical phenomena neglected by ROS for the dynamics of particles and to propose a complete characterization of them. Based on these physical analyses, we develop mathematically consistent models, which, when coupled to the ROS, recover the statistics obtained by DNS while maintaining or even improving the computational efficiency.

The first shortcoming identified in ROS is the loss of the intermittency phenomenon, corresponding to violent fluctuations of the dissipation field of the turbulent flow. A mathematical characterization of intermittency has been proposed for a single-phase flow. Stochastic models aiming at reproducing the intermittency are based on multiplicative Gaussian chaos, of which several models exist in the literature. We have proposed an original mathematical method to construct such processes in a generic way as an infinite sum of Ornstein-Uhlenbeck processes. This formalism allows not only to unify the writing of the existing processes but also to develop a new one, more versatile and more efficient in computation time.

In addition, a turbulent flow can generate a heterogeneous spatial distribution of inertial particles, namely the preferential concentration. The ROS poorly captures these dynamics by not solving the small scales with which the particles interact. To recover the properties of the unresolved scales, we have proposed a new kinematic model based on divergence-free wavelets. By comparing this model with DNS and kinematic models from the literature, we have shown that it can recover the main statistics of the two phases and can be adapted to different flows.

Finally, the energy transfers between phases and between resolved and unresolved scales are not correctly reproduced in the current ROS. As an essential prerequisite to designing a new model to overcome these shortcomings, we have carried out an important work of analysis of these reverse couplings from DNS and unified the literature results. We were thus able to identify the scales and mechanisms of these energy transfers, as well as the main parameters that characterize these phenomena, such as the number density of particles. A measure of heterogeneity has also been developed in order to identify the characteristic regimes of flows with low particle loadings, which have been little studied until now.

These works provide new insights into the interactions between particles and turbulent flows. This thesis has thus allowed us to carry out in-depth analyses and to propose original models to enrich the ROS, paving the way for accurate two-way coupled simulations. It also opens perspectives for the construction of a coherent coupled fluid model for turbulent particle-laden flows.

**Titre :** Modélisation d'ordre réduit et simulation d'écoulements diphasiques dispersés turbulents: nouvelles approches théoriques et modèles pour la prédiction de l'intermittence, de la ségrégation et du couplage fort

**Mots clés :** Ecoulements à phase disperse, intermittence, ségrégation, couplage bi-directionnel, modèles stochastiques, modèles cinématiques

**Résumé :** La capacité de modéliser et simuler les écoulements turbulents à phase dispersée est un enjeu crucial pour de nombreuses applications industrielles et environnementales, telles que les moteurs à combustion interne, le transport de polluants ou la formation de nuages. Cependant, si la résolution de l'ensemble des échelles de la turbulence par DNS (Direct Numerical Simulation) est possible sur des configurations académiques simples, elle devient inenvisageable pour des applications réalistes. Il faut alors recourir aux ROS (Reduced-Order Simulations), qui, en filtrant ou moyennant les équations, permettent de ne prendre en compte que les grandes échelles de l'écoulement. Bien que de récentes avancées aient permis d'améliorer la qualité des modèles de turbulence, ils ne rendent pas compte fidèlement de l'interaction avec la phase dispersée, du fait des couplages non résolus aux petites échelles.

Afin de lever ce verrou, l'objectif de cette thèse est d'identifier les phénomènes physiques négligés par les ROS dans la dynamique des particules, et d'en proposer une caractérisation complète. A partir de ces analyses physiques, nous avons développé des modèles cohérents mathématiquement, qui couplés aux ROS, permettent de retrouver les statistiques obtenues par DNS pour une efficacité de calcul équivalente voire supérieure.

La première lacune identifiée dans les ROS est la perte du phénomène d'intermittence, correspondant à de fortes fluctuations du champ de dissipation de l'écoulement turbulent. Une caractérisation mathématique de l'intermittence a été proposée pour un écoulement monophasique. Les modèles stochastiques visant à reproduire l'intermittence reposent sur les chaos Gaussiens multiplicatifs, dont plusieurs modèles existent dans la littérature. Nous avons proposé une méthode mathématique originale permettant de construire de tels processus de manière générique comme somme infinie de processus d'Ornstein-Uhlenbeck. Ce formalisme permet non seulement d'unifier l'écriture des processus existants, mais surtout d'en développer un nouveau plus générique et plus efficace en temps de calcul.

De plus, un écoulement turbulent peut engendrer une hétérogénéité dans la distribution spatiale des particules appelée ségrégation. En ne résolvant pas les petites échelles avec lesquelles les particules interagissent, les ROS représentent mal ce phénomène. Pour retrouver ces propriétés, nous avons proposé un nouveau modèle cinématique à base d'ondelettes à divergence nulle. En comparant ce modèle à des simulations DNS et aux modèles cinématiques de la littérature, nous avons pu montrer qu'il permet de retrouver les principales statistiques des deux phases et de s'adapter à différents écoulements.

Enfin, les transferts d'énergie entre phases et entre les échelles résolues et non-résolues ne sont pas correctement reproduits dans les ROS actuelles. Préalable essentiel à la conception d'un nouveau modèle palliant ces défauts, nous avons mené un important travail d'analyse de ces rétrocouplages à partir de simulations DNS et en unifiant les résultats de la littérature. Nous avons ainsi pu identifier les échelles et mécanismes privilégiés de ces transferts d'énergie, ainsi que les paramètres prépondérants permettant de caractériser ces phénomènes, comme la densité moyenne de particules.

L'ensemble de ces travaux permet d'apporter un nouvel éclairage sur les interactions entre des particules et la turbulence. Cette thèse a ainsi permis de mener des analyses approfondies et de proposer des modèles originaux pour enrichir les ROS, ouvrant la voie à des simulations capturant fidèlement le rétro-couplage. Elle offre également de nombreuses perspectives pour la construction d'un modèle fluide couplé cohérent pour la simulation d'écoulements diphasiques turbulents.