

**Title :** Modèles stochastiques sur des échelles résiduelles en LES de pulvérisations pour des conditions de type diesel: formation de pulvérisation, dispersion turbulente et évaporation de gouttelettes

## **Résumé**

Dans le cadre de la simulation à grandes échelles (LES), la thèse aborde la simulation des sprays dans les conditions d'un moteur à injection directe. La vitesse de l'injection des sprays dans ces conditions est très élevée. En conséquence, des structures énergétiques intermittentes aux petites échelles turbulentes peuvent se manifester dans l'écoulement produit. C'est pourquoi l'accent est mis sur la simulation stochastique des effets turbulents aux échelles non-résolues par LES dans les conditions d'un moteur à injection directe. L'impact de ces effets sur l'atomisation primaire et secondaire, la dispersion des gouttelettes et leur vaporisation représente l'élément essentiel de cette thèse. Dans le but de modéliser ces effets d'intermittence aux échelles non-résolues, deux différentes approches ont été proposées récemment dans la littérature. Dans la thèse, l'accent est mis sur leur application et une éventuelle amélioration pour les conditions d'un moteur à injection directe. La première approche est LES-SSAM (Stochastic Subgrid Acceleration Model). Contrairement aux LES classiques, la LES-SSAM modélise l'accélération turbulente non résolue par le forçage de sous-maille des équations de Navier-Stokes. Ce forçage représente un processus stochastique de type Ornstein-Uhlenbeck construit de telle façon que les propriétés stochastiques de l'accélération, observées par les expériences et les simulations directes, sont représentées. Une telle LES-SSAM, où l'expression de la norme de l'accélération de sous-maille est modifiée, a été appliquée et testée pour la modélisation de l'écoulement interne de l'injecteur d'une simple configuration. Les résultats ont démontré l'efficacité de cette approche malgré la résolution grossière du maillage. Une autre application de LES-SSAM, dans la thèse, concerne sa combinaison avec la méthode VoF pour la simulation de l'écoulement à l'interface au voisinage de l'injecteur. Ici aussi, l'efficacité de cette combinaison a été démontrée en comparaison avec l'expérience et les méthodes numériques actuellement employées pour la simulation de l'atomisation primaire. La deuxième approche abordée dans la majeure partie de la thèse, et qui vise aussi à représenter les effets de l'intermittence aux échelles non-résolues, se base sur la formulation stochastique de la dynamique des gouttes en pulvérisation et en vaporisation, tout en couplage two-way avec l'écoulement turbulent. Les travaux contribuent à la vérification et l'amélioration de cette formulation stochastique. Ainsi le modèle stochastique d'atomisation secondaire est contrôlé par le processus stochastique log-normal pour la dissipation visqueuse. La même variable est la variable-clé pour le modèle de dispersion de gouttes, ces dernières étant soit inférieures soit

supérieures à l'échelle de Kolmogorov. La dernière situation a été décrite par la modification de l'équation de mouvement d'une goutte. Enfin, un nouveau modèle stochastique de vaporisation des gouttes, dont le mélange turbulent fait partie du modèle, a été proposé et testé. Tous ces modèles stochastiques ont été implantés dans le code OpenFoam puis testés en comparaison avec d'autres modèles et avec les données expérimentales présentées par le réseau Engine Combustion Network (ECN). L'avantage de l'application de ces modèles sur les maillages à la résolution grossière a été clairement démontré.

**Mots clés :** Simulations à grande échelle dans des moteurs à injection directe, modèles stochastiques à l'échelle du sous-réseau, effets d'intermittence, atomisation primaire et secondaire, dispersion, évaporation, turbulence proche de la paroi, iso-advecteur VOF.

**Title :** Stochastic models on residual scales in LES of sprays for diesel-like conditions: spray formation, turbulent dispersion and evaporation of droplets

### **Abstract**

This thesis concerns with the Large Eddy Simulations (LES) of fuel sprays in direct-injection engines. Given the high injection velocities of sprays, the resulting turbulent flow may be characterized by energetic intermittent structures at small spatial scales. Therefore, the emphasis in this thesis is put on stochastic simulation of turbulent effects on unresolved scales in the engine relevant conditions. The impact of this effect on spray primary and secondary atomization, on droplets dispersion and evaporation represents the main focus in this thesis. The further assessment and modification of two different approaches, developed recently, was the main objective in this thesis. The first one is addressed to LES-SSAM (stochastic sub-grid acceleration model) approach, in which the Navier-Stokes equations are forced on residual scales. This forcing is given by the Ornstein-Uhlenbeck stochastic process constructed in a way to represent the stochastic properties of the subgrid acceleration, known from the experiment and DNS. In the framework of this approach, with the expression of the acceleration norm modified for the wall-bounded conditions, the first step concerned the simulation of the nozzle internal flow on the coarse grid. The results showed the efficiency of this approach. Another step in this part was to combine LES-SSAM with the interface tracking VOF method in the simulation of the near-field of the spray. The performed assessment of this approach in comparison with measurements and with alternative approaches known from the literature demonstrated a potential of such combination of two methods. The second approach in this thesis, in which the intermittency effects on residual scales are also on target, concerned the

stochastic modeling of the secondary breakup, dispersion and evaporation of droplets; introducing the two-way coupling between droplets and a highly turbulent flow. Here, the assessment and further development of stochastic models of droplets represent the main contribution in this thesis. So, the model of the secondary breakup is controlled by the stochastic log-normal process for the viscous dissipation rate. The same stochastic variable is the key variable for the dispersion model of droplets below and above the Kolmogorov scale. The droplet equation of motion for the latter case was modified addressing the significant role to simulation the stochastic direction of the droplet acceleration. Finally, the new stochastic model of the turbulent evaporation, in which the stochastic mixing process is a part of the evaporation model, is also represented in this thesis. The different stochastic models outlined above are assessed in comparison to the state-of-art models available in literature and the experiments of Engine Combustion Network (ECN). The results have shown that stochastic models give a good representation of both macroscopic and microscopic spray characteristics on relatively coarse grids.

**Keywords:** Large eddy simulations in direct-injection engines, sub-grid scale stochastic models, intermittency effects, primary and secondary atomization, dispersion, evaporation, near-wall turbulence, iso-advecting VOF.