
Abstract

A numerical model describing the behavior of flexible fibers under inertial flows was developed by coupling a discrete element solver with a finite volume solver. Each fiber is discretized into several beam segments, such that the fiber can bend, twist and rotate. The equations of the fiber motion were solved using a 2nd order accurate explicit scheme (space and time). The three dimensional Navier-Stokes equations describing the motion of the fluid phase was discretized using a 4th order accurate (space and time) unstructured finite volume scheme. The coupling between the discrete fiber phase and the continuous fluid phase was obtained by a pseudo immersed boundary method as the hydrodynamic force on the fiber segments were calculated based on analytical expressions. Several hydrodynamic force models were analyzed and their validity and short-comings were identified. For Reynolds numbers (Re) at the inertial regime ($10^{-2} \leq Re \leq 10^2$, Re defined at the fiber scale), non linear drag force formulations based on the flow past an infinite cylinder was used. For rigid fibers in creeping flow, the drag force formulation from the slender body theory was used. A per unit length hydrodynamic torque model for the fibers was derived from explicit numerical simulations of shear flow past a high aspect ratio cylinder. The developed model was validated against several experimental studies and analytical theories ranging from the creeping flow regime (for rigid fibers) to inertial regimes. In the creeping flow regime, numerical simulations of semi dilute rigid fiber suspensions in shear were performed. The developed model was able to capture the fiber-fiber hydrodynamic and non-hydrodynamic interactions. The elasto-hydrodynamic interactions at finite Reynolds was validated with against two test cases. In the first test case, the deflection of the free end of a fiber in an uniform flow field was obtained numerically and the results were validated. In the second test case the conformation of long flexible fibers in homogeneous isotropic turbulence was obtained numerically and the results were compared with previous experiments. Two numerical studies were performed to verify the effects of the suspended fibers on carrier phase turbulence and the numerical model was able to reproduce the damping/enhancement phenomena of turbulence in channel and pipe flows as a consequence of the micro-structural evolution of the fibers.

Résumé

Un modèle numérique décrivant le comportement de fibres souples en suspension dans un écoulement de fluide en régime inertiel a été développé au moyen d'un couplage entre la méthode des éléments discrets et la méthode des volumes finis. Chaque fibre est discrétisée en plusieurs éléments de type poutre permettant de prendre en compte une déformation (flexion, torsion, allongement) et un mouvement de corps rigide. Les équations du mouvement des fibres sont résolues au moyen d'un schéma explicite du second ordre (temps et espace). Le mouvement de la phase fluide est décrit par les équations de Navier-Stokes, qui sont discrétisées et résolues au moyen d'un schéma aux volumes finis non structurés, d'ordre 4 (temps et espace). Le couplage entre la phase solide (discrète) et la phase fluide (continue) est obtenue par une pseudo méthode IBM (Immersed Boundary Method) dans laquelle l'effort hydrodynamique est calculé analytiquement. Plusieurs modèles de force hydrodynamique issus de la littérature sont analysés et leur validité ainsi que leurs limites sont identifiées. Pour des nombres de Reynolds (Re) correspondant au régime inertiel ($10^{-2} \leq Re \leq 10^2$, Re défini à l'échelle de la fibre), des formulations non-linéaires de la force hydrodynamique exercée par un écoulement uniforme sur un cylindre infini sont utilisées. Le couplage a aussi été utilisé pour des fibres rigides en écoulement de Stokes, en utilisant l'expression de la force de traînée issue de la théorie des corps élancés ('slender body theory'). Une expression du moment hydrodynamique par unité de longueur est obtenu à partir de simulations numériques par volumes finis de l'écoulement autour d'un cylindre élancé.

Le modèle développé a été validé par comparaison avec plusieurs résultats expérimentaux et analytiques, du régime de Stokes (pour des fibres rigides) jusqu'aux régimes inertiels. Dans

le cas du régime de Stokes, des simulations numériques du cisaillement de suspensions de fibres semi-diluées ont été réalisées. Le modèle développé permet de capturer les interactions hydrodynamiques et non-hydrodynamiques entre les fibres. Les interactions élasto-hydrodynamiques pour Re fini ont été validées dans deux cas. Dans le premier cas, la flèche d'une fibre encastrée-libre dans un écoulement uniforme a été obtenu par calcul numérique et le résultat validé par comparaison aux résultats expérimentaux de la littérature. Dans le second cas, la conformation de fibres élancées et très déformables dans un écoulement turbulent homogène et isotrope a été obtenu par calcul numérique et le résultat validé par comparaison aux résultats expérimentaux de la littérature. Deux études numériques ont été réalisées pour étudier l'effet de la présence de fibres en suspension sur la turbulence au sein du fluide suspensif. Le modèle numérique a permis de reproduire le phénomène de réduction/amplification de la turbulence dans un écoulement en canal ou en conduite, dû à l'évolution microstructurale de la phase fibreuse.