Résumé de la thèse en français

**Le nombre de caractères ne doit pas être supérieur à 4000.   
Les résumés français et anglais doivent tenir tous deux en 4ème de couverture de votre manuscrit, et les résumés déposés ici doivent être identiques à ceux du manuscrit.**

Toute surface naturelle est par essence non lisse, elle est constituée de rugosités plus ou moins régulières et / ou de structures mobiles d’échelles différentes et variées. D’un point de vue mécanique des fluides, ces surfaces naturelles proposent des meilleures performances aérodynamiques en termes de réduction de traînée, d’augmentation de la portance ou de contrôle du décollement lorsqu’elle couvre des corps en mouvement ; et cela a été prouvé pour des écoulements de couches limites ou de sillage, autour de corps épais. La simulation numérique d’écoulements aux échelles microscopiques autour des surfaces « naturelles » demeure de nos jours encore hors de portée. En conséquence, la thèse a pour objet d’étudier la modélisation du glissement apparent de l’écoulement sur ce genre surface, modélisée comme un milieu poreux, appliquant la théorie de la moyenne-volumique de Whitaker. Ce modèle mathématique permet globalement de représenter les détails de la micro-structure de ses surfaces en moyenne, tout en conservant une description satisfaisante des phénomènes physiques induits par l’écoulement.

Le premier chapitre de ce manuscrit dresse un panorama des efforts antérieurs portant sur la modélisation de ces surfaces en précisant les résultats les plus importants issus de la littérature. Le deuxième chapitre présente la dérivation mathématique des équations de Navier-Stokes en moyenne volumique (VANS en anglais) dans un milieu poreux. Dans le troisième chapitre est étudiée la stabilité de l’écoulement à l’interface entre un fluide libre et un milieu poreux, formé par une série de cylindres rigides. La présence de cette couche poreuse est traitée par un terme de traînée dans les équations du fluide. On montre que la présence de ce terme réduit les taux d’amplification de l’instabilité de Kelvin-Helmholtz sur toute la gamme des nombre d’onde et ainsi augmente la longueur d’onde du mode le plus amplifié. Dans ce même contexte a été calculée la différence entre un modèle isotrope et une approche tensorielle pour le terme de traînée, afin de déterminer l’approche la plus consistante pour une étude de stabilité de ce type d’écoulement. Cela a mené à la conclusion que le modèle le plus pertinent est celui utilisant le tenseur de perméabilité apparent. Dans le chapitre suivant, en s’appuyant sur ce dernier résultat, le tenseur de perméabilité apparent est identifié sur la base d’une centaine de simulations numériques directes, pour un milieu poreux tridimensionnel constitué de cylindres rigides, où le problème de fermeture est abordé par la méthode VANS. Dans ces configurations ce tenseur varie en fonction de quatre paramètres : le nombre de Reynolds, la porosité et l’orientation du gradient moyen de pression (définie par deux angles d’Euler). Cette paramétrisation permet de capturer les effets tridimensionnels locaux. Cette base de données ainsi constituée a permis de créer, sur la base d’une approche de type kriging, un méta-modèle comportemental pour estimer toutes les composantes du tenseur de perméabilité apparente.

Dans le cinquième chapitre sont menées des simulations des équations VANS à l’échelle macroscopique après implémentation du méta-modèle qui autorise des temps de calcul raisonnables. La validation de l’approche à l’échelle macroscopique est effectuée sur un écoulement dans une cavité fermé couverte d’une couche poreuse et une comparaison avec les résultats d’un DNS très précise, homogénéisés a posteriori montre un très bon accord et démontre la pertinence de la démarche. L’étape suivante a consisté en l’étude du contrôle du décollement pour un écoulement autour d’une bosse sur une paroi poreuse par cette même approche VANS macroscopique. Enfin des conclusions générales et des directions de recherche possibles dans le domaine d’étude sont présentées dans le dernier chapitre.

Résumé de la thèse en anglais

Any natural surface is in essence non-smooth, consisting of more or less regular roughness and/or mobile structures of different scales. From a fluid mechanics point of view, these natural surfaces offer better aerodynamic performances when they cover moving bodies, in terms of drag reduction, lift enhancement or control of boundary layer separation; this has been shown for boundary layer or wake flows around thick bodies. The numerical simulation of microscopic flows around "natural" surfaces is still out of reach today. Therefore, the goal of this thesis is to study the modeling of the apparent flow slip occurring on this kind of surfaces, modeled as a porous medium, applying Whitaker's volume averaging theory. This mathematical model makes it possible to capture details of the microstructure while preserving a satisfactory description of the physical phenomena which occur.

The first chapter of this manuscript provides an overview of previous efforts to model these surfaces, detailing the most important results from the literature. The second chapter presents the mathematical derivation of the volume-averaged Navier-Stokes equations (VANS) in a porous medium. In the third chapter the flow stability at the interface between a free fluid and a porous medium, formed by a series of rigid cylinders, is studied. The presence of this porous layer is treated by including a drag term in the fluid equations. It is shown that the presence of this term reduces the rates of amplification of the Kelvin-Helmholtz instability over the whole range of wavenumbers, thus leading to an increase of the wavelength of the most amplified mode. In this same context, the difference between the isotropic model and a tensorial approach for the drag term was evaluated, to determine the most consistent approach for the study of the stability of this type of flows. This has led to the conclusion that the most relevant model is the one using the apparent permeability tensor. In the following chapter, based on this last result, the apparent permeability tensor, based on over one hundred direct numerical simulations carried out over microscopic *unit cells*, has been identified for a three-dimensional porous medium consisting of rigid cylinders. In these configurations the tensor varies according to four parameters: the Reynolds number, the porosity and the orientation of the average pressure gradient (the latter defined by two Euler angles). This parameterization makes it possible to capture local three-dimensional effects. This database has been set up to create, based on a kriging-type approach, a behavioral meta-model for estimating all the components of the apparent permeability tensor.

In the fifth chapter, simulations of the VANS equations are carried out on a macroscopic scale after the implementation of the meta-model, and this allows reasonable computing times. The validation of the macroscopic approach is performed on a flow in a closed cavity covered with a porous layer and a comparison with the results of a very precise DNS, homogenized a posteriori, shows a very good agreement and demonstrates the relevance of the approach. The next step has been the study of the passive control of the separation of the flow past a hump which is placed on a porous wall, by the same macroscopic VANS approach.  Finally, general conclusions and possible directions of research in the field are presented in the last chapter.

Résumé de thèse vulgarisé pour le grand public en français

1000 caractères maximum !

Notre perception de la performance aérodynamique d’un objet se déplaçant à grande vitesse (avion, voiture, …) nous porte à penser que sa surface doit être la plus lisse possible. Hors, les surfaces biologiques naturelles ayant d’excellentes caractéristiques hydro- ou aérodynamiques ne sont pas lisses et comportent des rugosités ou des structures mobiles (ex. les écailles des requins ou les plumes d’oiseaux). Il s’agit de s’inspirer de la nature et d’étudier la possibilité d’augmenter les performances aérodynamiques des véhicules ayant des surfaces équipées de structures poreuses et mobiles. L’étude se concentre sur les écoulements autour de surfaces constituées de fibres minces cylindriques. Un modèle mathématique, associé à un méta-modèle spécifiquement créé, a été implémenté dans des simulations numériques et permet d'établir des prédictions de phénomènes physique tels que l'interaction entre la structure fibreuse du milieu poreux et l’écoulement externe et d’évaluer les performances locales aérodynamiques de ce milieu.

**Résumé de thèse vulgarisé pour le grand public en anglais**

Our perception of the aerodynamic performances of fast objects, such as cars or airplanes, make us think that in order to be fast the surfaces of such vehicles should be as smooth as possible. On the other hand, most of the surfaces existing in Nature are not at all smooth but present surface irregularities and/or movable structures, examples being the scales of sharks or the feathers of birds. In this work we study if this idea can be used on the surface of cars or airplanes, i.e. we want to understand if the application of such movable, porous structures can increase performances. We concentrate on porous surfaces formed by thin cylindrical fibers to study the fluid mechanism around them. A mathematical model and a related meta-model are developed to make predictions of the fluid dynamics phenomena involving the interactions of such fibrous structures with the external free flow, so as to extract the local aerodynamic performances of representative natural surfaces.