

**Université de la Méditerranée – Aix-Marseille II**

## Ph. D THESIS

Submitted to the University of Mediterranean (University of Aix-Marseille II)

In partial fulfillment of the requirements for the

Degree of Doctor of Philosophy

in Fluid Mechanics

Speciality: MECHANICS

Option: Fluid Mechanics

### **Numerical Study of Three Dimensional Turbulent Flows in a Habitat With Coupled Heat and Mass Transfer**

by

Shengping LUO

Defended on 31st Oct. 2003 before the Examination Committee:

BEN HADID Hamda,	Prof., Université Claude Bernard, Lyon I	Referee
LAUNDER Brian,	Prof. University of Manchester (UMIST), UK	
MOJTABI Abdelkader,	Prof., Université Paul Sabatier, Toulouse III	
PAVAGEAU Michel,	Maître de Conférence, Ecole des Mines de Nantes	Referee
REY Claude,	Prof., Université d'Aix-Marseille	
ROUX Bernard,	Directeur de Recherche - CNRS, L3M, Marseille	
SANI Robert,	Prof., University of Colorado, Boulder, USA	Referee
SCHIESTEL Roland,	Directeur de Recherche - CNRS, IRPHE, Marseille	
VIGLIANO Patrick,	Prof., Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II	

**Université de la Méditerranée – Aix-Marseille II**

**THESE**

Pour obtenir le grade de  
Docteur de l'Université de la Méditerranée – Aix-Marseille II

Spécialité : MECANIQUE

Option : MECANIQUE DES FLUIDES

**ETUDE NUMERIQUE D'ÉCOULEMENTS TURBULENTS  
TRIDIMENSIONNELS DANS UN HABITACLE ;  
COUPLAGE AVEC LES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE**

par

Shengping LUO

Soutenue le 31 octobre 2003 à 14:30 devant la commission d'examen :

BEN HADID Hamda,	Prof., Université Claude Bernard, Lyon I	Rapporteur
LAUNDER Brian,	Prof. University of Manchester (UMIST), UK	
MOJTABI Abdelkader,	Prof., Université Paul Sabatier, Toulouse III	
PAVAGEAU Michel,	Maître de Conférence, Ecole des Mines de Nantes	Rapporteur
REY Claude,	Prof., Université d'Aix-Marseille	
ROUX Bernard,	Directeur de Recherche - CNRS, L3M, Marseille	
SANI Robert,	Prof., University of Colorado, Boulder, USA	Rapporteur
SCHIESTEL Roland,	Directeur de Recherche - CNRS, IRPHE, Marseille	
VIGLIANO Patrick,	Prof., Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II	

## Abstract

With the ever-increasing availability of high-performance computing facilities, numerical simulation by way of Computational Fluid Dynamics (CFD) is increasingly used to predict air flow pattern and air distribution in buildings, it is now becoming an important design tool to investigate ventilation system performance, diagnose system problems and improve system designs. In this study, three kinds of 3D ventilation problems have been considered: (a) isothermal ventilation in simple rooms, (b) ventilation with coupled heat or mass transfer and (c) ventilation with simultaneous heat and mass transfer in an environmental test chamber with complicated internal configuration. They have been investigated numerically by using several turbulence models. The focus is to validate the turbulence models and modeling methods for their capability of simulating such ventilation flows with available experimental data and to evaluate their performances for the correct prediction of the above general ventilation problems often encountered in practice, especially ventilation flow in rooms with complicated internal configuration (humans, furniture, etc.) and passive or active sources (internal heat sources, CO<sub>2</sub> and other contaminant sources, etc.). The long-term objective is to evaluate the possibility of using CFD to investigate the ventilation flows and the associated heat and mass transfer processes inside a spacecraft cabin under microgravity. It is found that among the turbulence models tested, the two-equation SST  $k-\omega$  model yields the best overall prediction for a wide range of ventilation flows, especially for the ventilation flows with complicated flow features such as impingement, recirculation and separation and with simultaneous heat and mass transfer. A preliminary study of a ventilation flow in an environmental test chamber with coupled heat and mass transfer and with complicated internal configuration (human simulators, computers, tables, lamps etc.) under normal-g and zero-g conditions shows that the microgravity environment has very strong influence on the air flow pattern and temperature and contaminant distributions inside the room, it demonstrates also that numerical simulation is capable of diagnosing possible environmental problems such as the occurrence of over-heating and over-pollution areas due to poor ventilation inside a spacecraft cabin and at the same time providing useful information for the optimization of the airflow design. Further studies are planned to also account for radiative heat transfer in the CFD predictions to more realistically represent the heat transfer process especially in a microgravity environment.

The study showed that the validation of turbulence models and near-wall treatment methods is very important for obtaining reliable prediction results of ventilation flows.

**Key words:** ventilation, numerical simulation, CFD, turbulence modeling, heat transfer, mass transfer, contaminant distribution, microgravity, spacecraft.

## Résumé

Avec la disponibilité toujours croissante d'équipements de calcul très performants, la simulation numérique CFD est de plus en plus employée pour prévoir les modèles d'écoulements de ventilation et la distribution d'air dans les bâtiments. La CFD devient maintenant un outil de conception important pour examiner la performance de systèmes de ventilation, diagnostiquer des problèmes et améliorer les conceptions de systèmes. Dans la présente étude, trois sortes de problèmes de ventilation tri-dimensionnels ont été considérées: (a) ventilation isotherme dans des pièces simples, (b) ventilation et couplage avec le transfert de chaleur ou de masse, et (c) ventilation et couplage simultané avec les transferts de chaleur et de masse dans une salle de test d'environnement ayant une configuration interne compliquée. Ces problèmes ont été étudiés numériquement en employant plusieurs modèles de turbulence. L'un des buts est de valider les modèles de turbulence et les méthodes de modélisation pour leur capacité à simuler de tels écoulements de ventilation avec des données expérimentales disponibles, et d'évaluer la fiabilité de ces modèles pour la prédiction correcte des problèmes de ventilation généraux souvent rencontrés en pratique, c'est-à-dire, la prédiction d'écoulements de ventilation dans des pièces ayant une configuration interne compliquée (avec des personnes, des meubles, etc.) et comportant des sources passives ou actives (sources de chaleur internes, sources de CO<sub>2</sub> et de polluants, etc.). L'objectif à long terme est d'évaluer la possibilité d'employer efficacement la CFD pour prédire les écoulements de ventilation, les transferts de chaleur associés, ainsi que les processus de transfert de masse à l'intérieur d'une cabine d'un vaisseau spatial dans les conditions d'apesanteur. Un grand nombre de modèles ont été testés au préalable dans les conditions terrestres par comparaison avec les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature, notamment ceux produits lors du vaste projet de recherche international réalisé sous l'égide de l'Agence Internationale de l'Énergie (Annex 20: "Air Flow Patterns within Buildings"). Parmi les modèles de turbulence testés, on a trouvé que c'est le modèle SST  $k-\omega$  qui peut apporter la meilleure prédiction complète pour un grand choix d'écoulements de ventilation, particulièrement pour les écoulements de ventilation avec des particularités compliquées comme l'impact (sur les parois) de jets ou de panaches thermiques, la recirculation et la séparation, et avec transfert couplé de chaleur et de masse. Une étude préliminaire d'un écoulement de ventilation dans un habitacle de test d'environnement avec transfert de chaleur et masse, et avec une configuration interne complexe comportant des simulateurs humains, des ordinateurs, des tables, des lampes, a été réalisée dans des conditions de gravité normale et de gravité nulle ( $g=0$ ). Elle montre que l'environnement de microgravité a une influence très importante sur l'écoulement de l'air et sur la distribution de température et de polluant à l'intérieur de l'habitable. L'étude montre que les modèles de turbulence et la simulation numérique, avec maillage très fin, permettent de diagnostiquer de possibles problèmes environnementaux à l'intérieur d'une cabine spatiale, comme l'existence de zones surchauffées ou sur-polluées résultant d'une mauvaise ventilation, et fournissent les informations utiles pour corriger ces défauts et optimiser le système de ventilation. Des études complémentaires sont prévues ultérieurement pour prendre en compte également le transfert de chaleur radiatif dans les prédictions CFD pour représenter avec plus de réalisme les processus de transfert de chaleur particulièrement dans un environnement de microgravité.

L'étude a montré que la validation de modèles de turbulence et des méthodes de traitement de proche paroi est très importante pour l'obtention des résultats de prédiction fiables d'écoulements de ventilation.

---

**Mots clefs** : ventilation, simulation numérique, CFD, modélisation de turbulence, transfert de chaleur, transfert de masse, polluant, microgravité, cabine spatiale.