

Lecture Notes in Physics

Edited by H. Araki, Kyoto, J. Ehlers, München, K. Hepp, Zürich
R. Kippenhahn, München, H. A. Weidenmüller, Heidelberg
J. Wess, Karlsruhe and J. Zittartz, Köln

Managing Editor: W. Beiglböck

304

Roger Prud'homme

Fluides hétérogènes
et réactifs:
écoulements et transferts



Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo

Author

Roger Prud'homme
Laboratoire d'Aérothermique du C.N.R.S.
4ter Route des Gardes, F-92190 Meudon, France

ISBN 3-540-19327-8 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 0-387-19327-8 Springer-Verlag New York Berlin Heidelberg

This work is subject to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the material is concerned, specifically the rights of translation, reprinting, re-use of illustrations, recitation, broadcasting, reproduction on microfilms or in other ways, and storage in data banks. Duplication of this publication or parts thereof is only permitted under the provisions of the German Copyright Law of September 9, 1965, in its version of June 24, 1985, and a copyright fee must always be paid. Violations fall under the prosecution act of the German Copyright Law.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1988
Printed in Germany

Printing: Druckhaus Beltz, Hemsbach/Bergstr.
Binding: J. Schäffer GmbH & Co. KG., Grünstadt
2158/3140-543210

A ma femme Hayat

PREFACE

The aim of these lecture notes is to provide the reader with some basic notions and methods useful in the study of multicomponent fluid flows where the species are distributed into one or several phases. These flows are generally the seat of transport processes interacting with chemical reactions. In addition, instabilities may be present.

The four first chapters deal with general topics : constitutive relations and macroscopic balance equations of mixtures, transport phenomena and chemical kinetics, and basic principles of similarity analysis.

Coupled phenomena are described in Chap. 5 with regard to chemical relaxation, thermodiffusion and the Marangoni effect. Chapter 6 treats turbulence with a reactive or non-reactive fluid. Chapter 7 is devoted to the study of chemical reactors : ideal reactors, macromixture and micromixture, as well as plane adiabatic deflagration waves. The following situations are studied in the last four chapters : fluid and boundary layers, reactive and non-reactive waves, interfacial phenomena and multiphase flows.

Parts of this work were used in a postgraduate course at the Département de Physique des Liquides de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6) and in the mechanics option at the Ecole Polytechnique. But this book is also intended for the researcher or the engineer who wishes to treat real fluid problems.

The author is indebted to all the people who have, in several ways, contributed to the outcome of this book : Professors M. Barrère, P. Germain and L.G. Napolitano have played a very important role in my knowledge of aerothermochemistry, Professor E. Guyon helped me to prepare the postgraduate course mentioned earlier and Professor R.K. Zeytounian urged me to publish these notes. My thanks also go to F. Dupoirieux and to Mrs F. Baillot, who reread the text in fine detail, to Mrs M. Fleury and Ms C. Dupont, who ensured the careful typing of the manuscript and to J.P. Caressa, the Director of the Laboratoire d'Aérodynamique du C.N.R.S who has encouraged me greatly.

Paris, March 1988

TABLE DES MATIERES

	Pages
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : EQUATIONS D'ETAT.....	3
1. Définition des variables d'état d'un mélange.....	3
2. Fonctions thermodynamiques et lois d'état des fluides simples.....	7
3. Propriétés des mélanges.....	15
4. Mélange réactif.....	23
5. Tension superficielle.....	27
CHAPITRE 2 : PHENOMENES DE TRANSFERT. CINETIQUE CHIMIQUE.....	32
1. Généralités sur les phénomènes irréversibles.....	32
2. Présentation des coefficients de transfert par la thermodynamique des processus irréversibles.....	39
3. Présentation des coefficients de transfert par la théorie cinétique des gaz élémentaire	42
4. Eléments de cinétique chimique.....	47
CHAPITRE 3 : EQUATIONS DU BILAN DES ECOULEMENTS REACTIFS.....	50
1. Passage au continu : exemple du transfert thermique dans un milieu continu au repos.....	50
2. Rappels sur les notions de dérivées particulaire et de déformation.....	52
3. Bilan de masse de l'espèce j . Bilan de masse global.....	53
4. Equation générale du bilan d'une propriété F	55
5. Bilan de la quantité de mouvement.....	57
6. Bilan de l'énergie.....	57
7. Flux et production d'entropie dans un système discret.....	59
8. Bilan de l'entropie en milieu continu.....	62
9. Surfaces de discontinuité en milieu continu.....	63
10. Autres méthodologies pour les bilans.....	64
CHAPITRE 4 : NOMBRES SANS DIMENSION, SIMILITUDE.....	68
1. Eléments d'analyse dimensionnelle. Groupements Π_j	68
2. Similitude.....	72
3. Recherche analytique des solutions d'un problème de transfert thermique (solution auto-semblable).....	75
4. Quelques nombres sans dimensions.....	78
CHAPITRE 5 : PHENOMENES COUPLES.....	80
1. Généralités.....	80
2. Couplage entre cinétique chimique et écoulement : fluide compressible réactif.....	83
3. Transfert thermique et diffusion.....	87
4. Osmose thermique. Minimum de production d'entropie.....	89
5. Tension superficielle et viscosité.....	92

CHAPITRE 6 : NOTIONS SUR LES ECOULEMENTS TURBULENTS.....	98
1. Le régime turbulent.....	98
2. Instabilités de l'écoulement laminaire.....	102
3. Coefficients de transfert et cinétique chimique turbulents (théorie statistique simplifiée).....	106
4. Quelques définitions relatives à la turbulence.....	110
5. Modèles en $k - \varepsilon$ (fermeture pour les termes de transfert).....	112
6. Analyse spectrale et théorie de Kolmogorov.....	113
7. Classification des régimes turbulents de combustion.....	118
8. Notions sur les fonctionnelles de distribution de probabilité (fermeture pour les termes de production).....	120
9. Exemple de résolution complète d'un problème d'écoulement turbulent réactif.....	122
CHAPITRE 7 : REACTEURS CHIMIQUES.....	126
1. Réacteurs idéaux. Réacteurs réels.....	126
2. Réacteur chimique homogène à mélange parfait.....	127
3. Distribution des temps de séjour.....	138
4. Onde de déflagration.....	143
CHAPITRE 8 : COUCHE LIMITE ET COUCHES FLUIDES.....	150
1. Couches limites instationnaires.....	150
2. Ecoulements stationnaires d'un fluide visqueux incompressible entre deux cylindres coaxiaux.....	153
3. Couche limite laminaire incompressible stationnaire au-dessus d'une plaque plane	162
4. Couches limites laminaires stationnaires avec réactions chimiques au-dessus d'une plaque plane.....	171
5. Le disque tournant.....	179
6. Couche limite turbulente et analyse dimensionnelle.....	188
CHAPITRE 9 : ONDES REACTIVES ET NON REACTIVES.....	197
1. Considérations thermodynamiques.....	197
2. Ondes continues et discontinues en milieu barotrope.....	203
3. Vitesse d'un choc droit généré par un piston.....	208
4. Petits mouvements d'un fluide en théorie linéarisé.....	212
5. Les relations de Rankine-Hugoniot.....	221
6. Structure de l'onde de détonation plane stationnaire.....	228
7. Ondes sphériques.....	235
CHAPITRE 10 : PHENOMENES D'INTERFACE.....	244
1. Types d'interface.....	244
2. Mouvement et champ de déformation de la zone interfaciale.....	246
3. Forme générale des bilans interfaciaux.....	260
4. Interfaces de Gibbs.....	266
5. Flammes de prémélange.....	269
6. Couches limites.....	282
7. Interfaces présentant une résistance au plissement.....	286
CHAPITRE 11 : NOTIONS SUR LES ECOULEMENTS POLYPHASIQUES.....	294
1. Modèle simplifié d'écoulement avec particules	295
2. Problèmes à l'échelle d'une particule.....	309
BIBLIOGRAPHIE.....	326